

Курганов І.Д.

Криворізький національний університет

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРИВОДНИМ БАРАБАНОМ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА В АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМАХ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ВИКОРИСТОВУЮЧИ ПРИНЦИПИ РУХЛИВОГО КЕРУВАННЯ

Запропоновано оптимальне керування приводним барабаном стрічкового конвеєра у транспортному потоці завдяки зміни натягу стрічки з метою зниження витрат на транспортування вантажу за допомогою збільшення терміну експлуатації стрічки і зниження витрат на енергоспоживання.

Пропонується для усунення аварійного пробуксовування стрічки на барабані та її надмірного стирання в процесі транспортування рудної маси застосовувати керування натягом стрічки. Для реалізації методу керування, що розробляється, необхідно використовувати математичну модель з розподіленими параметрами, на основі якої і буде сформована модель оптимального керування.

Керування такого роду об'єктами обумовлюється технологічною необхідністю компенсації ковзання стрічки на приводному барабані конвеєра, в основі якого лежить процес передачі руху за допомогою тертя, і реалізується шляхом зміни теплового поля на дузі обхвату за допомогою зміни натягу стрічки конвеєра або швидкості обертання барабана.

Таким чином, з точки зору теорії керування системами з розподіленими параметрами в процесі керування тепловим полем приводного барабана та стрічки конвеєра, як керована координата виступає температура та її розподіл на дузі обхвату.

Внаслідок фізичних процесів під час керування натягом стрічки змінюється як величина джерела теплового потоку, так і величина поверхні його випромінювання.

Таким чином, задача оптимального керування набуває нового характеру і переходить у задачу рухомого оптимального керування, де джерело теплового потоку а також його розподіл, розглядається як рухомий елемент, що змінює своє положення в процесі керування.

Ключові слова: *стрічковий конвеєр, фрикційна пара, кут робочого ковзання, теплове поле, оптимальне керування.*

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Однією з аварійних ситуацій, яка найбільш часто зустрічаються, що призводить до зупинки конвеєрної лінії, є пробуксовування приводної станції одного з стрічкових конвеєрів тракту подачі транспортованої рудної маси. В результаті доводиться зупинити весь конвеєрний тракт і здійснювати повторний пуск, але вже завантажених конвеєрів, що може призвести до пробуксовування фрикційної передачі стрічкових конвеєрів. У технологічній експлуатації стрічкових конвеєрів часто виникають ситуації, коли натяг конвеєрної стрічки ослаблений, що викликає збільшення опору руху стрічки. В результаті підвищуються витрати потужності, що споживається, приводною станцією конвеєра і знижується к.к.д. фрикційної пари барабан-стрічка, що збільшує стирання робочих поверхонь стрічки та футерування барабана, а в результаті їх тертя-нагрів.

Аналіз досліджень та публікацій. Дослідженням даної проблеми займалися автори робіт

[1, с. 5; 3, с. 115; 5, с. 200], які моделювали теплові процеси в зоні контакту стрічки та барабана та проводили експериментальні дослідження, що підтверджують результати моделювання та необхідність застосування заходів щодо усунення причин.

Так в роботі, що виконана В.С. Волотковським, отримані такі результати. На стрічкових конвеєрах великої довжини від 467 до 1870 м, площа зірваної нижньої обкладки змінюється від 15 до 25%, що викликано виникненням пробуксовування стрічки та великими значеннями напруги в нижній обкладці стрічки при її взаємодії з приводним барабаном.

У разі пробуксовування температура у зоні зчеплення стрічки та барабана зростає до 300-350°C за 15 хвилин роботи конвеєра [5, с. 200]. У своїх роботах В.Г. Пілецький виконав моделювання фрикційної пари та досліджував теплові режими приводного барабана при пробуксовуванні стрічки на ньому для різної швидкості її руху та вплив кута обхвату барабана стрічкою на швидкість зростання температури нагрівання.

У роботі [3, с. 115] автори М.О. Малютін, Л.І. Попов виконали математичне моделювання фрикційної пари з урахуванням рівняння теплопровідності Фур'є. Експериментальні дослідження температури тертя в контактній стрічка-барабан, проводилися на конвеєрах комбінату «Апатит», методом термопар із записом на осцилографі. Тут результати показали, що температура у зоні контакту тертя за зміну (5 годин безперервної роботи) зростає від 79.5 до 127°C.

