

УДК 621.87

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПУСКУ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА ЗА КОМПЛЕКСНИМ КРИТЕРІЄМ

В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, Р. А. Кульпін

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Кореспонденція авторів: lovvs@ukr.net.

Історія статті: отримано – квітень 2019, акцептовано – червень 2019.

Бібл. 13, рис. 2, табл. 1.

Анотація. У роботі проведено обґрунтування узагальненого критерію оптимізації керування рухом стрічкового конвеєра під час його пуску. Критерій представлений у вигляді суми інтегральної та термінальної згорток одиничних динамічних та енергетичних показників роботи конвеєра. Для проведення досліджень використано математичну модель електромеханічної системи стрічкового конвеєра, яка представлена системою нелінійних звичайних диференціальних рівнянь. Дана модель має механічну та електричну складові. Перша представлена рівняннями, які описують рух зведених мас стрічки, вантажу, елементів приводу конвеєра, а друга – рівняннями, які описують електродинамічні процеси асинхронного частотно-керованого електроприводу конвеєра.

Для проведення досліджень математична модель системи представлена у вигляді MISO-системи. Це дало змогу використати модифікований метаевристичний метод рою частинок для знаходження мінімуму оптимізаційного критерію. Аргументами оптимізаційної функції виступали тривалість розгону системи, початкова напруга живлення приводу конвеєра та профіль кривої наростання частоти напруги живлення приводу.

Таким чином, у роботі отримано оптимальні значення налаштувань частотно-керованого приводу стрічкового конвеєра. Розроблений підхід є універсальним і його можна використати також для мінімізації інших небажаних критеріїв.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, динамічні навантаження, математична модель, частотно-керований привод, критерій оптимізації.

Постановка проблеми

Під час роботи стрічкових конвеєрів мають місце значні динамічні навантаження, які діють на елементи тягового органа і приводного механізму. Такі навантаження спричиняють виникнення коливальних процесів зі значною зміною швидкості та прискорення під час пуску, що призводить до передчасного руйнування і зниження надійності роботи конструкції конвеєра.

У сучасних стрічкових конвеєрах для зменшення динамічних навантажень використовують частотно-керовані приводи. Вони мають значну кількість налаштувань, змінюючи які можна впливати на енергоефективність перехідних режимів руху конвеєра. Найбільш значимими із цих налаштувань є: профіль кривої наростання та спадання частоти напруги живлення приводу, початкова напруга живлення двигуна та тривалість наростання і спадання частоти напруги живлення.

Визначення оптимальних значень налаштувань призводить до необхідності виконання досить складних розрахунків. Це, у свою чергу, не дає змоги знайти глобальний мінімум критерію оптимізації. У цьому випадку ресурси щодо покращення роботи конвеєра будуть використані не в повному обсязі. Тому використання метаевристичних методів для проведення оптимізації режимів руху конвеєра з метою підвищення ефективності його роботи є важливою науково-прикладною задачею.

Аналіз останніх досліджень

В сучасних наукових дослідженнях відображено значний досвід проектування та експлуатації стрічкових конвеєрів [1]. Значна увага приділена дослідженню динамічних навантажень під час перехідних режимів руху стрічкового конвеєра [2-5]. У роботі [6] наведено матеріал для побудови математичних моделей руху стрічкового конвеєра для виконання динамічних розрахунків. У працях [7, 8] викладено матеріал стосовно моніторингу зносу робочих органів стрічкового конвеєра, що дозволяє вчасно замінювати елементи конструкції, продовжуючи строк експлуатації транспортуючої машини. Однак ці дослідження не вирішують проблем зниження динамічних навантажень.

Основною причиною виходу з ладу сучасних стрічкових конвеєрів є розрив стрічки, знос елементів приводу та конструкції через значні динамічні навантаження протягом перехідних режимів руху. Дану проблему можна вирішити шляхом оптимального налаштування частотного перетворювача. Дійсно, стрічкові конвеєри провідних виробників Європи та України таких як FPUH Michał

Michalak (Польща), ТОВ «ВІПЛАСТ» (Україна), Dornier Mfg. Corp. (Чехія) обладнують частотними перетворювачами [11-13]. Однак, в існуючих наукових працях питанню оптимального (раціонального) налаштування частотно-керованих приводів стрічкових конвеєрів приділено мало уваги.

Мета досліджень

Мета дослідження – підвищення пускових характеристик стрічкового конвеєра завдяки зменшенню енерговитрат та динамічних навантажень, що діють на тягові елементи і привод.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати відомі науково-прикладні дослідження в області виконання динамічних розрахунків стрічкових конвеєрів та оптимізації перехідних режимів їх руху;
- на основі обраної динамічної моделі руху стрічкового конвеєра розробити його математичну модель із врахуванням електромагнітних процесів у приводному механізмі;
- розробити комплексний критерій оптимізації руху стрічкового конвеєра;
- розв'язати задачу оптимізації пуску стрічкового конвеєра та на основі отриманих результатів запропонувати рекомендації стосовно налаштувань частотно-керованого приводу конвеєра.

