

УДК 621.01:621.87

**АНАЛІЗ ПУСКУ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА
ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОГО ПРИВОДА**

©Ромасевич Ю. О.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Інформація про автора:

Ромасевич Юрій Олександрович: ORCID: 0000-0001-5069-5929; romasevichyuriy@ukr.net; доктор технічних наук; професор кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус №11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна.

На основі моделі руху стрічкового конвеєра проведено дослідження впливу налаштувань сучасних частотно-керованих приводів на характеристики протягом пуску конвеєра. Механічна частина математичної моделі описує рух багатьох зведених мас та моментів інерції конвеєра. У розрахунках використана динамічна механічна характеристика асинхронного електродвигуна стрічкового конвеєра. Всі результати, які отримані у роботі, були знайдені шляхом чисельного інтегрування системи нелінійних диференціальних рівнянь.

Проведено серію розрахункових експериментів, в яких незалежними факторами виступали характеристика та тривалість наростання частоти напруги живлення приводного двигуна. Оцінка пуску конвеєра виконувалась за допомогою комплексу показників: середньоквадратичного значення та кратності максимальних значень динамічних і енергетичних характеристик. У роботі на основі виконаного порівняльного аналізу встановлено раціональні налаштування частотно-керованих приводів конвеєрів, які забезпечують значне зниження небажаних показників при його пуску. Наведено напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: динаміка; математична модель; частотно-керований привод; стрічковий конвеєр.

Ромасевич Ю. А. «Анализ пуска ленточного конвейера с использованием частотно-управляемого привода».

На основе модели движения ленточного конвейера проведено исследование влияния настроек современных частотно-управляемых приводов на характеристики на протяжении пуска конвейера. Механическая часть математической модели описывает движение многих приведенных масс и моментов инерции конвейера. В расчетах использована динамическая механическая характеристика асинхронного электродвигателя ленточного конвейера. Все результаты, полученные в работе, были найдены путем численного интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений.

Проведена серия расчетных экспериментов, в которых независимыми факторами выступали характеристика и продолжительность нарастания частоты напряжения питания приводного двигателя. Оценка пуска конвейера выполнялась с помощью комплекса показателей: среднеквадратичного значения и кратности максимальных значений динамических и энергетических характеристик. В работе на основе выполненного сравнительного анализа установлены рациональные настройки частотно-управляемых

приводов конвейеров, которые обеспечивают значительное снижение нежелательных показателей при его пуске. Приведены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: динамика; математическая модель; частотно-управляемый привод; ленточный конвейер.

Romasevych Yu. “Analisis of a belt conveyor start-up with a frequency-controlled drive”.

Based on the belt conveyor motion model, the influence of the settings of modern frequency-controlled drives on the characteristics during a conveyor start-up has been investigated. The mechanical part of the mathematical model describes the motion of many reduced masses and moments of inertia of the conveyor. In the calculations, the dynamic mechanical characteristic of the asynchronous electric motor of the belt conveyor has been used. All the results obtained in the paper have been found by numerical integration of a system of nonlinear differential equations.

A series of computational experiments have been carried out in which the characteristics and duration of the frequency rise of the drive motor served as independent factors. Evaluation of the start-up of the conveyor has been performed using a set of indicators: the RMS value and the multiplicity of the maximum values of the dynamic and energy characteristics. In work on the basis of the performed comparative analysis, rational settings of frequency-controlled conveyor drives are established which provide a significant reduction in unwanted indications during its start-up. Directions for further research are given.

Key words: dynamics; mathematical model; frequency controlled drive; belt conveyor.

1. Постановка проблеми

Стрічкові конвеєри знайшли широке використання у багатьох сферах народного господарства: видобувній промисловості, агропромисловому комплексі, машинобудуванні, легкій промисловості тощо. Останнім часом стрічкові транспортери обладнують частотно-керованими приводами на основі асинхронних двигунів. Такий привод дає змогу оптимізувати продуктивність транспортера, та, за необхідністю, регулювати її. Використання таких приводів дозволяє вирішити і інші проблеми: забезпечити захист електричної та механічної частини конвеєра від аварій, вести моніторинг параметрів процесу транспортування та покращити його енергоефективність тощо.

