

УДК 621.867.13

Ловейкін В.С., д.т.н.; Ромасевич Ю.О., д.т.н.; Грушко О.Є.

Національний університет біоресурсів і природокористування

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ РУХУ СКРЕБКОВОГО КОНВЕЄРА

Анотація. Наведено постановку задачі оптимального керування рухом скребкового транспортера під час його пуску. Оптимізаційний критерій відображає середньоквадратичне значення приводного зусилля. Встановлено, що поставлена задача не може бути розв'язана за допомогою варіаційного числення. Для знаходження наближеного розв'язку задачі використано метод колокацій. Знайдено наближений розв'язок задачі та побудовано графіки, які йому відповідають. Аналіз динамічних та кінематичних функцій руху скребкового конвеєра показує покращення динамічних та енергетичних показників роботи конвеєра.

Ключові слова: скребковий транспортер, оптимізація, метод колокацій, динамічні навантаження, математична модель.

Аннотация. Приведена постановка задачи оптимального управления движением скребкового транспортера во время его пуска. Оптимизационный критерий отражает среднеквадратическое значение приводного усилия. Установлено, что поставленная задача не может быть решена с помощью вариационного исчисления. Для нахождения приближенного решения задачи использован метод колокаций. Найдено приближенное решение задачи и построены графики, которые ему соответствуют. Анализ динамических и кинематических функций движения скребкового конвейера показывает улучшение динамических и энергетических показателей работы конвейера.

Ключевые слова: скребковий транспортер, оптимізація, метод колокації, динамічні навантаження, математична модель.

Abstrakt. Zeigt die Einstellung der optimalen Bewegungssteuerung Förder zum Zeitpunkt der Markteinführung. Das Optimierungskriterium reflektiert srednekvadratischskoe Wert der Antriebskraft. Es wurde festgestellt, dass das Problem nicht das Problem der Variationsrechnung mit nicht gelöst werden können sein kann. So finden Sie die Näherungslösung Kollokationsverfahren verwendet. Eine Näherungslösung des Problems und die Diagramme, die ihm entsprechen. Analyse von dynamischen und kinematischen Eigenschaften der Bewegung der Kratzförderer zeigt die Verbesserung der dynamischen Leistung und Energie Pipeline Arbeit.

Stichwort: *Förderer, Optimierung, Kollokationsverfahren, dynamische Belastung, mathematisches Modell.*

Постановка проблеми.

Машины непрерывного транспорта, зокрема, скребкові конвеєри широко використовуються для транспортування зерна, коренеплодів, силосної маси, комбікормів тощо. При перехідних режимах руху скребкових конвеєрів в їх елементах виникають динамічні навантаження, які призводять до втоми металу та руйнувань конструкції. Це впливає на зниження надійності та довговічності роботи конструкції конвеєра. Так у роботі [1] встановлено, що 43–49% відмов скребкових конвеєрів спричинені важкими пусками та заклинюванням тягового органу. Для вирішення даної проблеми необхідно оптимізувати закон руху приводного механізму скребкового конвеєра на ділянці пуску, який би мінімізував динамічні навантаження. Вирішення цієї актуальної задачі дозволить підвищити ефективність роботи конвеєра.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

У роботі [2] А. А. Долголенка запропоновано методику визначення динамічних зусиль в тягових ланцюгах з врахуванням їх пружних властивостей. Дослідник розглянув тяговий ланцюг як систему з розподіленими параметрами та встановив вплив динамічних характеристик тягового органу на коливальні процеси. І. Г. Штокман у роботі [3] навів результати теоретичних та експериментальних досліджень динаміки тягових ланцюгів скребкових конвеєрів. В цій роботі вченим розроблено теорію динаміки тягових ланцюгів скребкових конвеєрів і методику розрахунку динамічних зусиль. Динамічні навантаження скребкових та інших ланцюгових конвеєрів з урахуванням дисипативних сил досліджені в роботах В.К. Смірнова і В. П. Крота [4]. Роботи С. М. Кожевнікова [5, 6] присвячені дослідженню динаміки перехідних процесів у важких конвеєрах з врахуванням пружності ланок. Рух конвеєрів у цих роботах описується системою лінійних диференціальних рівнянь.

Дослідження динаміки конвеєрів з ланцюговим тяговим органом проведено Л. І. Чугреєвим [7]. В його роботі враховано спільний вплив на рух механічної системи привода, ланцюгового робочого органу і оставу, які змінюють свої динамічні та кінематичні характеристики в процесі експлуатації.

