

**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ СТРІЧКОВИМ КОНВЕЄРОМ
У СКЛАДІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТУВАННЯ
РУДНОЇ МАСИ КЕРУЮЧИ НАТЯГОМ СТРІЧКИ**

Анотація. Запропоновано оптимальне керування конвеєром 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 пробуксування 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 як керована координата виступає температура або її розподіл на дузі обхвату.

Внаслідок зміни окружного зусилля на приводному барабані змінюється тиск стрічки на футерування барабана, що призводить до зміни величини теплового потоку як за амплітудою, так і за просторовим розподілом (змінюється величина дуги робочого ковзання $\alpha_{ск}$, тобто площа пружної взаємодії), що компенсується шляхом керування натягом стрічки.

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

Розвиток мікропроцесорної техніки та застосування її у промисловому виконанні для управління технологічними процесами дозволило відійти від старих принципів побудови АСК ТП, які базувалися на принципах передачі двопровідною лінією. Застосування сучасних мережевих технологій дозволило

підвищити швидкість передачі і при цьому розширити її обсяг, що дозволяє системі виконувати як аварійні відключення і блокування, пов'язані з неузгодженою роботою конвеєрів, але здійснювати попереднє їм управління, що дозволяє виключити можливі ситуації.

Яскравим прикладом застосування АСК ТП конвеєрною лінією на базі сучасних промислових мікроконтролерів є система управління конвеєрним трактом дробильної фабрики ДФ-3 гірничо-збагачувального комбінату ПівніГЗК (Кривий Ріг).

Розробки систем автоматизованого керування конвеєрними лініями ведуться з часів початку застосування стрічкових конвеєрів. Так у 60-ті роки авторами роботи [1] були сформульовані вимоги до систем автоматичного керування лініями стрічкових конвеєрів:

1. Централізований автоматичний пуск всіх конвеєрів лінії необхідної послідовності, з необхідної витримкою часу між включенням двигунів конвеєрів.

2. Дистанційний візуальний контроль за пуском та роботою конвеєрів.

3. Автоматичний контроль часу запуску (нормального розгону) окремих конвеєрів.

4. Автоматизований контроль стану механізмів встановлення та автоматичне відключення конвеєра при механічних пошкодженнях, зупинці або пробуксуванні його стрічки.

5. Автоматичне відключення всіх конвеєрів, що передають вантаж на конвеєр, що зупинився.

6. Можливість зупинки всієї конвеєрної лінії з пункту керування та екстреної зупинки електродвигунів з будь-якого місця вздовж конвеєрної лінії або з місця встановлення двигунів.

7. Місцевий ручний пуск будь-якого конвеєра поза блокувальною заленістю під час ремонту регулювання та випробування.

8. Двостороння звукова оперативна та попереджувальна сигналізація.

9. Автоматичне приведення схеми у положення "вимкнено" при знятті напруги.

10. Відключення конвеєра при сході стрічки убік, відключення наступних конвеєрів при переповненні перевантажувальної тічки, пуск з пульта керування частини конвеєрної лінії з подальшим дозапуском решти, пуск та зупинка бічних відгалужень при розгалуженій схемі конвеєрної лінії.

У роботі [2] розглянуто постановку завдань для різних рівнів ієрархії АСК з точки зору теорії автоматичного управління. Для досліджень цікавить завдання нижчого рівня, що лежить в основі всієї піраміди ієрархії завдань управління. Це завдання керування окремими агрегатами чи технологічними процесами. Єдино розумним критерієм функціонування кожної окремої установки є технологічна собівартість, яка залежить від характеру перебігу технологічного процесу. У роботі класифікуються завдання:

- статична оптимізація, в якій існують обурення постійні часу, набагато більші за середній час знаходження об'єкта в статичному стані;
- оптимальна стабілізація об'єкта управління щодо деякого заданого стану;
- облік динамічних властивостей об'єкта за необхідності оперативного узгодження навантажень у масштабі всього виробництва.

У цій роботі будуть розглянуті питання виконання вимог до керування конвеєрною лінією, представлених у п. 4 вимог, що належать до роботи [1].

Пропонується для усунення аварійного пробуксування 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 із застосуванням принципів керування розглянутих у роботі [2].

