

УДК 621.867.2

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ РУХОМ СТІЧКОВОГО КОНВЕЄРА У ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ

Вячеслав Ловейкін, Юрій Ромасевич, Катерина Шалатовська, Петро Науменко

Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, Україна, e-mail romasevichyuriy@ukr.net

OPTIMAL CONTROL OF CONVEYOR BELT MOVEMENT IN TRANSIENT REGIMES

Vjacheslav Lovejkin, Yuriy Romasevich, Katerina Shalatovska, Petro Naumenko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Heroyiv Oborony st., 15, Kyiv, Ukraine, e-mail romasevichyuriy@ukr.net

АННОТАЦІЯ. З метою підвищення надійності та довговічності стрічкового конвеєра розраховано оптимальний режим його пуску. Оптимізаційна задача розв'язана для комплексного інтегрального критерію, який відображає декілька небажаних показників. Встановлено, що аналітично знайти розв'язок задачі неможливо, тому за допомогою методу колокацій знайдено наближений розв'язок задачі. Для встановлення ефективності реалізації оптимального керування на практиці виконано моделювання руху стрічкового конвеєра із врахуванням динамічної механічної характеристики асинхронного приводу. Порівняння прямого пуску стрічкового конвеєра із керованим оптимальним режимом дає змогу встановити значне покращення динамічних та енергетичних показників процесу.

Ключові слова: стрічковий транспортер, режим руху, оптимальне керування, асинхронний електропривод, моделювання.

АННОТАЦИЯ. С целью повышения надежности и долговечности ленточного конвейера рассчитан оптимальный режим его пуска. Оптимизационная задача решена для комплексного интегрального критерия, который отражает несколько нежелательных показателей. Установлено, что аналитически найти решение задачи невозможно, поэтому с помощью метода коллокаций найдено приближенное решение задачи. Для установления эффективности реализации оптимального управления на практике выполнено моделирование движения ленточного конвейера с учетом динамической механической характеристики асинхронного привода. Сравнение прямого пуска ленточного конвейера с управляемым оптимальным режимом позволяет установить значительное улучшение динамических и энергетических показателей процесса.

Ключевые слова: ленточный конвейер, режим движения, оптимальное управление, асинхронный электропривод, моделирование.

SUMMARY. Purpose. Increase reliability and durability of belt conveyor is the purpose of the work. **Methodology/approach.** Researches in the work are of analytical and numerical character. Method of collocation has been used for finding of approximation solution of the optimal control problem. Numerical integration of the mathematical model of a belt conveyor has been done. **Findings.** Approximate solution of the optimal control problem of conveyor belt movement in an acceleration mode has been found. To find out the impact of electrical drive to the efficiency of optimal control implementation the equations of belt conveyor motion supplemented by equations of induction motor. Numerical integration of a received generalized model of electromechanical system belt conveyor helped to carried out a comparative analysis of during direct start and optimal control of the conveyor. The analysis showed a significant improvement in energy and dynamic performance of process. **Research limitations/implications.** Results of work can be further useful at design and modification of the systems for transporting machines movement control. **Originality/value.** The work has scientific and practical interest because of improving energetic and dynamic characteristics of belt conveyor.

Key words: belt conveyor, mode of movement, optimal control, asynchronous electric drive, simulation.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Стрічкові конвеєри є найбільш поширеним типом транспортуючих машин безперервної дії. Однією з найпоширеніших причин виходу з ладу стрічкового конвеєра є значні динамічні навантаження, які виникають в стрічці. Вони призводять до розривів стрічки, виникнення локальних розтягів,

деформації та інших явищ, від яких подальша експлуатація стрічки є неможливою. Крім того, динамічні зусилля спричиняють додаткові навантаження у приводному механізмі транспортера та його металоконструкції.

Важливою задачею, яка останнім часом збільшує своє значення, є забезпечення енергетичної ефективності роботи стрічко-

вих конвеєрів. Це викликано тим, що вартість електричної енергії постійно зростає. Тому зменшення енерговтрат при експлуатації стрічкового транспортера є бажаним.

Отже, підвищення надійності роботи стрічкового транспортера та покращення її енергетичних характеристик визначає мету роботи.

ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ

У роботі [1] розглянуті питання комп'ютерного моделювання процесів статичного і динамічного навантаження конвеєрів. Досліджені особливості застосування сучасних програмних продуктів розрахунку несучих конструкцій конвеєрів.

Об'єктом дослідження [2] є процес транспортування гірничої маси стрічковим конвеєром при інтенсивному вуглевидобутку. Встановлено суттєву нерівномірність вантажопотоку, маси вантажу, що транспортується, та їх вплив на величину і характер нерівномірності завантаженості двигунів приводу, а також питомі енерговитрати на транспортування і ресурс конвеєра.

У [3] наведено результати дослідження динаміки приводу конвеєра зі змінним навантаженням, що дало змогу визначити характер зміни тиску в напірних гідролініях першого гідромотора та другого гідромотора після спрацьовування пристрою керування, витрати робочої рідини першого і другого гідромоторів, частоти обертання вихідної ланки, а також встановити першочерговий вплив на час перехідного процесу пуску та спрацьовування пристрою керування під час його «відкриття» й «закриття», крутильної жорсткості механічної частини, об'єму напірної порожнини гідросистеми, моменту інерції та характеру зміни навантаження.

У роботі [4] встановлено, що нерівномірний натяг стрічки збільшує поперечні деформації країв стрічки конвеєра у 1,5 рази. Залежно від навантажень ця різниця може досягати 2-х разів і більше. Збільшення поперечної деформації веде не тільки до можливості виникнення просипу вантажу між стрічками крутопохилого конвеєра, а й до

збільшення згинальних напружень на краях стрічки, які необхідно компенсувати збільшенням натягу.

У роботі [5] досліджено фактори, які впливають на зниження строку експлуатації стрічкових конвеєрів. Встановлено, що сприятливим для збільшення фактичного ресурсу стрічкових конвеєрів буде наступний комплекс заходів: впровадження стратегії технічного обслуговування по фактичному стану об'єкта; контроль за дотриманням технологічної дисципліни; дотримання вимог до кваліфікації обслуговуючого персоналу; раціональна організація виробництва за принципами логістики.

У статті [6] розроблено математичну модель взаємодії вантажу з роликоопорами стрічкового конвеєра різної конструкції. Визначено коефіцієнт динамічності при взаємодії крупних шматків вантажу з роликоопорами. Проведено аналіз залежності коефіцієнта динамічності від швидкості стрічки, параметрів роликоопор, конвеєра та вантажу.

У серії праць [7-9] отримані результати, які показують, що є можливість побудови комбінованої імітаційної моделі конвеєрної установки як єдиного технологічного комплексу в складі електроприводу і механічної частини самого конвеєра. Дослідження можливих технологічних режимів роботи конвеєрної установки підтвердили ефективність і доцільність застосування частотно-регульованого асинхронного електроприводу, що дозволяє забезпечити високі динамічні показники, а також стабілізувати навантаження на стрічці при зниженні енергоспоживання залежно від вантажопотоку і поточної продуктивності.

Питання оптимального керування рухом стрічкового конвеєра практично не досліджувались.

МЕТА РОБОТИ

Мета роботи полягає в оптимізації керування рухом стрічкового конвеєра та оцінці якості його практичної реалізації.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для проведення оптимізації режиму пуску стрічкового конвеєра використаємо динамічну модель, яка зображена на рис. 1.

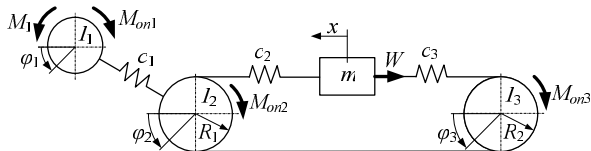


Рис. 1. Динамічна схема стрічкового конвеєра

Fig. 1. Dynamic scheme of belt conveyor

Як узагальнені координати динамічної моделі прийняті: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – кутові координати переміщення ротора двигуна, привідного і натяжного барабанів конвеєра відповідно; x – координата центру мас робочої гілки конвеєра. На рис. 1 прийняті наступні позначення: c_1 – коефіцієнт жорсткості привідного механізму, (клинопасової передачі), зведений до осі повороту привідного барабана; c_2 та c_3 – зведені коефіцієнти жорсткості робочої гілки конвеєра до зведеної маси m та після неї; R_1 і R_2 – радіуси привідного та натяжного барабанів відповідно; $M_1, M_{on1}, M_{on2}, M_{on3}$ – зведені до привідного барабана рушійний момент двигуна, момент сил тертя на валу двигуна, моменти сил тертя на привідному і натяжному барабанах відповідно; W – сила опору переміщенню робочої гілки конвеєра; m – зведена до поступального руху маса робочої гілки конвеєра і транспортованого вантажу; I_1, I_2, I_3 – зведені моменти інерції приводу, привідного і натяжного барабанів відповідно.