Постановка задачі. Автором роботи пропонується виконати цифрове моделювання фрикційної пари як моделі з розподіленими параметрами для її подальшого використання у розробці оптимальної системи автоматичного управління. Оптимальне управління технологічним процесом транспортування вантажу будується на створенні оптимального режиму роботи фрикційної пари конвеєра приводний барабан-стрічка.

Виклад матеріалу та результатів. Розв'язання задачі керування фрикційною парою приводний барабан – стрічка заснована на побудові математичної моделі розподілу температури на дузі обхвату. Ця модель розглядається як елемент об'єкта керування, яким на нижньому рівні АСК ТП виступає стрічковий конвеєр. Керування такого роду об'єктами обумовлюється технологічною необхідністю компенсації ковзання стрічки на приводному барабані конвеєра. Керування конвеєром здійснюється за допомогою САК. Керуючими впливами є натяг стрічки та швидкість обертання приводного барабана, а контрольованим параметром – температура нагрівання футерування в зоні зчеплення. За основу побудови завдання керування доцільно використовувати принципи формування математичних моделей з розподіленими параметрами. Вибір такого класу систем ґрунтується на фізиці процесу взаємодії фрикційної передачі. Для визначення температури нагрівання футерування барабана, її розподілу на дузі робочого ковзання необхідне рішення крайової задачі, тобто. вирішення рівняння теплопровідності Фур'є за заданих початкових та кінцевих умов.

Величина джерела тепла, що випромінюється, залежить від кута (дуги) робочого ковзання, величина якого змінюється при зміні натягу стрічки конвеєра, тобто джерело тепла розподілено уздовж дуги і його положення і розподіл на дузі зчеплення барабана зі стрічкою конвеєра залежить від величини кута робочого ковзання. З погляду теорії завдань теплопровідності, дуга (кут) робочого ковзання є граничною областю випромінюваного теплового потоку.

Таким чином, зміна величини дуги (кута) робочого ковзання змінює питому величину теплового потоку, що випромінюється в результаті тертя, який є непрямим проявом керуючого впливу, розподіленим в просторі взаємодії стрічки і футерування приводного барабана.

Розглянемо основні складові кута обхвату під час використання гнучкого зв'язку барабан – стрічка. Як відомо, при передачі руху за допомогою тертя кут на приводному барабані розділиться на дві його складові (див. рис. 1). Одна з них є кутом робочого ковзання $\alpha_{ск}$, де рух передається стрічці та його величина на приводному барабані визначає тягову здатність конвеєра. Друга складова є кутом відносного спокою $\alpha_{оп}$, величина якого дозволяє виключити пробуксовування стрічки на приводному барабані конвеєра.

У фізичній основі лежить процес передачі руху у вигляді тертя. Керування реалізує зміну теплового поля на дузі обхвату шляхом зміни натягу стрічки конвеєра або швидкості обертання барабана.

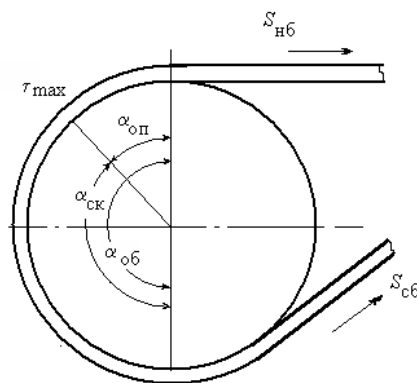


Рис. 1. Схема визначення тягової сили, переданої приводним барабаном стрічкового конвеєра

Вирішення цієї задачі дозволить виконати одну з основних вимог, що пред'являються до конвеєрної лінії – це виключення аварійного пробуксовування, а значить, запобігти перериванню технологічного процесу.

Проблема керування сприймається як задача оптимального керування з розподіленими параметрами.

Під математичною моделлю фрикційної пари приводний барабан-стрічка вважаємо теплове поле $\tau_i(x, y, z, t)$, де (x, y, z) – декартові координати точки на приводному барабані або $\tau_i(R, \varphi, z, t)$, де (R, φ, z) – циліндричні координати точки, t -час.

Попередньо вважаємо, що температура по ширині барабана рівномірно розподіляється. У цьому випадку завдання розглядається тільки в одній просторовій площині декартова (x, y) або циліндрична (R, φ) . Крайова задача зводиться до

класу двовимірних рівнянь теплопровідності із постійними коефіцієнтами.