Сучасні частотно-керовані приводи мають десятки параметрів, які необхідно налаштувати перед вводом конвеєра у експлуатацію. Рациональне налаштування цих параметрів повинно бути виконано на основі аналізу динамічних та енергетичних характеристик конвеєра, оскільки вони мають значний вплив на ефективність його експлуатації. Саме цьому питанню присвячена дана робота.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням динамічних розрахунків стрічкових конвеєрів присвячена значна кількість робіт [1-5]. У статті [1] на основі дослідження математичної моделі руху стрічки запропоновано у приводі конвеєра встановити гідродинамічну муфту для забезпечення

Динаміка та міцність машин

оптимальної тривалості пуску. При цьому зменшуються динамічні навантаження у стрічці та виключається її пробуксовування.

У роботі [2] представлені результати аналізу факторів, які визначають навантаження привода стрічкового конвеєра. Аналіз проведений на основі розробленої математичної моделі, що дозволила отримати передумови автоматичної стабілізації навантаження привода конвеєра.

В статті [3] розроблена математична модель руху стрічкового конвеєра, яка представлена у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь. Встановлено раціональний ступінь деталізації моделі, тобто кількість зведених мас конвеєра, які дозволяють адекватно відобразити динамічні процеси у елементах стрічкового конвеєра, що мають місце при його перехідних режимах руху.

У статті [4] на основі віртуальної моделі стрічкового конвеєра отримано результати стосовно визначення максимального напруження стрічки та розподілу напружень по всій її довжині. Отримані дані автори пропонують використати для проектування нових та експлуатації існуючих стрічкових конвеєрів.

В роботі [5] проведено динамічний аналіз пуску стрічкового конвеєра та встановлено залежність відстані транспортування і тривалості пуску конвеєра. При збільшенні відстані транспортування пуск конвеєра стає більш важким і зростає вібрація його елементів.

Незважаючи на досить детальну розробку математичних моделей стрічкових конвеєрів залишається відкритим питання впливу параметрів частотно-керованих приводів на динаміку їх роботи.

3. Постановка мети та завдань дослідження

Метою роботи є аналіз пуску стрічкового конвеєра при використанні частотно-керованого приводу. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: 1) обрати математичну модель конвеєра та провести з її використанням розрахункові експерименти; 2) виконати аналіз отриманих даних за енергетичними та динамічними показниками.

4. Виклад основного матеріалу

Для досліджень приймемо динамічну модель стрічкового конвеєра, яка зображена на рис. 1. Модель (рис. 1) була розроблена у роботі [3]. В цій роботі встановлено, що кількість дискретних мас робочої гілки транспортера раціонально прийняти рівній $n=20$. У даному дослідженні використаємо цю рекомендацію.

Параметри динамічної моделі, яка показана на рис. 1, зведені до приводного барабану. 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 роликами).