Рух зведених мас системи, яка показана на рис. 1, описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\varphi}_1 = M_1 - c_1 (\varphi_1 - \varphi_2) - M_{on1}; \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 = c_1 (\varphi_1 - \varphi_2) - c_2 R_1 (\varphi_2 R_1 - x) - M_{on2}; \\ m \ddot{x} = c_2 (\varphi_2 R_1 - x) - c_3 (x - \varphi_3 R_2) - W; \\ I_3 \ddot{\varphi}_3 = c_3 R_2 (x - \varphi_3 R_2) - M_{on3}. \end{cases} \quad (1)$$

Точка над символом означає диференціювання за часом.

Виконаємо постановку задачі оптимального керування рухом стрічкового конвеєра

під час його розгону. Будемо вимагати мінімізації інтегрального функціоналу, який відображає декілька небажаних складових:

$$I = \left(\frac{1}{T} \int_0^T (c_1 (\varphi_1 - \varphi_2))^2 \delta_1 + (c_2 (\varphi_2 R_1 - x))^2 \delta_2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де T – тривалість розгону транспортуючої машини; δ_1, δ_2 – постійні коефіцієнти, які визначаються із наступних співвідношень:

$$\begin{cases} \delta_1 = \frac{k_1}{\tilde{M}_{ном}^2}, k_1 \in [0; 1]; \\ \delta_2 = \frac{(1 - k_1)}{W}, \end{cases} \quad (3)$$

де k_1 – ваговий коефіцієнт, який визначає важливість зменшення зусилля у клинопасовій передачі приводу конвеєра; $\tilde{M}_{ном}$ – зведений до привідного барабана номінальний крутний моменту двигуна. Використання виразів (3) дає змогу привести підінтегральний вираз критерію (2) до безрозмірного вигляду.

Мінімізація виразу при коефіцієнті δ_1 у критерії (3) дозволить зменшити динамічні навантаження у передавальних механізмах конвеєра (клинопасовій передачі) та у стрічці відповідно.

Задамо умови для руху зосереджених мас динамічної моделі конвеєра:

$$\begin{cases} \varphi_1(0) = \varphi_2(0) = x(0) = \varphi_3(0) = 0; \\ \dot{\varphi}_1(0) = \dot{\varphi}_2(0) = \dot{x}(0) = \dot{\varphi}_3(0) = 0; \\ \varphi_3(T) = \frac{\omega_y T}{2}; \\ x(T) - \varphi_3(T) R_2 = \frac{M_{on3}}{c_3 R_2}; \\ \varphi_2(T) R_1 - x(T) = \frac{M_{on3}}{c_3 R_2} + \frac{W}{c_2}; \\ \varphi_1(T) - \varphi_2(T) = \frac{M_{on2}}{c_1} + \frac{W R_1}{c_2} + \frac{M_{on3} R_1}{c_3 R_2}; \\ \dot{\varphi}_1(T) = \dot{\varphi}_2(T) = \dot{\varphi}_3(T) = \omega_y; \\ \dot{x}(T) = \frac{\omega_y}{R_1}, \end{cases} \quad (4)$$

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 $\omega_y R_1$.

Відносне положення елементів системи відповідає умові деформації стрічки і пружної муфти привідного механізму в результаті навантаження їх зусиллям W та моментами M_{on2} і M_{on3} .