Результати досліджень

Для проведення досліджень взято параметри стаціонарного стрічкового транспортера КЛ 100-45-4-500-ІП. Динамічна модель стрічкового транспортера представлена на рис. 1. Всі елементи стрічкового конвеєра є абсолютно твердими тілами, крім елементів

передавального механізму і тягового органу, які володіють пружними та дисипативними властивостями. Корпус приводу конвеєра й вали закріплено абсолютно жорстко [9]. На рис.1 прийняті такі позначення: M_{np} – зведений момент приводу; M_{on1} та M_{on2} – зведені моменти опору приводного та натяжного барабанів відповідно; c_{np} – зведений коефіцієнт крутильної жорсткості приводу; b_{np} – зведений коефіцієнт дисипації приводу; $R_{\delta.n}$ та $R_{\delta.n}$ – радіуси приводного та натяжного барабанів відповідно; J_n , $J_{\delta.n}$, $J_{\delta.n}$ – зведені моменти інерції приводу, приводного та натяжного барабанів відповідно; m_{pi} – i -та зведена маса робочої гілки транспортера із вантажем ($i = \overline{1, n}$); m_{xj} – j -та зведена маса холостої гілки транспортера ($j = \overline{1, k}$) n – кількість зведених мас робочої гілки транспортера; k – кількість зведених мас холостої гілки транспортера; c_{pi} та b_{pi} – i -ті зведені коефіцієнти жорсткості та дисипації робочої гілки транспортера відповідно; c_{xj} та b_{xj} – j -ті зведені коефіцієнти жорсткості та дисипації холостої гілки транспортера відповідно; W_{pi} та W_{xj} – i -та та j -та зведені сили тертя від обертання підтримуючих роликів (сили W_{pi} та W_{xj} прикладені не до всіх приведених мас, а лише до тих, які взаємодіють з підтримуючими роликami).

По суті, модель, яка зображена на рис. 1, представляє собою систему зведених мас, які поєднані пружно-в'язками зв'язками. Збільшення кількості мас у моделі системи дозволить наблизити її розрахунки до тих, які проведені із використанням моделі із розподіленими параметрами. У розрахунках, які виконанні у рамках даного дослідження, прийнято $n=20$ і $k=5$. Значимо, що такі значення не призводять до значних похибок у розрахунках динамічних та енергетичних процесів стрічкових конвеєрів стрічкового типу. Це підтверджується результатами попередніх розрахунків [9].

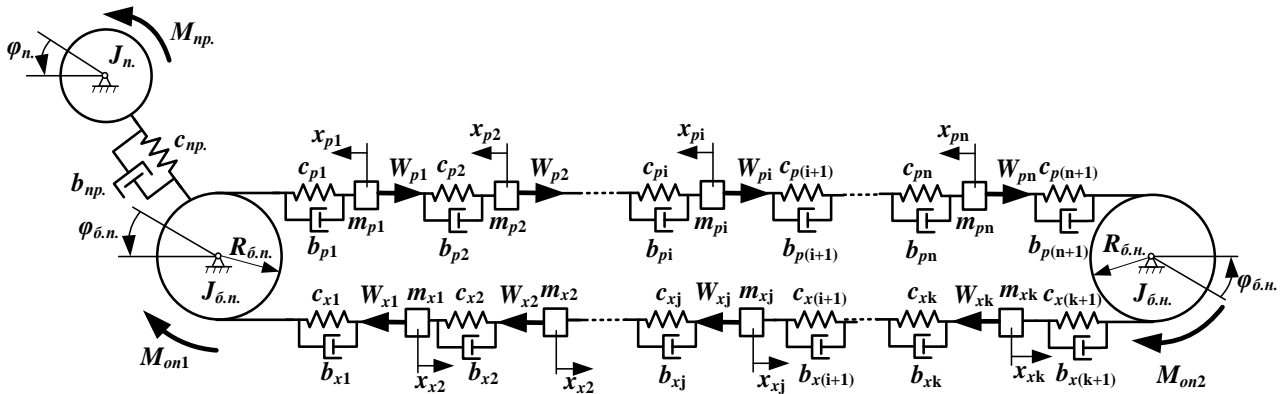


Рис. 1. Динамічна модель стрічкового конвеєра.

Fig. 1. Dynamic model of belt conveyor.

Моделі, яка показана на рис. 1, відповідає система неоднорідних звичайних диференціальних рівнянь другого порядку (1) (математична модель руху стрічкового транспортера), що описує рух зведених мас динамічної моделі конвеєра [9].