Причина всіх питань, що розглядаються, закладена в параметрах вантажопотоку, що транспортується, який пред'являє вимоги до формування тягового фактора для реалізації, представлених вище фізичних процесів у фрикційній парі при транспортуванні матеріалу. Основний параметр це погонна маса матеріалу, що транспортується. Так в роботі, було виконано В.С. Волотковським, та отримано наступні результати. На стрічкових конвеєрах великої довжини від 467 до 1870 м, площа зірваної нижньої обкладки змінюється від 15 до 25%, що викликано виникненням пробуксування стрічки та великими значеннями напруги в нижній обкладці стрічки при її взаємодії з приводним барабаном. Підвищення завантаження конвеєра, ослаблений натяг стрічки призводить до збільшення дуги робочого ковзання, що підвищує стирання стрічки і може викликати аварійне пробуксування. У разі пробуксування зростає температура в зоні зчеплення стрічки та барабана, яка досягає 300-350 °С за 15 хвилин його роботи [4]. У разі робочого ковзання відбуваються втрати енергії,

що витрачаються на подолання сил тертя, частина яких викликає зміну температури у зоні контакту барабан – стрічка.

Дослідженням питань зміни температури займалися такі автори як М. А. Малютін, Л.І. Попов, В.Г. Пілецький та ін [3,4]. Вирішення проблеми створення системи автоматичного керування фрикційною парою приводний барабан-стрічка висуває як основне завдання побудова математичної моделі розподілу температури на дузі обхвату як об'єкта 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.

Проблема керування сприймається як завдання оптимального керування з розподіленими параметрами.

Підхід до побудови системи керування заснований на побудові оптимальної детермінованої моделі пари барабан-стрічка і організація керування по цій моделі. Під моделлю фрикційної пари приводної барабан-стрічка розуміється теплове поле $\tau_1(x, y, z, t)$, де x, y, z – декартові координати точки на приводному барабані або $\tau_1(R, \varphi, z, t)$, де R, φ, z – циліндричні координати точки, t -час.

Вважаємо, що температура по ширині барабана розподіляється рівномірно, у цьому випадку завдання розглядається лише в одній просторовій площині декартової (x, y) або циліндричної (R, φ) . Крайова задача зводиться до класу двовимірних рівнянь теплопровідності із постійними коефіцієнтами.

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

При виборі керуючих впливів, що визначають режим охолодження (нагріву) робочої області фрикційної пари (дуги ковзання), необхідно дотриматися технологічних обмежень на допустиму величину температури робочої області, як вихідна координата об'єкта управління необхідно мати безпосередньо температурне поле $\tau_1(R, \varphi, z, t)$ або величину температури в заданій точці простору.

Процес керування будується так, щоб найкращим чином за вибраним критерієм оптимальності досягти найкращого наближення величини теплового

102

джерела до бажаної його величини при дотриманні природних обмежень на керування та стан об'єкта.

Управління процесом нагрівання чи охолодження здійснюється шляхом зміни натягу стрічки. Опишемо цю дію деякою функцією $S(t)$ і підкоримо цю функцію наступному обмеженню

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

де константи A_1 та A_2 відповідають граничним значенням керуючої величини.

Тепер необхідно встановити зв'язок між $\tau_1(t)$ і $S(t)$. Відповідно до термінів теорії автоматичного керування потрібно визначити передатну функцію системи, входом якої служить зміна натягу стрічки $S(t)$, а виходом температура нагріву $\tau_1(t)$ на дузі обхвату приводного барабана та стрічки конвеєра при їх фрикційному взаємодії. Можливі принаймні два способи опису цієї передавальної функції. Найпростіший із них полягає в наступному. Вважати-мемо, що між входом і виходом системи є лише дві елементарні ланки: ланка запізнювання, що характеризує затримку роботи приводу натяжної станції та кінцевої довжини конвеєра, і інерційна ланка, що враховує поступовість наростання температури при стрибкоподібній зміні натягу стрічки. При цьому зв'язок між $\tau_1(t)$ та $S(t)$ може бути виражений наступним рівнянням:

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

де τ – час запізнення, B – постійна часу інерційної ланки, k – статичний коефіцієнт передачі. Дане рівняння дає дуже спрощену картину роботи конвеєра, тому що натяг стрічки не може змінюватися стрибком, а змінюється під дією вантажу на стрічці та роботою приводу натяжної станції.

Більш точний опис зв'язку між функціями $\tau_1(t)$ і $S(t)$ може бути отриманий, якщо зробити повний тепловий розрахунок фрикційної пари барабан-стрічка, вирішуючи спільно з рівнянням теплопровідності (4), яке описує теплообмін у системі футерування барабана – дуга робочого ковзання – стрічка конвеєра.

Як критерій якості керування виберемо наступний функціонал

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

де D – деяка просторова область, T – час процесу керування, $\tau_1^*(R, \varphi, z)$ – необхідний температурний розподіл.