З урахуванням системи рівнянь (1) крайові умови (4) можна переписати відносно функції φ_3 та її вищих похідних за часом наступним чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_3(0) = \dot{\varphi}_3(0) = \ddot{\varphi}_3(0) = \overset{IV}{\ddot{\varphi}_3(0)} = \overset{IV}{\varphi_3(0)} = 0; \\ \overset{V}{\varphi_3(0)} = \overset{VI}{\varphi_3(0)} = \overset{VII}{\varphi_3(0)} = 0; \\ \varphi_3(T) = \frac{\omega_y T}{2}; \quad \dot{\varphi}_3(T) = \omega_y; \\ \overset{IV}{\ddot{\varphi}_3(T)} = \overset{IV}{\ddot{\varphi}_3(T)} = \overset{V}{\varphi_3(T)} = \overset{V}{\varphi_3(T)} = 0; \\ \overset{VI}{\varphi_3(T)} = \overset{VII}{\varphi_3(T)} = 0. \end{array} \right. \quad (5)$$

Для мінімізації критерію (2) використаємо варіаційне числення [10]. Для цього запишемо необхідну умову мінімуму критерію (2) – рівняння Ейлера-Пуассона:

$$L(\varphi_3) = \sum_{i=2}^6 A_i \frac{d^{2i} \varphi_3}{dt^{2i}} = 0, \quad (6)$$

де L – лінійний оператор, який діє на функцію φ_3 ; A_i – коефіцієнти, які можна виразити через параметри стрічкового конвеєра (через об'єм виразів вони тут не наведені). Для розв'язування однорідного диференціального рівняння (6) складемо відповідне характеристичне рівняння:

$$\sum_{i=2}^6 A_i p^{2i} = 0, \quad (7)$$

яке заміною $p^2 = s$ зводиться до наступного:

$$\sum_{i=2}^6 A_i s^i = 0. \quad (8)$$

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

Крім того, диференціальне рівняння (6) – дванадцятого порядку. Тому його розв'язок

буде містити дванадцять постійних інтегрування. Для їх визначення необхідно використати дванадцять крайових умов. Однак, кількість крайових умов (5) дорівнює шістнадцяти. Тому деякі з крайових умов (5) не будуть забезпечені. У практичному плані це може викликати залишкові коливання елементів стрічкового конвеєра, що є недопустимим. Ці коливання супроводжуються додатковими динамічними навантаженнями і є небажаними оскільки вони викличуть зниження довговічності роботи стрічкового конвеєра.

Отже, знайти аналітичний розв'язок оптимізаційної задачі не вдається.

Для того, щоб отримати наближений розв'язок даної задачі використаємо метод колокацій [11-14]. У відповідності до цього методу сформуємо базисну функцію, на якій будемо шукати наближений розв'язок варіаційної задачі (1)-(5).

Базисна функція, на якій шукається наближений розв'язок задачі (1)-(5), повинна бути розв'язком крайової задачі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overset{XVI+n}{\varphi_3} = 0, \\ \varphi_3(0) = \dot{\varphi}_3(0) = \ddot{\varphi}_3(0) = \overset{IV}{\ddot{\varphi}_3(0)} = 0 \\ \overset{IV}{\varphi_3(0)} = 0 = \overset{V}{\varphi_3(0)} = \overset{VI}{\varphi_3(0)} = \overset{VII}{\varphi_3(0)} = 0; \\ \varphi_3(T) = \frac{\omega_y T}{2}; \quad \dot{\varphi}_3(T) = \omega_y; \\ \varphi_3\left(\frac{T k}{n+1}\right) = q_k, \quad k = \overline{(1, n)}; \\ \overset{IV}{\ddot{\varphi}_3(T)} = \overset{IV}{\ddot{\varphi}_3(T)} = \overset{V}{\varphi_3(T)} = \overset{V}{\varphi_3(T)} = 0; \\ \overset{VI}{\varphi_3(T)} = \overset{VII}{\varphi_3(T)} = 0. \end{array} \right. \quad (9)$$

де n – кількість точок колокації; q_k – невідомі параметри.

Розв'язок крайової задачі (9) для $n=5$ має значний об'єм і тому тут не наводиться. Надалі, знаходячи вищі похідні функції за часом та підставляючи їх у вираз (9), сформуємо нев'язку розв'язку рівняння Ейлера-Пуассона. У відповідності до методу колокацій будемо підтримувати рівності сформованої нев'язки рівняння Ейлера-

Пуассона у моменти часу $\frac{Tk}{n+1}$. Ця вимога математично записується у вигляді

$$L(\varphi_3) \Big|_{t=\frac{Tk}{n+1}} = 0, \quad (10)$$

яка має значний об'єм і тут не наводиться. Для параметрів стрічкового транспортера знайдено чисельний розв'язок системи рівнянь (3) – (9) відносно невідомих параметрів q_k .