У роботі [8] О. Ю. Ткаченко дослідила динамічні процеси, які мають місце у скребковому конвеєрі при його пуску. Крім того, тут наведено розв'язок декількох задач оптимізації режиму пуску конвеєра, в яких використані інтегральні критерії з підінтегральними виразами, що відображають зусилля у тяговому органі конвеєра та його вищі похідні за часом.

Постановка мети та задач дослідження.

Мета дослідження – за рахунок оптимізації режиму пуску скребкового конвеєра досягнути підвищення ефективності його роботи. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: 1) розрахувати оптимальний за інтегральним критерієм режим пуску скребкового конвеєра; 2) провести аналіз руху конвеєра при реалізації оптимального керування.

Виклад основного матеріалу.

Для проведення оптимізації режиму пуску скребкового конвеєра необхідно вибрати її динамічну модель. При розробці динамічної моделі скребкового конвеєра, кінематична схема якого зображена на рис. 1 [8], вважаємо, що всі елементи скребкового конвеєра є абсолютно твердими тілами, крім елементів передавального механізму і тягового органу, які володіють пружними властивостями. При цьому корпус приводу конвеєра і вали тягових зірочок закріплені абсолютно жорстко.

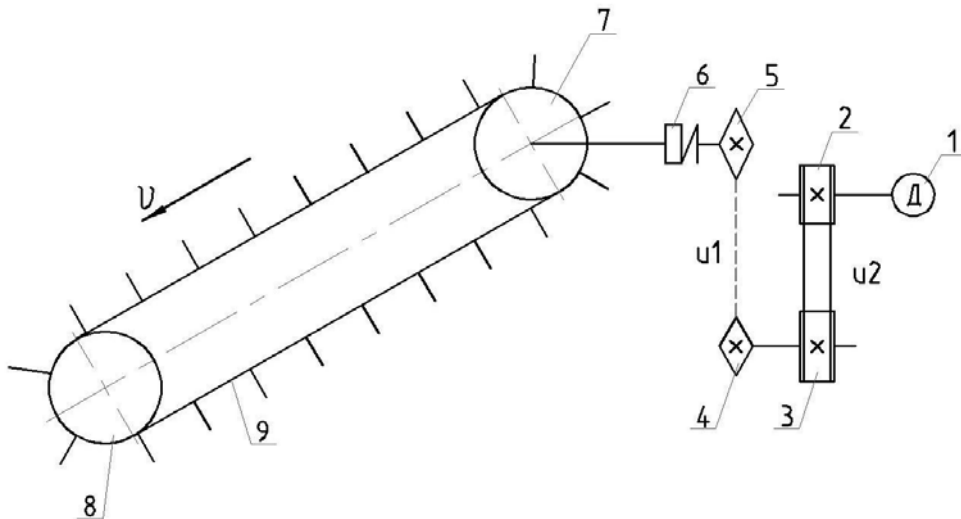


Рис. 1. Кінематична схема скребкового конвеєра: 1 – двигун; 2, 3 – шкві пасової передачі; 4, 5 – зірочки ланцюгової передачі; 6 – муфта; 7 – привідна зірочка; 8 – натяжна зірочка скребкового конвеєра; 9 – ланцюг зі шкребками; u_1 і u_2 – передавальні числа ланцюгової і пасової передач відповідно

На основі кінематичної схеми машини (рис. 1) у роботі [8] розроблена динамічна модель її руху, яка показана на рис. 2 (вона буде використана у даному дослідженні).

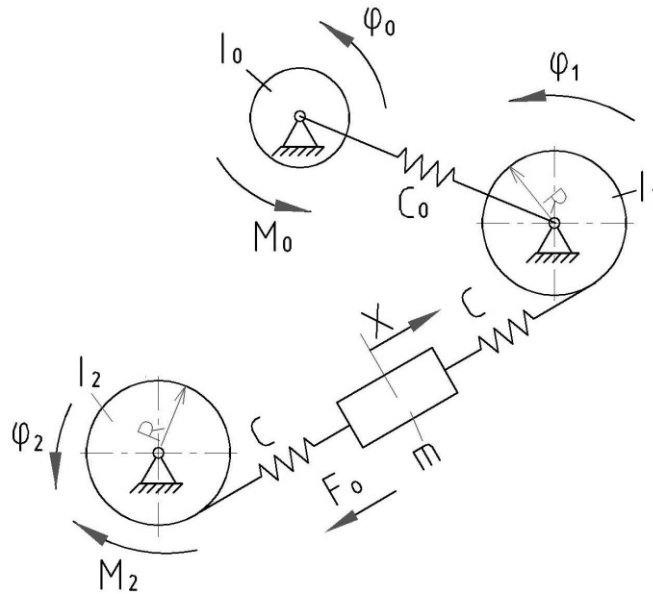


Рис. 2. Чотиримасова динамічна модель скребкового конвеєра

В якості узагальнених координат динамічної моделі прийняті: $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ – кутові координати переміщення ротора двигуна, приводної і натяжної зірочок конвеєра відповідно; x – координата центру мас робочої гілки конвеєра.