Для визначення електромагнітного моменту приводу конвеєра скористаємося рівняннями узагальненої асинхронної електричної машини. Для цього використаємо представлення диференціальних рівнянь асинхронного двигуна (2), який створює

рушійний момент системи, у нерухомій системі координат.

$$\begin{aligned}
 & M_{np} = \ddot{\varphi}_{np} J_{np} + c_{np} (\varphi_{np} - \varphi_{\delta,n}) + \\
 & + b_{np} (\dot{\varphi}_{np} - \dot{\varphi}_{\delta,n}); \\
 & c_{np} (\varphi_{np} - \varphi_{\delta,n}) + b_{np} (\dot{\varphi}_{np} - \dot{\varphi}_{\delta,n}) = \\
 & = \ddot{\varphi}_{\delta,n} J_{\delta,n} + M_{\delta,n,1} + c_{p1} (\varphi_{\delta,n} R_{\delta,n} - x_{p1}) + \\
 & + b_{p1} (\dot{\varphi}_{\delta,n} R_{\delta,n} - \dot{x}_{p1}) + c_{x1} (\varphi_{\delta,n} R_{\delta,n} - x_{x1}) + \\
 & + b_{x1} (\dot{\varphi}_{\delta,n} R_{\delta,n} - \dot{x}_{x1}); \\
 & c_{p1} (\varphi_{\delta,n} R_{\delta,n} - x_{p1}) + b_{p1} (\dot{\varphi}_{\delta,n} R_{\delta,n} - \dot{x}_{p1}) = \\
 & = m_{p1} \ddot{x}_{p1} + W_{p1} + c_{p2} (x_{p1} - x_{p2}) + b_{p1} \times \\
 & \times (\dot{x}_{p1} - \dot{x}_{p2}); \\
 & \dots \dots \dots \\
 & c_{pi} (x_{p(i-1)} - x_{pi}) + b_{pi} (\dot{x}_{p(i-1)} - \dot{x}_{pi}) = \\
 & = m_{pi} \ddot{x}_{pi} + W_{pi} + c_{p(i+1)} (x_{pi} - x_{p(i+1)}) + \\
 & + b_{p(i+1)} (\dot{x}_{pi} - \dot{x}_{p(i+1)}); \\
 & \dots \dots \dots \\
 & c_{pn} (x_{p(n-1)} - x_{pn}) + b_{pn} (\dot{x}_{p(n-1)} - \dot{x}_{pn}) = \\
 & = m_{pn} \ddot{x}_{pn} + W_{pn} + c_{p(n+1)} (x_{pn} - \varphi_{\delta,n} R_{\delta,n}) + \\
 & + b_{p(n+1)} (\dot{x}_{pn} - \dot{\varphi}_{\delta,n} R_{\delta,n}); \\
 & R_{\delta,n} (c_{p(n+1)} (x_{pn} - \varphi_{\delta,n} R_{\delta,n}) + b_{p(n+1)} \times \\
 & \times (\dot{x}_{pn} - \dot{\varphi}_{\delta,n} R_{\delta,n})) = c_{x(k+1)} (\varphi_{\delta,n} R_{\delta,n} - \\
 & - x_{x(k+1)}) + b_{x(k+1)} (\dot{\varphi}_{\delta,n} R_{\delta,n} - \dot{x}_{x(k+1)}) + \\
 & + \ddot{\varphi}_{\delta,n} J_{\delta,n} + M_{\delta,n,2}; \\
 & c_{x(k+1)} (\varphi_{\delta,n} R_{\delta,n} - x_{x(k+1)}) + b_{x(k+1)} (\dot{\varphi}_{\delta,n} R_{\delta,n} - \\
 & - \dot{x}_{x(k+1)}) = W_{xk} + m_{xk} \ddot{x}_{xk} + c_{xk} (x_{xk} - \\
 & - x_{x(k-1)}) + b_{xk} (\dot{x}_{xk} - \dot{x}_{x(k-1)}); \\
 & \dots \dots \dots \\
 & c_{x(j+1)} (x_{x(j+1)} - x_{xj}) + b_{x(j+1)} (\dot{x}_{x(j+1)} - \\
 & - \dot{x}_{xj}) = m_{xj} \ddot{x}_{xj} + W_{xj} + c_{xj} (x_{xj} - x_{x(j-1)}) + \\
 & + b_{xj} (\dot{x}_{xj} - \dot{x}_{x(j-1)}); \\
 & \dots \dots \dots \\
 & c_{x2} (x_{x2} - x_{x1}) + b_{x2} (\dot{x}_{x2} - \dot{x}_{x1}) = m_{x1} \ddot{x}_{x1} + \\
 & + W_{x1} + c_{x1} (x_{x1} - R_{\delta,n} \varphi_{\delta,n}) + b_{x1} (\dot{x}_{x1} - R_{\delta,n} \dot{\varphi}_{\delta,n}).
 \end{aligned} \tag{1}$$