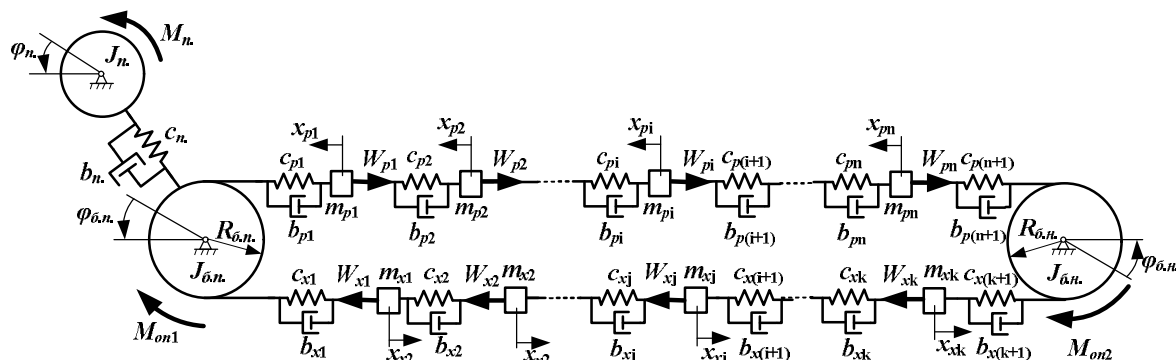


Рис. 1 – Динамічна модель стрічкового транспортера

Математична модель, яка описує рух зосереджених елементів системи, представляється у вигляді системи диференціальних рівнянь [3]:

$$\begin{cases}
 M_{np} = \ddot{\varphi}_{np} J_{np} + c_{np} (\varphi_{np} - \varphi_{\bar{o}.n}) + b_{np} (\dot{\varphi}_{np} - \dot{\varphi}_{\bar{o}.n}); \\
 c_{np} (\varphi_{np} - \varphi_{\bar{o}.n}) + b_{np} (\dot{\varphi}_{np} - \dot{\varphi}_{\bar{o}.n}) = \ddot{\varphi}_{\bar{o}.n} J_{\bar{o}.n} + M_{on.1} + c_{p1} \times \\
 \times (\varphi_{\bar{o}.n} R_{\bar{o}.n} - x_{p1}) + b_{p1} (\dot{\varphi}_{\bar{o}.n} R_{\bar{o}.n} - \dot{x}_{p1}) + c_{x1} (\varphi_{\bar{o}.n} R_{\bar{o}.n} - x_{x1}) + \\
 + b_{x1} (\dot{\varphi}_{\bar{o}.n} R_{\bar{o}.n} - \dot{x}_{x1}); \\
 c_{p1} (\varphi_{\bar{o}.n} R_{\bar{o}.n} - x_{p1}) + b_{p1} (\dot{\varphi}_{\bar{o}.n} R_{\bar{o}.n} - \dot{x}_{p1}) = m_{p1} \ddot{x}_{p1} + W_{p1} + \\
 + c_{p2} (x_{p1} - x_{p2}) + b_{p1} (\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_{\bar{o}.n} R_{\bar{o}.n}) + b_{p(n+1)} (\dot{x}_{pn} - \dot{\varphi}_{\bar{o}.n} R_{\bar{o}.n}); \\
 R_{\bar{o}.n} (c_{p(n+1)} (x_{pn} - \varphi_{\bar{o}.n} R_{\bar{o}.n}) + b_{p(n+1)} (\dot{x}_{pn} - \dot{\varphi}_{\bar{o}.n} R_{\bar{o}.n})) = \\
 = c_{x(k+1)} (\varphi_{\bar{o}.n} R_{\bar{o}.n} - x_{x(k+1)}) + b_{x(k+1)} (\dot{\varphi}_{\bar{o}.n} R_{\bar{o}.n} - \dot{x}_{x(k+1)}) + \\
 + \ddot{\varphi}_{\bar{o}.n} J_{\bar{o}.n} + M_{on.2}; \\
 c_{x(k+1)} (\varphi_{\bar{o}.n} R_{\bar{o}.n} - x_{x(k+1)}) + b_{x(k+1)} (\dot{\varphi}_{\bar{o}.n} R_{\bar{o}.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_{\bar{o}.n} \varphi_{\bar{o}.n}) + b_{x1} (\dot{x}_{x1} - R_{\bar{o}.n} \dot{\varphi}_{\bar{o}.n}).
 \end{cases} \tag{1}$$

Динаміка та міцність машин

Для визначення електромагнітного моменту приводу конвеєра скористаємося рівняннями узагальненої асинхронної електричної машини. Для цього використаємо представлення диференціальних рівнянь асинхронного двигуна у нерухомій системі координат [6]:

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

де $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ – 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} – взаємодуктивність; 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 ($e_{2\alpha}=p\omega_{\partial\partial}(L_2 i_{2\beta} + L_{12} i_{1\beta}) + i_{2\alpha} R_2$), $e_{2\beta}=p\omega_{\partial\partial}(L_2 i_{2\alpha} + L_{12} i_{1\alpha}) + i_{2\beta} R_2$); 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 ($\delta=1-(1+X_1(2\pi f L_{12})^{-1}(1+X_2(2\pi f L_{12})^{-1})^{-1})$); $\omega_{\partial\partial}$ – кутова швидкість двигуна; u та η – передаточне число і ККД приводу конвеєра.

Диференціальні рівняння систем (1) і (2) у сукупності представляють математичну модель електромеханічної системи стручкового конвеєра. Ці рівняння є нелінійними, тому для їх розв'язання використано чисельний метод Рунге-Кутта [7].

Розрахунки проведені для конвеєра КЛС-1000 [8] основні характеристики якого наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики стрічкового конвеєра КЛС-1000

Характеристика	Значення
Продуктивність, т/год	200
Довжина транспортування, м	100
Ширина стрічки, мм	1000
Номінальна швидкість руху стрічки, м/с	2,0
Потужність приводного двигуна, кВт	18,5

Динаміка та міцність машин

Однією із головних тенденцій у конструювання приводів сучасних транспортуючих машин є використання частотно-керованого двигуна. Це дає змогу оптимізувати продуктивність роботи конвеєрів, забезпечити плавний пуск та реалізувати захисні функції.

Сучасні частотні перетворювачі мають опційні налаштування, які можна легко змінювати. При цьому змінюється характер збурення, яке діє у динамічній системі. До таких опцій належать [9]:

1. тривалість наростання та спадання частоти напруги живлення двигуна;
2. характеристика наростання та спадання частоти напруги живлення.

Розрахункові експерименти проведені вказаних двох незалежних факторів: перший фактор варіювався на 5 рівнях (від 1 до 5 секунд із кроком в 1 секунду), а другий – на двох (лінійна та S-подібна характеристика наростання частоти напруги живлення).

Під час кожного експерименту було визначено інтегральні (середньоквадратичне значення) та позиційні (кратність максимального значення) показники для моменту у пружній муфті, моменту приводного двигуна і зусилля у стрічці, що набігає на приводний барабан. Крім того, було розраховано перевантаження двигуна за потужністю. Результати розрахункових експериментів наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розрахункових експериментів динамічних та енергетичних показників пуску стрічкового конвеєра

Лінійна характеристика наростання частоти напруги живлення двигуна		Тривалість наростання частоти напруги живлення двигуна, с				
		1	2	3	4	5
Момент у муфті	K_{\max}^*	1,60	1,24	1,14	1,12	1,10
	RMS**, Нм	1937	1814	1593	1513	1462
Момент приводного двигуна	K_{\max}	1,63	1,26	1,16	1,13	1,11
	RMS, Нм	2037	1869	1631	1541	1484
Зусилля у стрічці, що набігає на приводний барабан	K_{\max}	1,74	1,30	1,19	1,15	1,12
	RMS, Н	5185	4723	4059	3810	3652
Перевантаження двигуна за потужністю	K_{\max}	1,54	1,22	1,12	1,10	1,07
S-подібна характеристика наростання частоти напруги живлення двигуна		Тривалість наростання частоти напруги живлення двигуна, с				
		1	2	3	4	5
Момент у муфті	K_{\max}	1,67	1,41	1,15	1,08	1,06
	RMS, Нм	1990	1988	1741	1613	1547
Момент приводного двигуна	K_{\max}	1,67	1,43	1,17	1,09	1,06
	RMS, Нм	2086	2040	1778	1641	1570
Зусилля у стрічці, що набігає на приводний барабан	K_{\max}	1,79	1,52	1,21	1,11	1,08
	RMS, Н	5397	5207	4459	4071	3871
Перевантаження двигуна за потужністю	K_{\max}	1,57	1,33	1,09	1,05	1,02

* кратність максимального значення

** середньоквадратичне значення

Динаміка та міцність машин

Крім того, наведемо значення аналогічних показників при прямому пуску конвеєра (табл. 3). Порівняльний аналіз даних, які наведені у табл. 2 та табл. 3 показує, що навіть при незначній тривалості наростання частоти напруги живлення двигуна частотно-керований привод має переваги.