На рис. 2 прийняті наступні позначення: c_0 – коефіцієнт жорсткості приводного механізму, приведений до осі повороту приводного вала; c – коефіцієнт жорсткості ланцюга робочої гілки конвеєра; R – радіус приводної та натяжної зірочок; M_0 і M_2 – моменти приводу і сил тертя натяжної зірочки відповідно; F_0 – сила опору переміщенню робочої гілки конвеєра; m – зведена до поступального руху маса робочої гілки конвеєра і транспортованого вантажу; I_0, I_1, I_2 – зведені моменти інерції приводу, приводної і натяжної зірочок відповідно.

Складена на основі принципу Даламбера система диференціальних рівнянь, що описує динамічні процеси в скребковому конвеєрі, представляється в такому вигляді [8]:

$$\begin{cases} I_0 \ddot{\varphi}_0 = M_0 - c_0 (\varphi_0 - \varphi_1); \\ I_1 \ddot{\varphi}_1 = c_0 (\varphi_0 - \varphi_1) - cR (\varphi_1 R - x); \\ m \ddot{x} = c (\varphi_1 R - x) - c (x - \varphi_2 R) - F_0; \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 = cR (x - \varphi_2 R) - M_2. \end{cases} \quad (1)$$

Точка над символом означає диференціювання за часом. Виконаємо постановку задачі оптимального керування рухом скребкового конвеєра під час його розгону. Будемо вимагати мінімізації інтегрального функціоналу, який відображає

середньоквадратичне значення рушійного моменту приводу скребкового конвеєра:

$$I = \left(\frac{1}{T} \int_0^T M_0^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де T – тривалість розгону транспортуючої машини. Мінімізація критерію (2) дозволить зменшити небажані енергетичні втрати під час пуску конвеєра та знизить рівень динамічних навантажень у його ланках.

З врахуванням системи рівнянь (1) вираз (2) записується у такому вигляді:

$$I = \left(\frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_{i=0}^4 A_i \frac{d^{2i} \varphi_2}{dt^{2i}} \right)^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де A_i – коефіцієнти, які виражаються через параметри скребкового конвеєра.

Задамо умови для руху зосереджених мас динамічної моделі конвеєра:

$$\begin{cases} \varphi_0(0) = \varphi_1(0) = x(0) = \varphi_2(0) = 0; \\ \dot{\varphi}_0(0) = \dot{\varphi}_1(0) = \dot{x}(0) = \dot{\varphi}_2(0) = 0; \\ x(T) - \varphi_2(T)R = \frac{M_2}{cR}; \\ \varphi_1(T)R - x(T) = \frac{M_2}{cR} + \frac{F_o}{c}; \\ \varphi_0(T) - \varphi_1(T) = \frac{M_2}{c_0} + \frac{F_o R}{c_0}; \\ \dot{\varphi}_0(T) = \dot{\varphi}_1(T) = \dot{\varphi}_2(T) = \omega_y; \\ \dot{x}(T) = \frac{\omega_y}{R}, \end{cases} \quad (4)$$

де ω_y – усталена швидкість руху елементів, які виконують обертальний рух.

Крайові умови означають рух зосереджених елементів системи зі стану спокою. У момент часу T всі елементи, які виконують обертальний рух, повинні мати однакову кутову швидкість, а маса m повинна рухатись зі швидкістю $\frac{\omega_y}{R}$. Відносне положення елементів системи відповідає умові деформації ланцюга та пружної муфти приводного механізму в результаті навантаження їх зусиллям F_o та моментом M_2 .