В якій позначимо $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ – проекції узагальненого вектора струму статора на нерухомі ортогональні координатні осі α і β ; $i_{2\alpha}$, $i_{2\beta}$ – проекції узагальненого вектора струму ротора на ортогональні координатні осі α і β ; L_1 , L_2 – індуктивності статорної та роторної обмоток; L_{12} – взаємоіндуктивність; k_r і k_s – коефіцієнти магнітного зв'язку ротора та статора відповідно ($k_r=L_{12}L_2^{-1}$; $k_s=L_{12}L_1^{-1}$); p – кількість пар полюсів двигуна; $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ – проекції узагальненого вектора напруги статора на координатні осі α і β ($u_{1\alpha} = U_{\max} \cos(2\pi \int f dt)$, $u_{1\beta} = U_{\max} \sin(2\pi \int f dt)$); U_{\max} – амплітуда фазної напруги живлення двигуна; f – частота напруги живлення двигуна; $e_{2\beta}$, $e_{2\alpha}$ – ЕРС, що індукуються потокозчепленнями ротора по осях α і β відповідно ($e_{2\alpha}=p\omega_{\delta\delta}(L_2i_{2\beta}+L_{12}i_{1\beta})+i_{2\alpha}R_2$), $e_{2\beta}=p\omega_{\delta\delta}(L_2i_{2\alpha}+L_{12}i_{1\alpha})+i_{2\beta}R_2$); R_1 – активний опір

статорної обмотки; R_2 – зведений до статора активний опір роторної обмотки; X_1 – індуктивний опір статорної обмотки; X_2 – зведений до статора індуктивний опір роторної обмотки; δ – коефіцієнт розсіювання; $\omega_{\delta\delta}$ – кутова швидкість двигуна; u та η – передаточне число і ККД приводу конвеєра.

$$\begin{cases} \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1} (u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1 + k_r e_{2\alpha}); \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1} (u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1 - k_r e_{2\beta}); \\ \frac{di_{2\alpha}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2} ((u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1) k_s + e_{2\alpha}); \\ \frac{di_{2\beta}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2} ((u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1) k_s - e_{2\beta}); \\ M_{np} = u \eta \frac{3}{2} p L_{12} (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}), \end{cases} \tag{2}$$

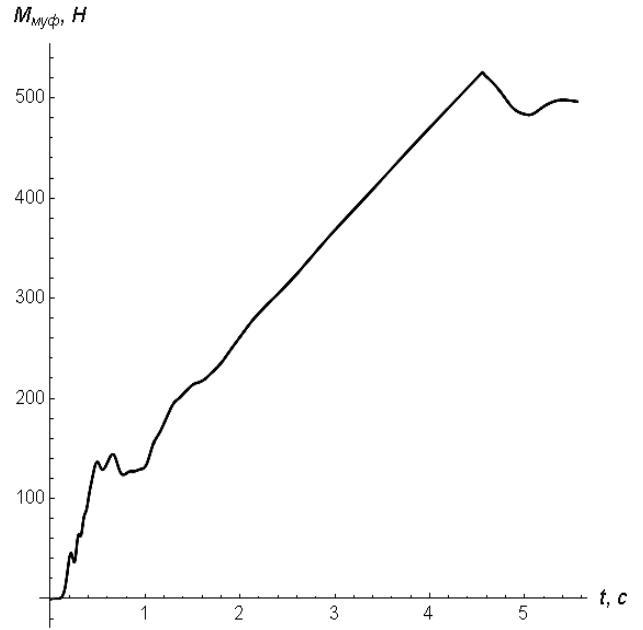
Для встановлення ефективності налаштувань частотно-керованого приводу конвеєра проведемо обґрунтування вибору оптимізаційного критерію. Подамо його у наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
 Cr &= \sum_{i=1}^{\eta} Int_i w_i m_i + \sum_{j=1}^{\mu-\eta} Ter_j w_j j + \eta m_{j+\eta}; \\
 Int &= [Int_i, Int_{d,1}, Int_{d,2}, \dots, Int_{d,k}, Int_{en,1}, Int_{en,2}]^T; \\
 Ter &= [Ter_{d,1,max}, Ter_{d,2,max}, \dots, Ter_{d,f,max}, Ter_{d,1,0}, \\
 & Ter_{d,2,0}, \dots, Ter_{d,f,0}, Ter_{d,1,T}, Ter_{d,2,T}, \dots, Ter_{d,f,T}, \\
 & Ter_{en,max}, Ter_{en,0}, Ter_{en,T}, Ter_{el,max}, Ter_{el,0}, Ter_{el,T}]^T; \\
 Int_1 &= Int_t = \int_0^T dt; \\
 Int_2 &= Int_{d,1} = \sqrt{T^{-1} \int_0^T M_{dr}^2 dt}; \\
 Int_3 &= Int_{d,2} = \sqrt{T^{-1} \int_0^T M_{coup}^2 dt}; \\
 Int_4 &= Int_{d,3} = \sqrt{T^{-1} \int_0^T F_b^2 dt}; \\
 \dots & \\
 Int_{\eta-2} &= Int_{d,k} = \sqrt{T^{-1} \int_0^T F_{b,k}^2 dt}; \\
 Int_{\eta-1} &= Int_{e,1} = \int_0^T |P_{dr}| dt; \\
 Int_{\eta} &= Int_{e,2} = \int_0^T \Delta P_{dr} dt; \\
 Ter_{d,1,max} &= \max(M_{dr}); \\
 Ter_{d,2,max} &= \max(M_{coup}); \\
 Ter_{d,3,max} &= \max(F_b); \\
 \dots & \\
 Ter_{d,f,max} &= \max(F_f); \\
 Ter_{d,1,0} &= M_{dr}(0); \\
 Ter_{d,2,0} &= M_{coup}(0); \\
 Ter_{d,3,0} &= F_b(0); \\
 \dots &
 \end{aligned} \tag{3}$$