Для оцінки якості реалізації знайденого наближеного розв'язку оптимізаційної за дачі доповнимо математичну модель (1) рівняннями, які описують динамічну механічну характеристику асинхронного приводу стрічкового транспортера. Результати чисельного інтегрування узагальненої математичної моделі електромеханічної системи стрічкового конвеєра при реалізації оптимального керування за допомогою зміни частоти і напруги живлення двигуна наведено на рис. 2

Аналіз графіків, які наведені на рис. 2, показує, що рух системи є плавним, без різких ривків. Це приведе до підвищення надійності та довговічності стрічки, електродвигуна, клинопасової передачі.

Для оцінки пуску конвеєра за оптимальним законом розрахуємо значення оціночних показників та порівняємо їх із тими показниками, які розраховані для некерованого (прямого пуску стрічкового конвеєра). Результати розрахунків занесемо у табл. 1.

Графіки (рис. 2) та чисельні значення оціночних показників, що наведені у табл.1, вказують на значне зниження динамічних небажаних навантажень у елементах конвеєра. Причина такого різкого зниження цих показників полягає у оптимальному характері зростання напруги та частоти живлення привідного двигуна стрічкового конвеєра (саме так реалізується оптимальне керування рухом конвеєра на практиці).

Таблиця 1. Значення оціночних показників для режиму оптимального пуску стрічкового конвеєра

Table 1. Values of performance indicators for the optimal mode start-ribbon-term pipeline

Найменування показника	Величина	Зменшення у порівнянні з прямим пуском
Коефіцієнт динамічності клинопасової передачі	4,5 5	у 1,83 рази
Коефіцієнт динамічності стрічки у місці її набігання на привідний барабан	4,5 9	у 1,55 рази
Кратність максимального струму двигуна	5,1 9	на 5,2 %
Кратність максимальної потужності двигуна	1,1 5	у 4,76 рази
Кратність максимального моменту двигуна	4,1 3	у 2,44 рази
Середньоінтегральне значення моменту приводу, Нм	596	у 1,62 рази
Середньоінтегральне значення зусилля у клинопасовій передачі, Н	158	у 1,54 рази

Значне зменшення максимальної потужності двигуна та його максимального моменту взаємопов'язані. Це досягається тим, що плавне наростання напруги і частоти живлення електроприводу конвеєра викликає значно менші (у порівнянні з прямим пуском) вільні струми. Саме вони і викликають значні електромагнітні моменти, які і є причиною виникнення динамічних навантажень у елементах конвеєра.

ВИСНОВКИ

1. Виконано постановку задачі оптимального керування рухом стрічкового конвеєра протягом його пуску. Обрано критерій оптимізації, який комплексно відображає небажані показники руху системи.
2. Встановлено, що розв'язок поставленої задачі не може бути знайдено за допомогою варіаційного числення. За допомогою методу коллокацій знайдено наближений розв'язок задачі.