З урахуванням системи рівнянь (1) крайові умови можна переписати відносно функції ϕ_2 та її вищих похідних за часом:

$$\begin{cases} \phi_2(0) = \dot{\phi}_2(0) = \ddot{\phi}_2(0) = \overset{IV}{\phi}_2(0) = \overset{V}{\phi}_2(0) = \overset{VI}{\phi}_2(0) = \overset{VII}{\phi}_2(0) = \overset{VIII}{\phi}_2(0) = 0; \\ \dot{\phi}_2(T) = \omega_y; \\ \ddot{\phi}_2(T) = \overset{IV}{\phi}_2(T) = \overset{V}{\phi}_2(T) = 0 = \overset{VI}{\phi}_2(T) = \overset{VII}{\phi}_2(T) = \overset{VIII}{\phi}_2(T) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Для мінімізації критерію (3) спробуємо використати варіаційне числення [9]. Для цього запишемо необхідну умову мінімуму критерію (3) – рівняння Ейлера-Пуассона:

$$L(\phi_2) = \sum_{j=2}^8 B_j \frac{d^{2j} \phi_2}{dt^{2j}} = 0, \quad (6)$$

де L – лінійний оператор, який діє на функцію ϕ_2 ; B_j – коефіцієнти, які можна виразити через параметри скребкового конвеєра.

Для розв’язування однорідного диференціального рівняння (6) складемо відповідне характеристичне рівняння:

$$\sum_{j=2}^8 B_j r^{2j} = 0, \quad (7)$$

яке заміною $r_2 = z$ зводиться до наступного:

$$\sum_{j=2}^8 B_j z^j = 0. \quad (8)$$

Рівняння (8) – це алгебраїчне рівняння восьмого степеня, тому знайти його розв’язок у радикалах неможливо.

Отже, знайти аналітичний розв’язок оптимізаційної задачі (3), (5) не вдається. Для того, щоб отримати наближений розв’язок даної задачі використаємо метод коллокацій [10]. У відповідності до цього методу сформуємо базисну функцію, на якій будемо шукати наближений розв’язок варіаційної задачі (3), (5). Будемо вимагати, щоб базисна функція була розв’язком крайової задачі:

$$\begin{cases} \overset{XXI}{\phi}_2 = 0, \\ \phi_2(0) = \dot{\phi}_2(0) = \ddot{\phi}_2(0) = \overset{IV}{\phi}_2(0) = \overset{V}{\phi}_2(0) = \overset{VI}{\phi}_2(0) = \overset{VII}{\phi}_2(0) = \overset{VIII}{\phi}_2(0) = 0; \\ \dot{\phi}_2(T) = \omega_y; \\ \phi_2\left(\frac{Tk}{6}\right) = q_k, \quad k = 1, 2, 3, 4, 5; \\ \ddot{\phi}_2(T) = \overset{IV}{\phi}_2(T) = \overset{V}{\phi}_2(T) = \overset{VI}{\phi}_2(T) = \overset{VII}{\phi}_2(T) = \overset{VIII}{\phi}_2(T) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

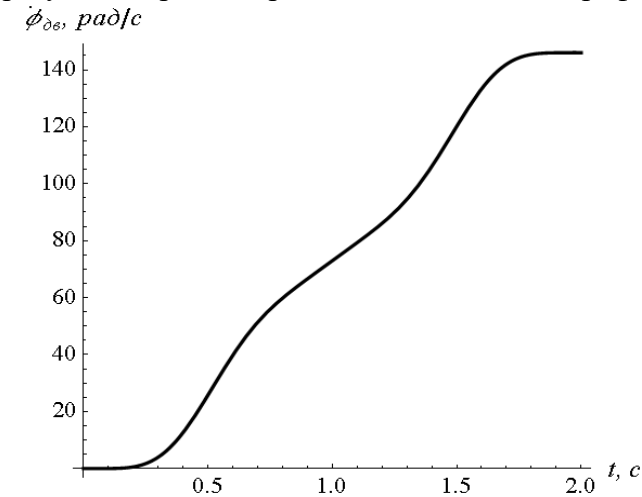
Розв’язок крайової задачі (9) має значний об’єм і тому тут не наводиться. Надалі знаходячи вищі похідні функції за часом та

підставляючи їх у вираз (6) сформуємо нев'язку розв'язку рівняння Ейлера-Пуассона. У відповідності до методу коллокацій будемо вимагати рівності сформованої нев'язки рівняння Ейлера-Пуассона у моменти часу $\frac{Tk}{6}$ ($k = 1, 2, 3, 4, 5$). Ця вимога математично записується