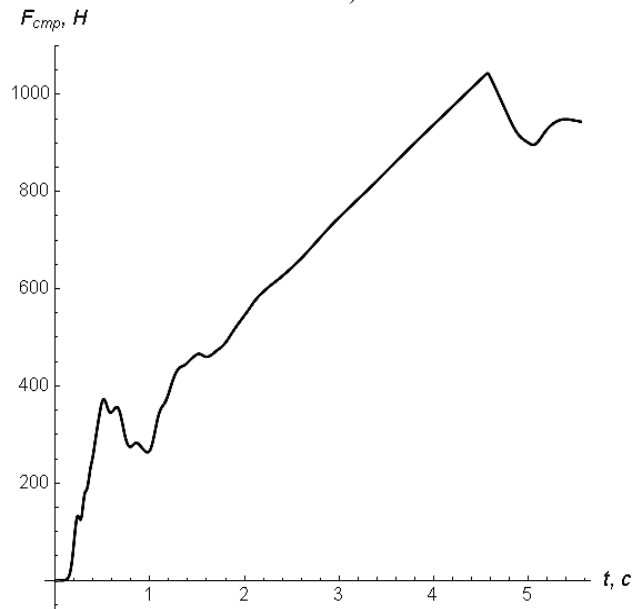
$$\begin{aligned}
 & \dots \\
 & Ter_{d,f,0} = F_f(0); \\
 & Ter_{d,1,T} = M_{dr}(T); \\
 & Ter_{d,2,T} = M_{comp}(T); \\
 & Ter_{d,3,T} = F_b(T); \\
 & \dots \\
 & Ter_{d,f,T} = F_f(T); \\
 & Ter_{en,max} = \max(P_{dr}); \\
 & Ter_{en,T} = P_{dr}(T); \\
 & Ter_{el,max} = \max(I_{dr}); \\
 & Ter_{el,T} = I_{dr}(T); \\
 & W = [w_1, w_2, \dots, w_\mu]^T; \\
 & M = [m_1, m_2, \dots, m_\mu]^T,
 \end{aligned} \tag{3}$$

де Int_i – i -тий компонент вектора інтегральних оптимізаційних критеріїв руху системи; Int_i – критерій швидкодії системи; $I_{d,1}$ – середньоквадратичне значення крутного моменту приводу машини; $I_{d,2}$ – середньоквадратичне значення крутного моменту у муфті приводу машини; $I_{d,3}$ – середньоквадратичне значення зусилля у місці набігання стрічки на приводний барабан (тут і надалі мається на увазі робоча гілка конвеєра); $I_{d,k}$ – середньоквадратичне значення зусилля у деякому k -тому перерізі стрічки; $I_{e,1}$ – витрати енергії під час керованого режиму руху конвеєра; $I_{e,2}$ – втрати енергії під час керованого режиму руху конвеєра; Ter_j – j -тий компонент вектора термінальних оптимізаційних критеріїв руху системи $Ter_{d,1,max}, \dots, Ter_{d,f,max}$ – максимальні значення відповідно крутного моменту приводу, моменту у муфті, зусилля у місці набігання стрічки на барабан та зусилля у f -тому перерізі стрічки; $Ter_{d,1,0}, \dots, Ter_{d,f,0}$ – початкові значення відповідно крутного моменту приводу, моменту у муфті, зусилля у місці набігання стрічки на барабан та зусилля у f -тому перерізі стрічки; $Ter_{d,1,T}, \dots, Ter_{d,f,T}$ – кінцеві значення відповідно крутного моменту приводу, моменту у муфті, зусилля у місці набігання стрічки на барабан та зусилля у f -тому перерізі стрічки; $Ter_{en,max}, Ter_{en,0}, Ter_{en,T}$ – максимальне, початкове та кінцеве значення потужності приводу конвеєра; $Ter_{el,max}, Ter_{el,0}, Ter_{el,T}$ – максимальне, початкове та кінцеве значення струму електроприводу конвеєра; W – вектор вагових коефіцієнтів, які показують важливість кожного компонента векторів Int та Ter , причому сума всіх компонентів w_i рівна одиниці; M – вектор коефіцієнтів, які зводять розмірності інтегральних критеріїв до безрозмірного вигляду (таким чином, критерій (3) є безрозмірним, що дозволяє провести коректну постановку задачі оптимізації); μ – розмірність векторів W та M .