Тепловий розрахунок фрикційної пари барабан-стрічка, заснований на вирішенні рівняння теплопровідності, яке описує теплообмін у системі футерування барабана – дуга робочого ковзання – стрічка конвеєра

$$\frac{d\tau_1}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_1}{dx^2} + \frac{d^2\tau_1}{dy^2} + \frac{d^2\tau_1}{dz^2} \right),$$

$$\frac{d\tau_1}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_1}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\tau_1}{dR} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{d^2\tau_1}{d\phi^2} + \frac{d^2\tau_1}{dz^2} \right),$$

де τ_1 – температура перегріву (понад температури навколишнього повітря), град; ζ – коефіцієнт теплопровідності, м²/сек.

Розглянемо детально формування крайової задачі, що включає рівняння теплопровідності, а також початкові та граничні умови.

Подібні крайові задачі раніше виконували автори [3, с. 115; 5, с. 200] при моделюванні теплових процесів взаємодії приводного барабана та стрічки.

Рівняння теплопровідності є параболічним рівнянням, що характеризує нестационарні процеси температурного розподілу.

$$\frac{d\tau_1}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_1}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\tau_1}{dR} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{d^2\tau_1}{d\phi^2} + \frac{d^2\tau_1}{dz^2} \right) + q(t)$$

$$t > 0; R1 \leq R \leq R2; 0 \leq \phi \leq 2\pi, \quad (1)$$

$$\frac{d\tau_2}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_2}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\tau_2}{dR} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{d^2\tau_2}{d\phi^2} + \frac{d^2\tau_2}{dz^2} \right) + q(t)$$

$$t > 0; R2 \leq R \leq R3; 0 \leq \phi \leq \pi,$$

де τ_2 – температура стрічки, град; $R1, R2$ – внутрішній та зовнішній радіуси барабана, включаючи футерування, м; $R3$ – зовнішній радіус стрічки огинаючої барабан, м (див. рис. 2); $q(t)$ – джерело теплового потоку, Дж.

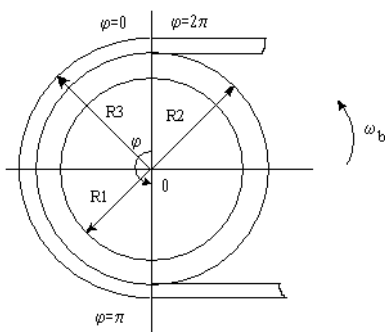


Рис. 2. Фрикційна пара барабан-стрічка конвеєра

У якості початкових умов задаємо температурний розподіл у початковий момент часу

$$\tau_1(R, \phi, 0) = \tau_{10}. \quad (2)$$

Граничні умови – умови III-го роду, для опису процесів теплообміну футеровки барабана та стрічки конвеєра, а також теплообміну стрічки з навколишнім середовищем. При цьому не враховуємо теплообмін з навколишнім середовищем торцевих поверхонь стрічки та барабана, а також внутрішньої поверхні барабана та зовнішньої поверхні стрічки. Розглянуті тіла вважаємо однорідними ізотропними з постійними теплофізичними характеристиками. Вважаємо, що температура по ширині барабана розподіляється рівномірно, у цьому випадку завдання розглядається тільки в одній просторовій площині, циліндричній (R, ϕ).

Граничні умови представлені у вигляді:

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_1}{\partial R} \Big|_{R=R1} = \alpha_2 \cdot [\tau_1(R1, \phi, t) - t_0], \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi \quad (3)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_2}{\partial R} \Big|_{R=R2} = \alpha_1 \cdot [\tau_1(R2, \phi, t) - t_0], \quad 0 \leq \phi \leq \pi \quad (4)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_2}{\partial R} \Big|_{R=R3} = \alpha_2 \cdot [\tau_2(R3, \phi, t) - t_0], \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi \quad (5)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_1}{\partial R} \Big|_{R=R2} = \alpha_2 \cdot [\tau_1(R2, \phi, t) - t_0], \quad \pi \leq \phi \leq 2\pi \quad (6)$$

$$\tau_1(R, \phi, t) = \tau_1(R, \phi + 2\pi n, t) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \tau_1}{\partial \phi} \Big|_{\phi=\phi} = \frac{\partial \tau_1}{\partial \phi} \Big|_{\phi=\phi+2\pi n}, \quad n=0, 1, 2, \dots, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \tau_2}{\partial \phi} \Big|_{\phi=0} = \frac{\partial \tau_2}{\partial \phi} \Big|_{\phi=\pi} = 0$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу барабана та стрічки, Вт/м•град; α_1 – коефіцієнт теплообміну між поверхнями барабана і стрічки, Вт/м²•град; α_2 – коефіцієнт теплообміну з повітрям зовнішньої поверхні барабана, Вт/м²•град [5 с. 202].