Структурна схема математичної моделі буде у наступному вигляді (рис.1). Натяг стрічки, що змінюється приводом натяжної станції, змінює тягову здатність приводного барабана, що призводить до зміни температури в зоні

обхвату дуги фрикційної пари. Сигнал керування $\tau_1(t)$ та сигнал обурення $\alpha_{ск}(t)$ надходять на вхід блоку температурного поля, який представимо у вигляді функції

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

де A – деякий оператор.

Практично цей оператор є в загальному випадку рішенням диференціального рівняння в частинних похідних, яке описує процес теплообміну у фрикційній парі приводний барабан-стрічка. Знаходження оператора A для опису динаміки шуканих координат процесу керування і становить завдання керування.

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

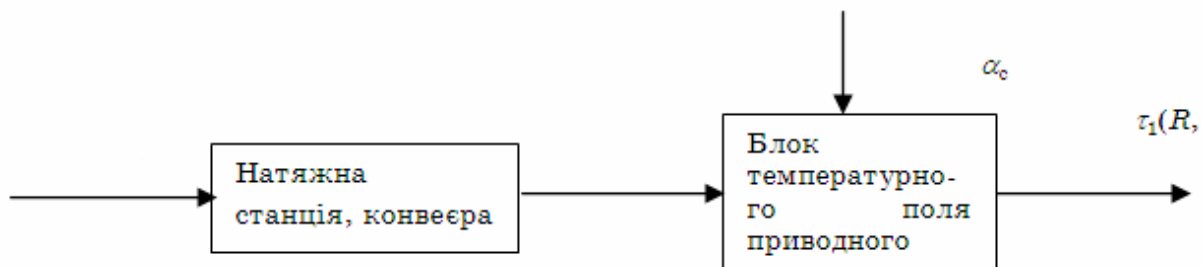


Рисунок 1 - Структурна схема моделі системи керування

Подібні крайові завдання раніше виконували автори [3,4] при моделюванні теплових процесів взаємодії приводного барабана та стрічки.

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

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

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

де τ_1 – температура перегріву (понад температуру навколишнього повітря), град; ζ – коефіцієнт температуропровідності, м²/с; τ_2 – температура стрічки, град; R_1, R_2 – внутрішній та зовнішній радіуси барабана, включаючи футерування, м; R_3 – зовнішній радіус стрічки огинаючої барабан, м (рис. 2); q – джерело теплового потоку.

Як початкові умови задаємо температурний розподіл у початковий момент часу

$$\tau_1(R, \varphi, 0) = \tau_{10}.$$

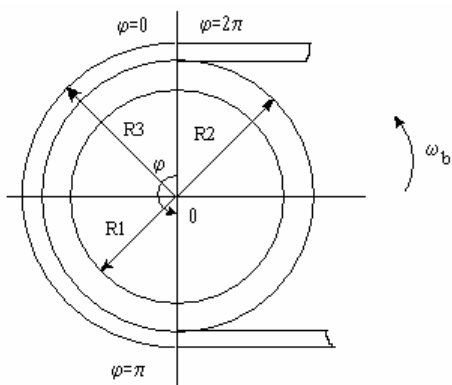


Рисунок 2 - Фрикційна пара барабан-стрічка конвеєра

Як граничні умови використовуємо умови III-го роду, для опису процесів теплообміну футеровки барабану та стрічки конвеєра та теплообміну 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 лише в одній просторовій площині – циліндричній (R, φ) .

Граничні умови представимо у вигляді

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_1}{\partial R} \Big|_{R=R1} = \alpha_2 \cdot [\tau_1(R1, \varphi, t) - t_0], \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (5)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_2}{\partial R} \Big|_{R=R2} = \alpha_1 \cdot [\tau_1(R2, \varphi, t) - t_0], \quad 0 \leq \varphi \leq \pi \quad (6)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_2}{\partial R} \Big|_{R=R3} = \alpha_2 \cdot [\tau_2(R3, \varphi, t) - t_0], \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (7)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_1}{\partial R} \Big|_{R=R2} = \alpha_2 \cdot [\tau_1(R2, \varphi, t) - t_0], \quad \pi \leq \varphi \leq 2\pi \quad (8)$$

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

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

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

где λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу барабана та стрічки, Вт/м·град;
 α_1 - коефіцієнт теплообміну між поверхнями барабана і стрічки, їх взаємодії,

Вт/м²·град; α_2 - коефіцієнт теплообміну із повітрям зовнішньої поверхні барабана, Вт/м²·град [4]. Коефіцієнти ζ і λ пов'язані співвідношенням $\zeta = \lambda / c \cdot \rho$, где ρ - щільність тіла, що нагрівається, кг/м³; c – теплоємність, Дж/кг·град.