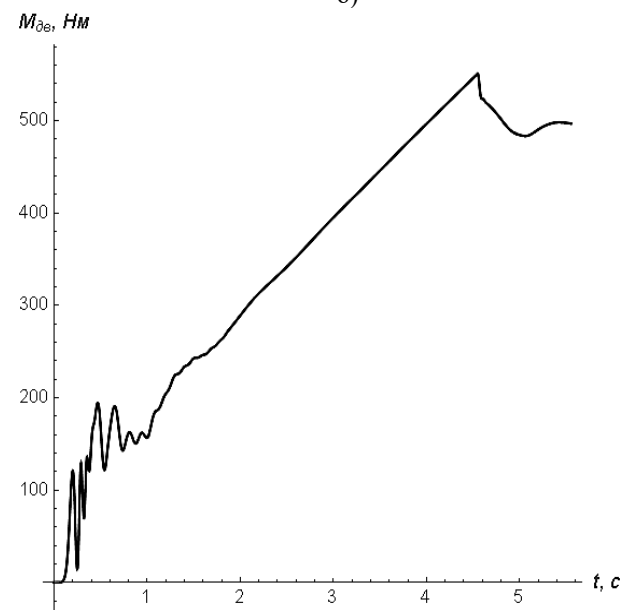
Критерій (1) відображає найсуттєвіші властивості роботи конвеєра під час керованого режиму руху: тривалість руху, динамічні та енергетичні показники його роботи. За математичним представленням вони є інтегральними та термінальними і в сукупності відображають комплекс небажаних характеристик роботи транспортуючої машини.



а)



б)



в)

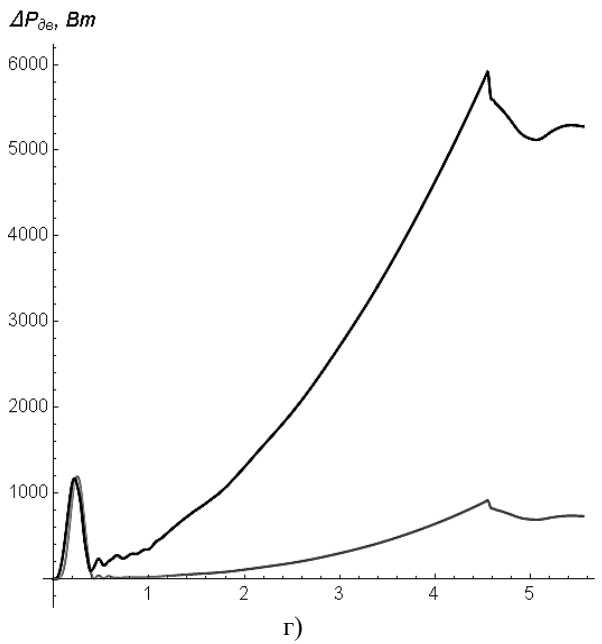


Рис. 2. Графіки динамічних та енергетичних характеристик оптимального пуску стрічкового конвеєра: а) крутний момент у муфті; б) зусилля у робочій стрічці конвеєра у місці набігання її на барабан; в) крутний момент приводу; г) витрати (чорна крива) і втрати (сіра крива) потужності під час пуску двигуна

Fig. 2. Graphics dynamic and energetic characteristics of the optimal start-up of a belt conveyor: a) torque the coupling, b) efforts in working the conveyor belt in place of nabuhanie on the drum, c) torque, d) cost (black curve) and loss (gray curve) power during engine start.

Отже, критерій (3) у процесі виконання оптимізації необхідно мінімізувати.

Мінімізація показника (3) вимагає попередніх перетворень математичної моделі динаміки руху стрічкового конвеєра (1). Для цього представимо математичну модель системи у вигляді MISO-системи де вихідною величиною є значення критерію Cr , а входними – наступні величини: початкове значення напруги живлення приводу конвеєра U_0 , тривалість наростання та спадання частоти напруги живлення двигуна T та профіль наростання частоти напруги живлення приводу. Інтегрування систем диференціальних рівнянь (1) та (2) виконано із використанням методу Рунге-Кутта. На основі отриманих результатів виконується розрахунок чисельного значення критерію (3).

Таким чином, виконано формалізацію задачі оптимізації динаміки пуску стрічкового конвеєра. Для її розв’язання використано метод ME-PSO [10]. У результаті роботи алгоритму отримано наступні дані: початкове значення напруги живлення рівне нулю, а тривалість розгону рівна 4,55 с – для лінійної характеристики пуску; початкова напруга живлення рівна 10% від номінальної, а тривалість наростання частоти наруги живлення складає 1,48 с – для S-подібної характеристики. Графічні залежності, які відповідають оптимальним налаштуванням частотно-керованого приводу стрічкового конвеєра, наведено на рис. 2. Крім того, розраховані енергетичні та динамічні показники пуску конвеєра при його оптимальних налаштуваннях (таблиця 1).

Таблиця 1. Значення оціночних показників для режиму частотно-керованого пуску стрічкового конвеєра.
Table 1. The values of the performance indicators for the mode of frequency-controlled start-up of a belt conveyor.

Показники		Значення
Наростання частоти напруги живлення двигуна за S-подібною характеристикою		
Момент у муфті	K_{max}^*	1,16
	RMS**, Нм	468
Момент приводного двигуна	K_{max}	1,51
	RMS, Нм	526
Зусилля у стрічці, що набігає на приводний барабан	K_{max}	1,52
	RMS, Н	1005
Втрати енергії під час пуску двигуна	ΔE , Дж	1728
Наростання частоти напруги живлення двигуна за лінійною характеристикою		
Момент у муфті	K_{max}	1,15
	RMS, Нм	347
Момент приводного двигуна	K_{max}	1,16
	RMS, Нм	3947
Зусилля у стрічці, що набігає на приводний барабан	K_{max}	1,11
	RMS, Н	665
Втрати енергії під час пуску двигуна	ΔE , Дж	1369

* кратність максимального значення;
 ** середньоквадратичне значення.