Коефіцієнти ζ і λ пов'язані співвідношенням $\zeta = \lambda / c \cdot \rho$, де ρ – щільність тіла, що нагрівається, кг/м³; c – теплоємність, Дж/кг•град.

Таким чином, представлена математична модель фрикційної пари приводний барабан – стрічка є крайовою задачею в основі, якою лежить рішення рівняння теплопровідності, технологічної системи, що розглядається, і є складовою задачею оптимального керування.

Як подальший розвиток ідеї керування фрикційною парою приводний барабан – стрічка виступають принципи рухомого керування, що застосовуються в системах з розподіленими параметрами. Розглянемо детальніше.

Система автоматичного керування з розподіленими параметрами, що розробляється, зводиться не тільки до задачі оптимального керування, а має

ширший розгляд. Це пов'язано з тим, що внаслідок фізичних процесів під час керування натягом стрічки змінюється як величина джерела теплового потоку (q), так і величина поверхні, де відбувається його випромінювання ($\alpha_{\text{ск}}$).

Таким чином, завдання оптимального керування набуває нового характеру і переходить у задачу рухомого оптимального керування, де джерело теплового потоку а також його розподіл, розглядається як рухомий елемент, що змінює своє положення в процесі керування. Відповідно, закон або алгоритм руху джерела називатимемо рухомих керуючим впливом або рухомих керуванням.

Розглянемо математичний опис задачі рухомого керування.

Класичне (нерухоме) керування, взагалі кажучи, векторне $q(x, y, t)$ замінюється при цьому на

$$q[x, y, t, x - \phi(t), y - \phi(t)],$$

де $\phi(t)$ – місце розташування джерела, що змінюється ($\phi(t) = v(t)$, $v(t)$ – швидкість), і постає тепер як окремий випадок більш загального впливу. Тут x, y і ϕ також, взагалі кажучи, вектори [2 с. 35].

Можна розглянути й інше формулювання завдання керування. Наприклад, нехай D – просторова область визначення керуючих впливів деякої розподіленої системи. Рухоме керування даного розподіленого об'єкта характеризуватимемо функцією $v(x, y, t)$, $x \in D, y \in D, t \geq t_0$, яка представляється у вигляді

$$v(x, y, t) = u(x, y, t) \cdot \mu(x, y, t),$$

де $u(x, y, t)$ – інтенсивність рухомого управління, а $\mu(x, y, t)$ – міра, що характеризує просторово-часову локалізацію, причому

$$\mu(x, y, t) \geq 0, \quad \iint_D \mu(x, y, t) dx dy, \quad t \geq t_0 \quad [2 \text{ с. } 35].$$

Окремим випадком такого керування є зосереджене в точці рухоме керування, причому координати точки зосередження залежать від часу. Інакше кажучи, є деяка часова програма руху зосередженого джерела $\phi(t)$ у просторі, тобто $\phi(t)$ – параметрично (параметр – час) задана траєкторія, що належить області D . Цьому окремому випадку точці локалізації рухомого керування відповідає сингулярна міра

$$\mu(x, t) = \delta(x - \phi(t)), \quad x \in D, \quad \phi(t) \in D, \quad t \geq t_0,$$

$$\mu(y, t) = \delta(y - \phi(t)) \quad y \in D, \quad \phi(t) \in D, \quad t \geq t_0.$$

Рухоме керування у цьому випадку має вигляд $v(x, y, t) = u(x, y, t) \cdot \delta(x - \phi(t)) \cdot \delta(y - \phi(t))$ [2 с. 35].

У нашому випадку, при розгляді системи оптимального керування під областю D мається на увазі дуга обхвату приводного барабана стрічкою конвеєра. Часовою програмою руху $\phi(t)$ у просторі є зміна положення точки початку дуги робочого ковзання $\alpha_{\text{ск}}$ за зміни натягу стрічки конвеєра внаслідок керування.