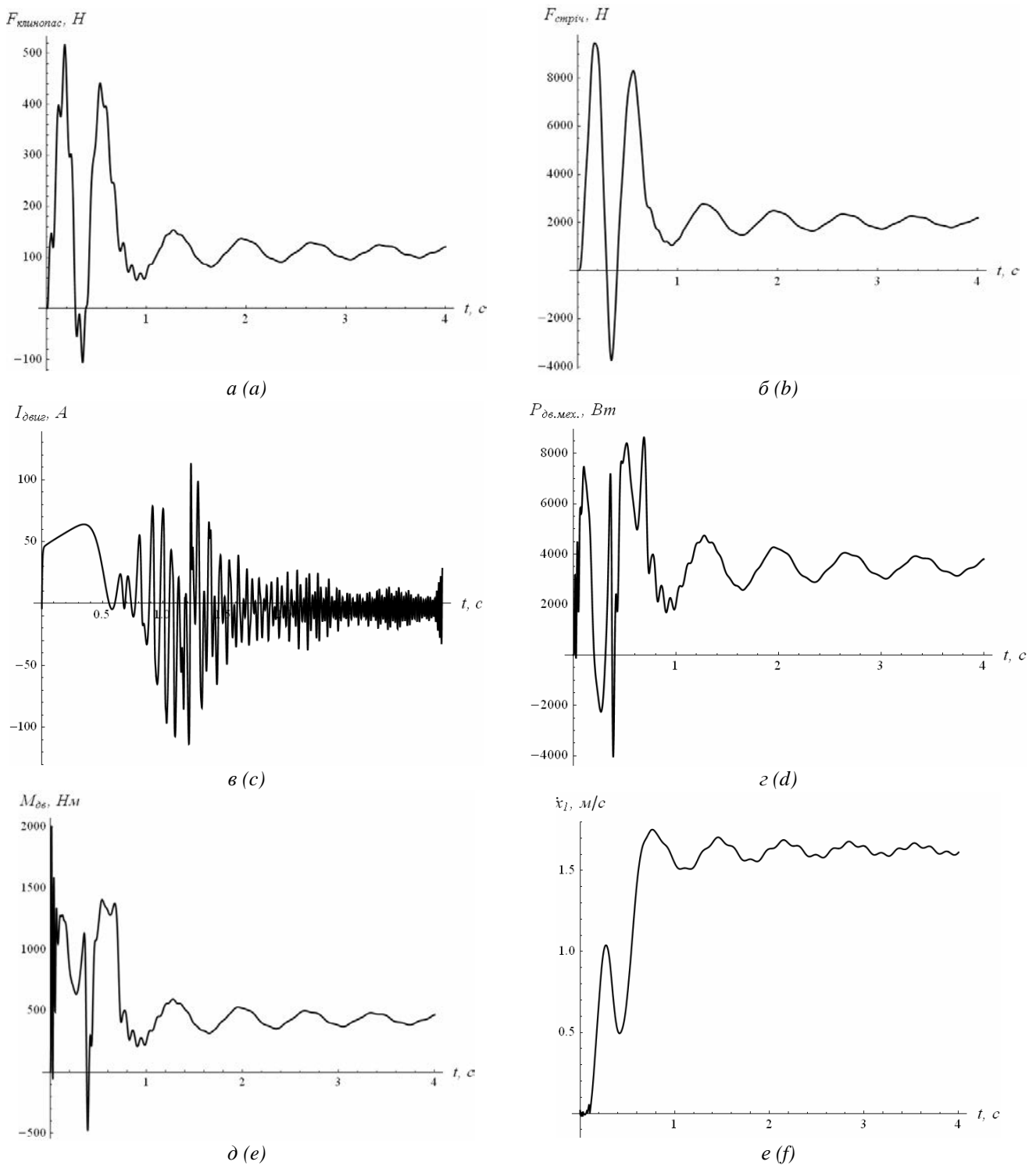


Рис. 2. Графіки пружного зусилля у клинопасовій передачі (а), пружного зусилля у стрічці (б), струму двигуна (в), споживаної потужності двигуна (г), електромагнітного моменту двигуна (д) швидкості руху стрічки (е)

Fig. 2. Schedules of change of effort in belt transmission (a), the elastic force in the belt (b), motor current (c), the power consumption of the engine (d), the electromagnetic torque of the engine (e) the speed of the belt (f)

3. Шляхом доповнення системи рівнянь, які описують механічний рух стрічково-го конвеєра, рівняннями, що описують асинхронний електропривід, отримано

узагальнену математичну модель системи.

4. Чисельний розв'язок отриманої системи нелінійних диференціальних рівнянь по-

казав значне покращення динамічних та енергетичних показників роботи конвеєра.