Аналіз даних, що отримані у ході проведення оптимізації показує, що доцільно використовувати незначну початкову напругу живлення при незначній тривалості перехідного режиму. Також, з наведених графічних залежностей та даних таблиці 1 можемо

прийти до висновку, що раціональною характеристикою наростання частоти напруги живлення двигуна є лінійна.

Таким чином, у роботі отримано оптимальні за енергоефективністю та динамічними навантаженнями

значення параметрів частотно-керованого пуску стрічкового конвеєра. Розроблений підхід можна використати також для мінімізації інших небажаних критеріїв.

Висновки

1. На основі обраної динамічної моделі руху стрічкового конвеєра розроблено його математичну модель із врахуванням електромагнітних процесів у приводному механізмі.

2. Проведено обґрунтування узагальненого критерію оптимізації.

3. Із використанням методу ME-PSO знайдено оптимальні налаштування частотно-керованого приводу конвеєра.

4. Проведено аналіз даних отриманих у ході моделювання оптимального пуску стрічкового конвеєра та встановлено значне зниження небажаних показників при його пуску. Наприклад, момент у муфті при лінійній частоті наростання напруги зменшився майже в два рази, зусилля у стрічці, що набігає на приводний барабан зменшилось у 1,5 рази. Це говорить про те, що при оптимальному керуванню пуском енергоефективність та довговічність роботи стрічкового конвеєра зростає.

5. Розроблений підхід щодо оптимізації частотно-керованого пуску стрічкового конвеєра можна використовувати і для інших динамічних систем.

Список літератури

1. *Позынич Е. К., Позынич К. П.* Расчет ленточного конвеера. Хабаровск. Издательство ДВГУПС, 2006. 70 с.

2. *Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О.* Оптимізація перехідних режимів руху механічних систем прямим варіаційним методом: монографія. Київ. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М. 2010. 184 с.

3. *Суглобов В. В., Власов В. Т., Гринько П. А.* Экспериментальные исследования ленточных конвейеров. Университетская наука - 2016 : Междунар. науч.-техн. конф. : тез. докл. ГВУЗ «ПГТУ». Мариуполь, 2016. Т. 2. С. 56.

4. *Semenchenko A., Stadnik M., Belitsky P.* [and others] The impact of an uneven loading of a belt conveyor on the loading of drive motors and energy consumption in transportation. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2016. Т. 4. № 1 (82). С. 42–51.

5. *Schaut S., Alt S., Sawodn O.* Optimal Control for Transport Systems with multiple actuated Transportation Paths. American Control Conference Sheraton Seattle Hotel. Seattle, USA. May 24–26. 2017.

6. *Семенченк А. К., Стадни М. И., Белицкий П. В., Семенченко Д. А.* Математична модель цільової функції оптимізації режимів роботи приводу стрічкового конвеєра. Геотехнічна механіка. 2017. № 134.

7. *Błażej R., Jurdzia L., Kozłowski T., Kirjanów A.* The Use of Magnetic Sensors in Monitoring the Condition of the Core in Steel Cord Conveyor Belts – Tests of the Measuring Probe and the Design of the DiagBelt System. 2018. № 123. P. 48–53.

8. *Binchao Y., Tiezhu Q., Haitao Z., Gaowei Y.* Dual band infrared detection method based on mid-infrared and long infrared vision for conveyor belts longitudinal tear – Measurement. 2018. № 120. P. 140–149.

9. *Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Шалатовська К. М.* Математичне моделювання динаміки руху стрічкового транспортера. Підйомно-транспортна техніка. 2017. С. 86.

10. *Romasevych Yu., Loveikin V.* A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique. Cybernetics and Information Technologies. 2018. Vol. 18(3). P. 62–74.

11. Стрічкові конвеєри FPUH Michał Michalak, <http://michalak.co/home>, (дата звернення 01.04.2019).

12. Стрічкові конвеєри ТОВ «ВІПЛАСТ» Україна, <http://viplast.com.ua>, (дата звернення 28.03.2019).

13. Стрічкові конвеєри Dorner Mfg. Corp., <https://www.dornerconveyors.com>, (дата звернення 25.03.2019).

References

1. *Pozynich E. K.* (2006). Calculation of the conveyor belt. Khabarovsk: Publishing house. 70.

2. *Loveykin V. S., Romasevich Yu. O.* (2010). Optimization of transient modes of motion of mechanical systems by a direct variational method : monograph. Kyiv. Nizhyn: Publisher PE Lysenko MM. 184.

3. *Sutlobov V. V., Vlasov V. T., Grin'ko P. A.* (2016). Experimental Investigations of Band Conveyors. University Science - 2016: Intern. scientific and technical conf. : theses doc. GVUZ "PSTU". Mariupol. T. 2. 56.