Для вирішення поставленого завдання використовуємо додаток PDE Toolbox (від англ. Partial Differential Equation – диференціальне рівняння у частинних похідних), який містить пакет MATLAB. Додаток забезпечує вирішення диференціальних рівнянь у частинних похідних методом кінцевих елементів двомірної постановки. Воно включає графічний інтерфейс; інструменти завдання форми рівнянь та граничних умов; процедуру автоматичної генерації сітки кінцевих елементів; засоби для візуалізації отриманого рішення та його анімації. Результат виконання подано на рис. 3

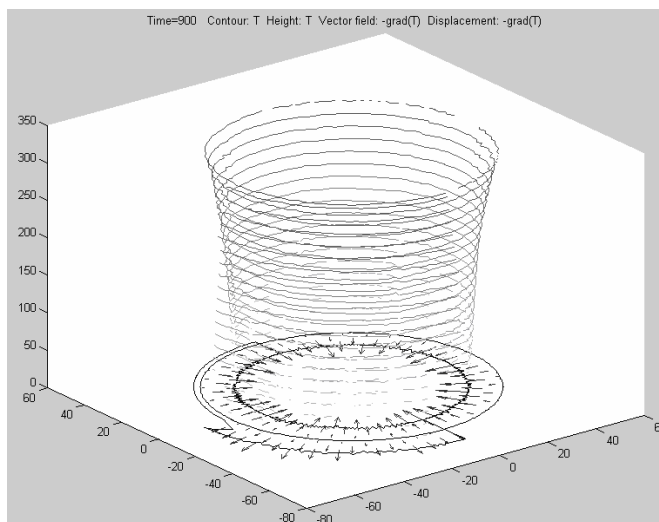


Рисунок 3 - Розподіл теплового поля у фрикційній парі барабан- стрічка при аварійному пробуксовуванні

Таким чином, завдання оптимального управління може мати таке формулювання. Для рівняння теплопровідності (4) з початковими та граничними умовами (5)-(11), включаючи рівняння зв'язку (2), потрібно підібрати таке керування $S(t)$, $0 \leq t \leq T$, яке задовольняє умові (1), щоб функціонал (3) задовольнив умову $J \leq \delta$ (де δ - деяке позитивне число, що характеризує точність наближення до бажаного розподілу) за мінімально можливий час T .

Внаслідок зміни окружного зусилля на приводному барабані змінюється тиск стрічки на футерування барабана, що призводить до зміни величини теплового потоку як за амплітудою, так і за просторовим розподілом (змінюється величина дуги робочого ковзання $\alpha_{ск}$, тобто площа пружної взаємодії), що компенсується шляхом керування натягом стрічки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Волотковский 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 // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 1999. - №2(61). – С. 200-204.

REFERENCES

1. Volotkovsky S.A., Fursov V.D. Automation of control lines of belt conveyors in ore mines and quarries // Izv. universities Mining magazine. - 1960. - No. 12. -p.117-128.
2. Kolesnik V.V., Korobtsov A.A. Production with continuous technology as an object of automatic control // Adaptive systems of automatic control. - 1973. - No. 1. - S. 70-77.
3. Malyutin M.A., Popov L.I. Investigation of contact temperature in drives of belt conveyors. Izv. universities. Mining magazine. - 1972. -№2. -WITH. 115-119.
4. Troshchilo V.S., Piletsky V.G. Investigation of the heating of the conveyor belt during the slipping of the drive drum. - 1999. - No. 2 (61). - S. 200-204.

Received 14.04.2023.

Accepted 18.04.2023.

Optimal control of the belt conveyor as part of the technological process of ore mass transportation by controlling the belt tension

Optimum control of the conveyor in the transport flow due to the change of the belt tension is proposed in order to reduce the costs 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 slippage 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 an optimal control model will be formed using the control principles considered in the work.

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 belt, the controlled coordinate is the temperature or its distribution on the girth arc.

As a result of a change in the circumferential force on the drive drum, the pressure of the tape on the lining of the drum changes, which leads to a change in the value of the heat flow both in terms of amplitude and spatial distribution (the value of the working sliding arc changes, i.e. the area of elastic interaction), which is compensated by controlling the tension ribbons

Курганов Ігор Дмитрович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації, комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Криворізький національний університет.

Kurganov Igor Dmitrovich – Candidate of Technical Sciences, Senior Foreman of the Department of Automation, Computer Science and Information Technologies, Kryvyi Rih National University.