Таблиця 3 – Показники прямого пуску стрічкового конвеєра

Момент у муфті		Момент приводного двигуна		Зусилля у стрічці, що набігає на приводний барабан		Перевантаження двигуна за потужністю
K_{max}	RMS, Нм	K_{max}	RMS, Нм	K_{max}	RMS, Нм	K_{max}
1,84	2605	4,98	2704	1,89	6649	2,57

Зі збільшенням тривалості наростання частоти напруги живлення двигуна для обох характеристик небажані показники пуску стрічкового конвеєра знижуються. Наприклад, при тривалості наростання напруги живлення рівній 5 секунд перевантаження двигуна зменшилось у 2,40-2,52 рази, максимальний момент у пружній муфті на 67-74 %, максимальне зусилля у стрічці, що набігає на приводний барабан на 64-70 %, максимальний момент приводного двигуна у 4,49-4,70 рази

Частотне керування приводом зумовлює також значне зменшення небажаних середньоквадратичних динамічних показників. Для того, щоб встановити причину такого значного покращення динамічних та енергетичних характеристик конвеєра при пуску наведемо графіки функцій (рис. 2).

На рис. 2 графіки сірого кольору відповідають S-подібній характеристиці наростання частоти напруги живлення двигуна, графіки, що зображені суцільною чорною лінією – лінійній характеристиці, а графіки, що зображені чорною штриховою лінією відповідають прямому пуску конвеєра. З графічних залежностей, які представлені на рис. 2, видно, що найбільш плавна зміна характеристик спостерігається при використанні S-подібної характеристики наростання частоти напруги живлення двигуна.

Значні максимальні та інтегральні величини показників, які виникають при прямому пуску двигуна конвеєра, викликані миттєвим прикладанням до його обмоток номінальної напруги, яка викликає значні вільні струми двигуна. Вони, у свою чергу, спричиняють електромагнітні моменти, які передаються у механічну частину стрічкового конвеєра і навантажують його елементи зусиллями та моментами.

Аналіз даних, які наведені у табл. 2, показує, що при тривалості наростання напруги живлення двигуна рівній 1 секунд необхідно використовувати лінійну характеристику. Однак, при збільшенні тривалості наростання частоти напруги живлення двигуна максимальні значення динамічних показників, які виникають при S-подібній характеристиці, є меншими ніж ті, які виникають при лінійній характеристиці. Саме максимальні зусилля викликають вихід з ладу елементів стрічкового конвеєра. Тому необхідно прагнути до їх зменшення. Таким чином, у рамках даного дослідження бажано використовувати S-подібну характеристику наростання напруги живлення приводу стрічкового конвеєра при тривалості наростання частоти напруги живлення двигуна рівній 5 секунд.