4. *Semenchenko A., Stadnik M., Belitsky P.* [and others] (2016). The impact of an uneven loading of a belt conveyor on the loading of drive motors and energy consumption in transportation. T. 4. № 1 (82). 42–51.

5. *Schaut S., Alt S., Sawodn O.* (2017). Optimal Control for Transport Systems with multiple actuated Transportation Paths. American Control Conference Sheraton Seattle Hotel. Seattle, USA. May 24–26.

6. *Semenchenk A. K., Stadni M. I., Belitsky P. V., Semenchenko D. A.* (2017). Mathematical model of the objective function of optimizing the operating modes of the drive of the conveyor belt. Geotechnical mechanics. No 134.

7. *Błażej R., Jurdzia L., Kozłowski T., Kirjanów A.* (2018). The Use of Magnetic Sensors in Monitoring the Condition of the Core in Steel Cord Conveyor Belts – Tests of the Measuring Probe and the Design of the DiagBelt System, №123. 48–53.

8. *Binchao Y., Tiezhu Q., Haitao Z., Gaowei Y.* (2018). Dual band infrared detection method based on mid-infrared and long infrared vision for conveyor belts longitudinal tear - Measurement, № 120. 140–149.

9. Loveykin V. S., Romasevich Yu. O., Shalatovskaaya K. M. (2017). Mathematical modeling of the dynamics of the motion of the tape conveyor. Lifting and transport equipment. 86.

10. Romasevych Yu., Loveikin V. (2018). A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique, Cybernetics and Information Technologies, 18(3), 62-74.

11. Belt conveyors FPUH Michał Michalak, <http://michalak.co/home>, (application date 01.04.2019).

12. Belt conveyors of "VIPLAST" Ltd. Ukraine, <http://viplast.com.ua/>, (application date 28.03.2019).

13. Belt conveyors Dorner Mfg. Corp., <https://www.dornerconveyors.com>, (application date 25.03.2019).

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМА ПУСКА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА ПО КОМПЛЕКСНОМУ КРИТЕРІЮ

В. С. Ловейкін, Ю. А. Ромасевич, Р. А. Кульпін

Аннотація. В роботі проведено обґрунтування обобщенного критерію оптимізації управління движением ленточного конвейера во время его пуска. Критерий представлен в виде суммы интегральной и терминальной сверток единичных динамических и энергетических показателей работы конвейера. Для проведения исследований использовано математическую модель электромеханической системы ленточного конвейера, которая представлена системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Данная модель имеет механическую и электрическую составляющие. Первая представлена уравнениями, которые описывают движение приведенных масс ленты, груза, элементов привода конвейера, а вторая - уравнениями, которые описывают электродинамические процессы асинхронного частотно-управляемого электропривода конвейера.

Для проведения исследований математическая модель системы представлена в виде MISO-системы. Это позволило использовать метаэвристичный метод роя частиц для нахождения минимума оптимизационного критерия. Аргументами оптимизационной функции выступали продолжительность разгона системы, начальное напряжение питания привода конвейера и профиль кривой нарастания частоты напряжения питания привода.

Таким образом, в работе получены оптимальные значения настроек частотно-управляемого привода ленточного конвейера. Разработанный подход является универсальным и его можно использовать также для минимизации других нежелательных критериев.

Ключевые слова: ленточный конвейер, динамические нагрузки, математическая модель, частотно-управляемый привод, критерий оптимизации.

OPTIMIZATION OF BELT CONVEYOR START BY COMPLEX CRITERIA

V. S. Loveikin, Yu. O. Romasevych, R. A. Kulpin

Abstract. The substantiation of the generalized criterion of a belt conveyor control optimization during its start has been carried out in the paper. The criterion was presented as the sum of the integral and terminal convolutions of single dynamic and energy indicators of the conveyor. In the research, a mathematical model of the electromechanical system of the belt conveyor has been used. It was represented as a system of nonlinear ordinary differential equations. The mathematical model has mechanical and electrical components. The first was represented by the equations which describe the motion of the reduced masses of the belt, bulk material, the elements of the conveyor drive; the second was presented by equations which describe the electrodynamic processes of the asynchronous frequency controlled electric drive of the conveyor.

In order to conduct the research, the mathematical model of the system has been presented in the form of a MISO-system. It allowed for using the modified metaheuristic particle swarm optimization method for the purpose of criterion minimization. The arguments of the function to minimize were the duration of the system's start, the initial voltage of the conveyor drive and the curve profile of the drive frequency during start.

Thus, in the work the optimal values of settings of the frequency-controlled belt conveyor drive were obtained. The developed approach is universal and can also be used for minimization of other undesirable criteria.

Key words: belt conveyor, dynamic loads, mathematical model, frequency controlled drive, optimization criterion.

В. С. Ловейкін ORCID 0000-0003-4259-3900.

Ю. О. Ромасевич ORCID 0000-0001-5069-5929.

Р. А. Кульпін ORCID 0000-0002-5388-1628.