Щоб розглядати задачу рухомого керування, як нерухому досить покласти

$$\phi(t) = k \text{ для усіх } t \in [t_0, t_n],$$

де k – фіксоване значення, що розглядається на часовому проміжку.

Таким чином, крайова задача [5, с. 200] буде представлена в наступному вигляді

$$\frac{d\tau_1}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_1}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\tau_1}{dR} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{d^2\tau_1}{d\phi^2} + \frac{d^2\tau_1}{dz^2} \right) + q(R, \phi, z, t) \cdot \delta(\phi - \phi(t))$$

$$t > 0; R_1 \leq R \leq R_2; 0 \leq \phi \leq 2\pi$$

$$\frac{d\tau_2}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_2}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\tau_2}{dR} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{d^2\tau_2}{d\phi^2} + \frac{d^2\tau_2}{dz^2} \right) + q(R, \phi, z, t) \cdot \delta(\phi - \phi(t))$$

$$t > 0; R_2 \leq R \leq R_2; 0 \leq \phi \leq \pi$$

задача оптимального керування формується на основі функціоналу, який дозволить виконати оптимальне керування розподілом температури на дузі обхвату приводного барабана в часовій області. Значення температурного розподілу визначається для кількох точок досліджуваного простору дуги обхвату. Функціонал представлений таким виразом

$$J = \int_0^T [\tau_1^*(x, y, z) - \tau_1(x, y, z, t)]^2 dt \rightarrow \delta.$$

В результаті задача рухомого керування може бути сформульована в такий спосіб. З усіх можливих алгоритмів керування q вказати такий, за якого функціонал J задовольнив умову $J \rightarrow \delta$ (де δ – деяке позитивне число, що характеризує точність наближення до бажаного розподілу) за мінімально можливий час T .

Висновки та напрямок подальших досліджень. Таким чином, фрикційна пара приводу конвеєра включає досить складне завдання дослідження фізичних процесів. Вирішення цієї задачі дає результати визначення режимів роботи приводного барабана. При внесенні до неї додаткового закону керування, ця задача розгортається в задачу оптимального керування, а за зміною її граничних умов реалізуються закони рухомого керування.

Список літератури:

1. Андреев А.В. Передача трением. Москва, 1963. 109 с.
2. Бутковский А.Г., Пустыльников Л.М. Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами. Москва, 1980. 384 с.

3. Малютин М.А., Попов Л.И. Исследование контактной температуры в приводах ленточных конвейеров. *Известия Вузов. Горный журнал*. 1972. № 2. С. 115-119.

4. Рапопорт Э.Я Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. Москва, 2003. 299 с.

5. Трошило В.С., Пилецкий В.Г. Исследование нагрева ленты конвейера при пробуксовке приводного барабана. *Гірнич електромеханіка та автоматика*. 1999. № 2(61). С. 200-204.

Kurganov I.D. OPTIMAL CONTROL OF THE DRIVE DRUM OF THE BELT CONVEYOR IN AUTOMATIC SYSTEMS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS USING THE PRINCIPLES OF MOBIL CONTROL

Optimum control of the drive drum of the belt conveyor in the transport flow due to the change in belt tension is proposed in order to reduce the cost of transporting goods by increasing the life of the belt and reducing energy consumption costs.

It is suggested to use tape tension control to eliminate the accidental slipping of the tape on the drum and its excessive abrasion during the transportation of the ore mass. To implement the control method being developed, it is necessary to use a mathematical model with distributed parameters, on the basis of which the optimal control model will be formed.

Control of this kind of objects is determined by the technological need to compensate for the slippage of the belt on the drive drum of the conveyor, which is based on the process of transmission of motion using friction, and is implemented by changing the thermal field on the arc of the girth by changing the tension of the conveyor belt or the speed of rotation of the drum.

Thus, from the point of view of the theory of control of systems with distributed parameters, in the process of controlling the thermal field of the drive drum and the conveyor belt, the controlled coordinate is the temperature and its distribution on the girth arc.

As a result of physical processes, both the size of the source of the heat flux and the size of the surface of its radiation change during the control of the tape tension.

Thus, the task of optimal control acquires a new character and turns into a task of moving optimal control, where the source of the heat flow and its distribution are considered as a moving element that changes its position during the control process.

Key words: belt conveyor; a frictional couple, operating slip angle, thermal field, optimum control.