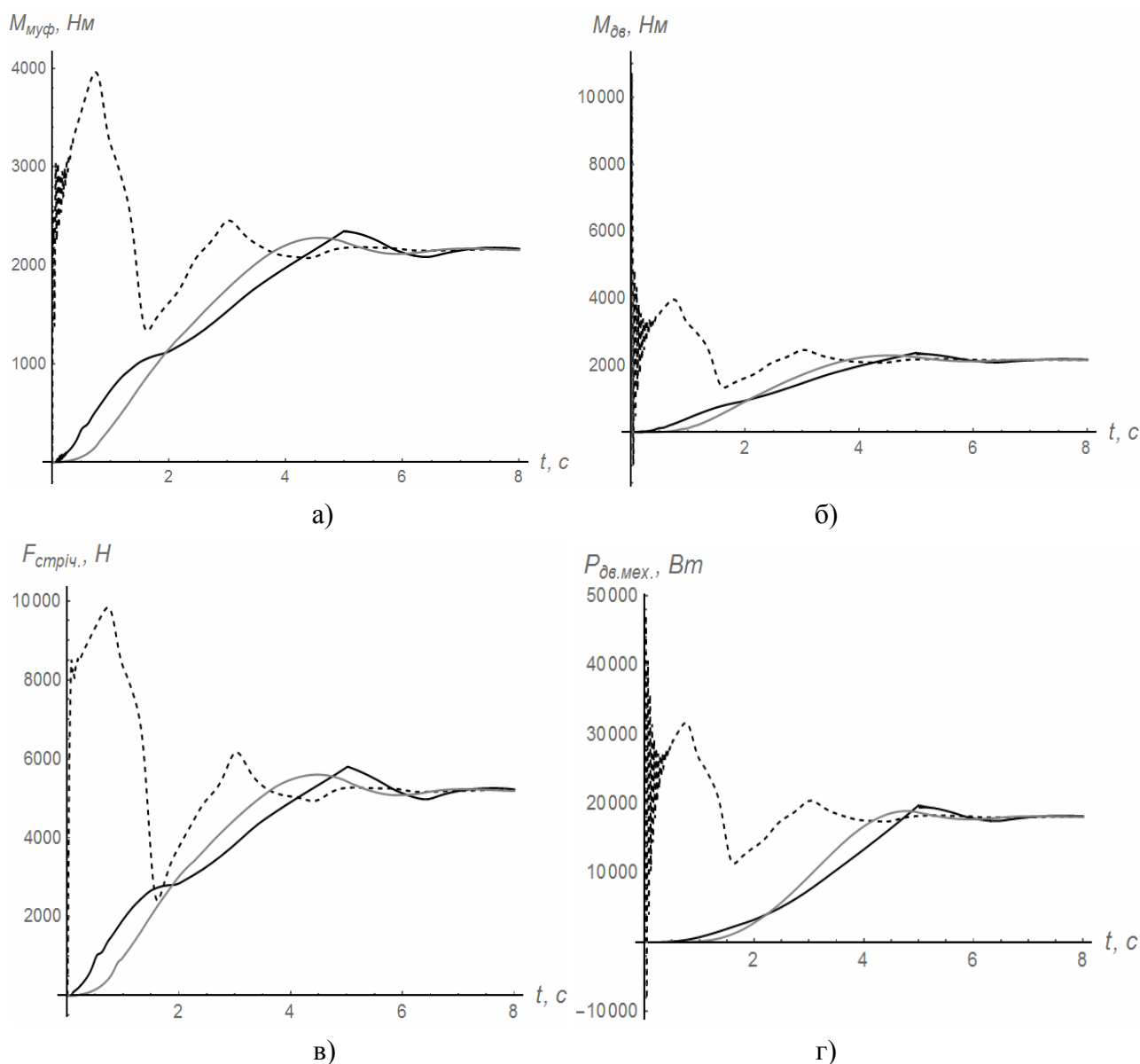


Рис. 2 – Графіки динамічних та енергетичних характеристик пуску стрічкового конвеєра: а) момент у муфті; б) приводний момент двигуна; в) зусилля у стрічці, що набігає на приводний барабан; г) механічна потужність двигуна

Висновки

У роботі на основі розробленої раніше математичної моделі електромеханічної системи стрічкового конвеєра проведені розрахункові експерименти стосовно впливу частотно-керованого приводу на динамічні та енергетичні показники пуску конвеєра. Встановлено значне зменшення небажаних показників пуску стрічкового конвеєра у порівнянні із прямим пуском приводного двигуна. Раціональною характеристикою наростання напруги живлення двигуна, яка забезпечує зменшення небажаних показників пуску конвеєра, є S-подібна. Крім того, забезпечення достатньо тривалого пуску (у рамках даного дослідження 5 секунд) дає можливість експлуатувати привод конвеєра та інші його елементи (стрічка, муфта) без перевантажень.