5. Результати роботи можуть в подальшому бути корисними для розробки нових та модернізації існуючих систем керування рухом транспортуючих машин.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Ворона О.І.* Комп'ютерне моделювання та розрахунок несучих конструкцій конвеєрів / О.І. Ворона, В.М. Гелетій, Я.М. Новіцький // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2009. – № 641. – С. 17-20.
2. *Семенченко А.К.* Влияние неравномерности загрузки ленточного конвейера на нагрузку приводных двигателей и энергозатраты на транспортирование / А.К. Семенченко, Н.И. Стадник, П.В. Белицкий // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2016. – 4/1 (82) – С. 42-51.
3. *Поліщук Л.К.* Дослідження динаміки приводу конвеєра зі змінним навантаженням / Л.К. Поліщук, О.О. Адлер // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 3 (55). – С. 35-37.
4. *Шейко Е.Е.* Обоснование продольных деформаций конвейерной ленты грузонесущего контура крутонаклонного конвейера с прижимной лентой / Е.Е. Шейко, А.А. Касаткий // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – №1. – С. 46-49.
5. *Кропотов Ю.И.* Основные причины снижения срока эксплуатации ленточных конвейеров // Ю.И. Кропотов, Е.М. Жуков, И.А. Лугинин, С.И. Полошков // Молодой учёный. – 2015 – № 23 (103) – С. 172-175.
6. *Монастырский В.Ф.* Определение динамических усилий при взаимодействии грузопотока с роlikоопорами ленточных конвейеров угольных шахт / В.Ф. Монастырский, Р.В. Кирия, А.Н. Смирнов, Т.Ф. Мищенко // Сборник научных трудов "Геотехническая механика", 2012 – Выпуск 104. – С. 146-159.
7. *Чермалых В.М.* Исследование динамики и энергетических характеристик ленточных конвейеров с регулируемым электроприводом / В.М. Чермалых, А.В. Чермалых, И.Я. Майданский // Вісник НТУ «ХП», 2015 – 180. no 12 (1121). – С. 180-184.

8. *Чермалых А.В.* Исследование технологических режимов работы конвейерной установки с частотно-регулируемым электроприводом / А.В. Чермалых, В.Н. Пермяков, И.Я. Майданский // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 1/(3). – С. 68-70.
9. *Чермалых А.В.* Моделирование технологических режимов работы стрічкових конвеєрів / А.В. Чермалых, В.Н. Пермяков, А.С. Иржавский // Энергетика. Экология. Людина. Наукові праці НТУУ «КП», ІЕЕ. – Київ: НТУУ «КП», ІЕЕ, 2015. – С. 116-122.
10. *Цлаф Л.Я.* Вариационное исчисление и интегральные уравнения / Л.Я. Цлаф. – М.: Наука, 1970. – 191 с.
11. *Корн Г.* Справочник по высшей математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 832 с.
12. *Човнюк Ю.* Дискретне моделювання і розробка вдосконалених режимів керування електромеханічною системою мостового крана / Ю. Човнюк, М. Діктерук., С. Комацька // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – Київ, 2016. – №88. – С. 28-39.
13. *Човнюк Ю.* Новий метод аналізу перехідних процесів та нелінійних хвилеутворень у протяжних гірничих транспортних машинах / Ю. Човнюк, М. Діктерук, К. Почка // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – Київ, 2014. – №84. – С. 33-38.
14. *Ловейкін В.* Обґрунтування крайових ривків оптимального режиму реверсування роликкової формульованої установки за прискоренням четвертого порядку / В. Ловейкін, К. Почка // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – Київ, 2016. – №88. – С. 5-20.

REFERENCES

1. *Vorona O.I., Heletii V.M., Novitskyi Ia.M., 2009.* Komp'uterne modeliuvannia ta rozrakhunok nesuchykh konstruksii konveieriv [Computer modeling and calculation of supporting structures conveyors]. Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politehnika" [Proceedings of the National University "Lviv Polytechnic"], Lviv, No. 641, 17-20.
2. *Semenchenko A.K., Stadnyk N.Y., Belytskyi P.V., 2016.* Vlyianyе neravnomernosty