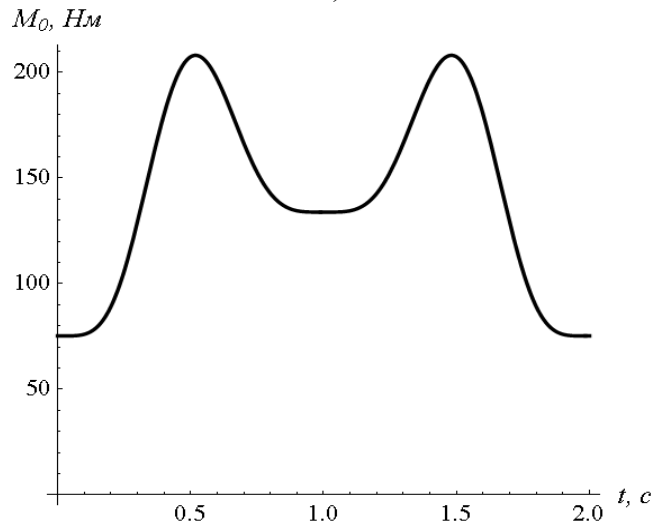
у вигляді системи алгебраїчних рівнянь:

$$L(\varphi_2)\Big|_{t=\frac{Tk}{6}} = 0, \quad k = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (10)$$

яка має значний об'єм і тут не наводиться. Для параметрів скребкового транспортера ТС-40 знайдено чисельний розв'язок системи (10). Отриманий результат проілюстровано за допомогою графіків (рис. 3).



а)



б)

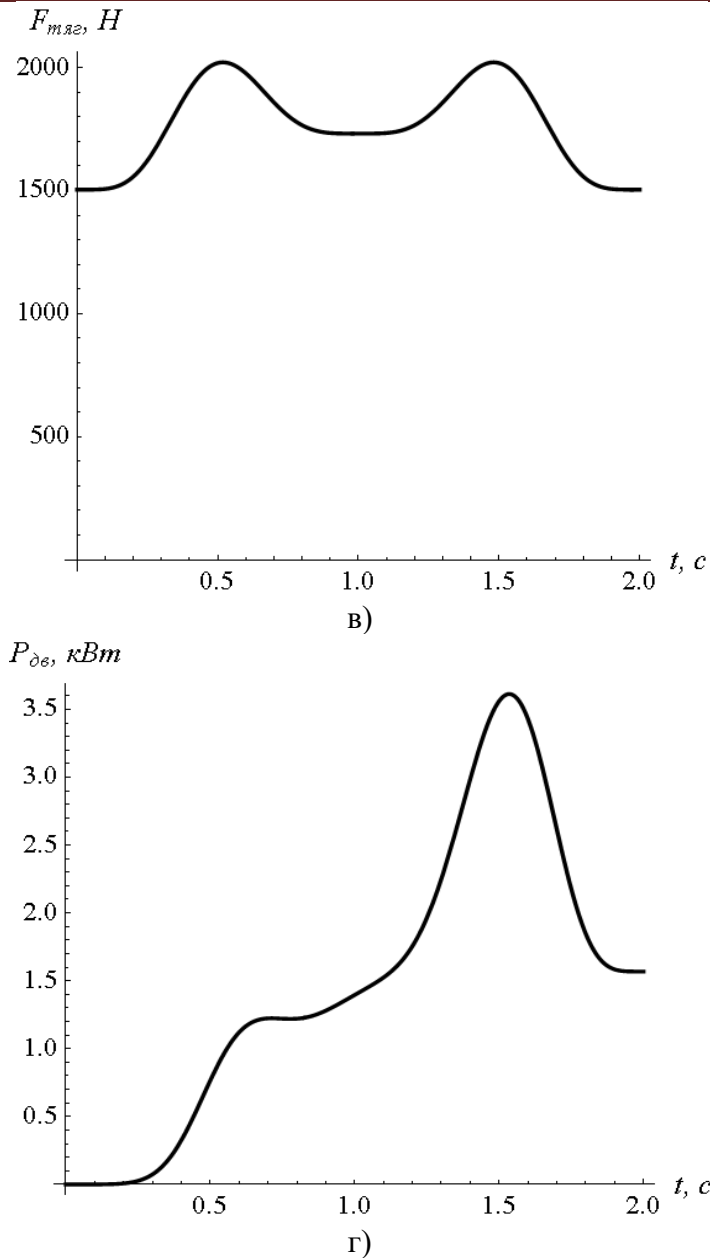


Рис. 3. Графіки, які відповідають знайденому наближеному розв'язку задачі оптимального режиму пуску скребкового конвеєра: а) кутова швидкість двигуна; б) зусилля у тяговій гілці конвеєра; в) момент у пружній муфті; г) потужність приводного двигуна

Аналіз графіків, які наведені на рис. 3, показує, що рух системи є плавним, без різких ривків. Це, безперечно, бажана характеристика, оскільки надійність та довговічність елементів системи (ланцюга, електродвигуна, кінематичних передач, муфти тощо) при цьому підвищується.