Динаміка та міцність машин

Напрямки подальших досліджень полягають у аналізі електричних показників роботи досліджуваної системи, врахуванні інших опційних налаштувань частотно-керованих приводів (початкової напруги живлення двигуна, частоти несучої ШІМ тощо) та подальшій деталізації математичної моделі руху стрічкового конвеєра.

Список використаних джерел:

1. Гринько П. А. Исследование динамики привода ленточных конвейеров с целью повышения срока службы ленты / П. А. Гринько // *Захист металургійних машин від поломок*. – 2003. – Вип. 7. – С. 152-156.
2. Ставицкий В. Н. Динамика нагрузки регулируемого привода ленточного конвейера / В. Н. Ставицкий // *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація*. – 2012. – № 23 (201). – С. 49-53.
3. Ловейкін В. С. Математичне моделювання динаміки руху стрічкового транспортера / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, К. М. Шалатовська // *Підйомно-транспортна техніка*. – 2017. – Вип. 2(54). – С. 16-23.
4. Dongmei Du Dynamic Characteristics of Belt Conveyor Based on Virtual Prototyping / Du Dongmei, Zhu Chunshui, Li Hong, He Qing // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – Vol. 157-158. – Pp. 1685-1688, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.157-158.1685.
5. Guanglin Zhou Dynamic Analysis of Belt Conveyor Based On ADAMS and PRO/E / Zhou Guanglin, Han Ruifei // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 764. – Pp. 119-123, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1063.130.
6. Штейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Штейнер. – Екатеринбург : УРО РАН, 2000. – 654 с.
7. Формалев В. Ф. Численные методы / В. Ф. Формалев, Д. Л. Ревизников. – М. : Физматлит, 2004. – 400 с.
8. Конвейер ленточный [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.holunica.ru/lentochnie-konvejery>.
9. FR-E700: frequency inverter instruction manual. Art. no.: 213994. Version D. Mitsubishi Electric Industrial Automation. – 2011. – 524 p.

References

1. Grinko, P 2003, 'Issledovaniye dinamiki privoda lentochnykh konveyerov s tselyu povysheniya sroka sluzhby lenty', *Zakhyst metalurhiinykh mashyn vid polomok*, iss. 7, pp. 152-156.
2. Stavitskiy, V 2012, 'Dinamika nagruzki reguliruyemogo privoda lentochnogo konveyera', *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: Obchysliuvalna tekhnika ta avtomatyziatsiia*, no. 23 (201), pp. 49-53.
3. Loveikin, V, Romasevych, Yu & Shalatskaya, K 2017, 'Matematychno modeliuвання dynamiky rukhu strichkovoho transportera', *Pidiomno-transportna tekhnika*, iss. 2(54), pp. 16-23.
4. Dongmei, D, Chunshui, Zh, Hong, L & Qing, H 2012, 'Dynamic Characteristics of Belt Conveyor Based on Virtual Prototyping', *Applied Mechanics and Materials*, vol. 157-158, pp. 1685-1688, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.157-158.1685.
5. Guanglin, Zh & Han, R 2013, 'Dynamic Analysis of Belt Conveyor Based On ADAMS and PRO/E', *Advanced Materials Research*, vol. 764, pp. 119-123, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1063.130.
6. Shteyner, R 2000, *Matematicheskoye modelirovaniye elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty*, URO RAN, Ekaterinburg.
7. Formalev, V & Reviznikov, D 2004, *Chislennyye metody*, Fizmatlit, Moskva.
8. Konveyer lentochnyy, viewed 2018, <<http://www.holunica.ru/lentochnie-konvejery>>.
9. FR-E700: frequency inverter instruction manual. Art. no.: 213994. Version D, 2011, Mitsubishi Electric Industrial Automation.

Стаття надійшла до редакції 10 квітня 2018 р.