- zahruzhenosty lentoch-noho konveiera na nahruzhenost pryvo-dnykh dvyhateleii y enerhozatraty na transportyrovanye [Influence of uneven loading of the conveyor belt on the load of the drive motors and energy consumption for transportation]. *Vostochno-evropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohyi* [Eastern European Journal of Advanced Technology]. Publ. no. 4/1, 42-51.
3. *Polishchuk L.K., Adler O.O., 2009.* Doslidzhennia dynamiky pryvoda konveiera zi zminnym navantazhenniam [The study of the dynamics of the conveyor drive with variable load]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh* [The vibrations in engineering and technology], Publ. no. № 3 (55), 35-37.
 4. *Sheiko E.E., Kasatkyi A.A., 2009* Obosnovanye prodolnykh deformatsyi konveiernoi lenty hruzonesushcheho kontura krutonaklonnoho konveiera s pryzhymnoi lentoi [Justification of longitudinal deformations of the conveyor belt of the load-carrying contour of a steeply inclined conveyor with a clamping belt]. *Hornoe oborudovanye y elektromekhaniky* [Mining equipment and electromechanics], Publ. no. №1, 46-49.
 5. *Kropotov Iu.Y., Zhukov E.M., Luhy-nyn Y.A., Poloshkov S.Y., 2015.* Osnovno prychny snyzhenia sroka ekspluatatsy lentochnykh konveierov [The main reasons for reducing the lifetime of belt conveyors] *Molodoi uchenyi* [The young scientist]. Publ. no. 23 (103), 172-175.
 6. *Monastyrskyi V.F., Kyryia R.V., Smyrnov A.N., Myshchenko T.F., 2012.* Opreddenye dynamycheskykh usylii pry vzaymodeistvyy hruzopotoka s rolykoo-po-ramy lentochnykh konveierov uholnykh shakht [Determination of dynamic forces in the interaction of the cargo flow with the roller bearings of the belt conveyors of coal mines]. *Sbornyk nauchnykh trudov "Heotekhnicheskaiia mekhanyka"* [Collection of scientific works "Geotechnical mechanics"]. Publ. no. 104, 146-159.
 7. *Chermalykh V.M., Chermalykh A.V., Maidanskyi Y.Ia., 2015.* Yssledovanye dynamyky y enerhetycheskykh kharakterystyk lentochnykh konveierov s rehulyruemym elektropryvodom [Investigation of the dynamics and energy characteristics of conveyor belts with an adjustable electric drive] *Visnyk NTU «KhPI»* [Vestnik NTU "KPI"], Publ. no. 180. no 12 (1121), 180-184.
 8. *Chermalykh A.V., Permiakov V.N., Maidanskyi Y.Ia., 2015.* Yssledovanye tekhnolohycheskykh rezhymov raboty konveiernoi ustanovky s chastotno-rehulyruemym elektropryvodom [Investigation of technological modes of operation of a conveyor system with a frequency-controlled electric drive] *Problemy enerhoresursozberezhennia v elektrotekhnichnykh systemakh. Nauka, osvita i praktyka* [Problems of energy saving in electrical systems. Science. Education and Practice]. Publ. no. 1/(3), 68-70.
 9. *Chermalykh A.V., Permiakov V.N., Yr-zhavskyi A.S., 2015.* Modeliuvannia tekhnolohichnykh rezhymiv roboty strichkovykh konveieriv [Modeling of technological modes of belt conveyors]. *Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna. Naukovi pratsi NTUU «KPI».* [Energy. Ecology. Man. Proceedings NTU "KPI"], Publ. no. 12, 116-122.
 10. *Tslaf L.Ia., 1970* Varyatsyonnoe yschyslenye y yntehrnlnye uravneniia [Variational calculus and integral equations]. M.: Nauka, 191.
 11. *Korn H., Korn T., 1973.* *Spravochnyk po vysshiei matematyke dlia nauchnykh rabotnykov y ynzhenerv* [A handbook on higher mathematics for scientists and engineers]. M.: Nauka, 832.
 12. *Chovnyuk Yu., Dykeruk M., Komotskaya S., 2016.* [Discrete design and development of improved control mode electromechanical system for overhead cranes]. *Girnychy, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini* [Mining, construction, road and reclamation machines], No. 88, 28-39. – (in Ukrainian).
 13. *Chovnyuk Yu., Dykeruk M., Pochka K., 2014.* [New method of the analysis of transients and nonlinear wave formations in extended mountain transport cars]. *Girnychy, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini* [Mining, construction, road and reclamation machines], No. 84, 33-38. – (in Ukrainian).
 14. *Lovejkin V., Pochka K., 2016.* [The optimum mode reversal of roller forming installation on acceleration is fourth order a justification of boundary breakthroughs]. *Girnychy, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini* [Mining, construction, road and reclamation machines], No. 88, 5-20. – (in Ukrainian).