Крім того, наведемо графік залежності величини функціонала (3) від тривалості розгону системи (рис. 4).

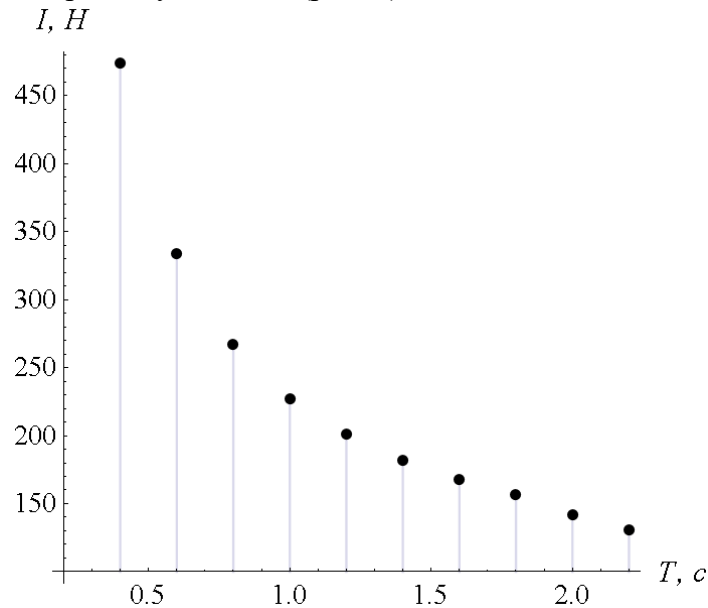


Рис. 4. Залежність величини функціонала I від значення T

Аналіз графіка, який показано на рис. 4 вказує на те, що при зменшенні тривалості розгону системи значення функціоналу зростає. При цьому збільшуються небажані динамічні навантаження у елементах скребкового конвеєра та зростають енерговтрати в приводному механізмі. Вибір величини T виконується на компромісній основі і вимагає подальших досліджень, які не входять у рамки даної роботи.

Висновки. У роботі отримано наближений розв'язок варіаційної задачі, який дав змогу зменшити небажані показники роботи скребкового конвеєра під час його пуску. До таких показників належать динамічні зусилля у ланцюгу та пружний момент у муфті. Вираз мінімізованого функціоналу пропорційний електричним втратам у приводному двигуні, тому його мінімізація дозволила також підвищити енергоефективність роботи транспортуючої машини.

ЛІТЕРАТУРА

1. Корнеєв С. В. Обґрунтування експлуатаційних параметрів і способів адаптації шахтних скребкових конвеєрів нового покоління: автореф. дис. на здоб. наук. ступ. доктора техн. наук: спец. 05.05.06 «Гірничі машини» / С. В. Корнеєв. – Д., 2007. – 35 с.
2. Долголенко А. А. Динамические усилия в замкнутых тяговых органах подъемно-транспортных машин / А.А Долголенко // Новая подъемно-транспортная техника. –1949. – С. 51–63.

3. Штокман И.Г. Динамика тяговых цепей рудничных конвейеров / И. Г. Штокман – М. : Машгиз, 1949. – 290 с.
4. Смирнов В. К. О динамическом расчете скребкового конвейера / В. К. Смирнов, В. П. Крот // Вопросы рудничного транспорта. – 1965. – № 9. – С. 91–104.
5. Кожевников С.Н. Динамика машин с упругими звеньями / С. Н. Кожевников. – Киев: изд-во Академии наук УССР, 1961. – 160 с.
6. Кожевников С.Н. Динамика нестационарных процессов в машинах / С. Н. Кожевников. – К.: Наукова думка, 1986. – 288 с.
7. Чугреев Л. И. Динамика конвейеров с цепным тяговым органом / Л. И. Чугреев – М.: Недра, 1976. – 162 с.
8. Ткаченко О.Ю. Оптимізація режиму руху скребкового конвеєра при транспортуванні сільськогосподарських вантажів: дисс кандидата техн. наук: 05.05.11 / Ольга Юріївна Ткаченко. – К., 2014. – 197 с.
9. Эльгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Э. Эльгольц – М. : Наука, 1969. – 424 с.
10. Корн Г. Справочник по высшей математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 832 с.