

Микола ПЕЧЕНИК

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0002-4527-1125>

Сергій БУР'ЯН

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0002-4947-0201>

Ганна ЗЕМЛЯНУХІНА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0002-9653-8416>

Артем ГОДЗ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ СТРІЧКОВО-КАНАТНОГО КОНВЕЄРА З ВЕКТОРНО-КЕРОВАНИМИ АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ

Системи безперервного транспорту є найбільш перспективним видом переміщення сипких та штучних матеріалів, мають високу продуктивність, техніко-економічні показники і широко використовуються в світовій практиці як магістральні конвеєри для вугільної та гірничорудної промисловості. Особливе місце у безперервному транспорті займають стрічково-канатні конвеєри, що здатні забезпечити транспорт вантажу на відстань більше 30 км в одному ставі. Як правило, ці магістральні конвеєри не передбачають регулювання параметрів руху, пуск здійснюється при використанні систем плавного пуску. Водночас, такі системи мають високі вимоги до параметрів динамічних режимів роботи, точності відпрацювання заданої програми руху та рівня енергетичної ефективності.

У роботі запропоновано сучасну систему електроприводу з використанням векторно-керованих асинхронних електродвигунів. Наведено структуру електромеханічної системи. З використанням відомих методів побудована математична модель електромеханічної системи. У рамках пакету прикладних програм «MATLAB» Simulink отримано модель дослідження динамічних режимів роботи конвеєра. На конкретному прикладі проведено дослідження динамічних та статичних режимів роботи конвеєра при варіаціях статичного навантаження та швидкості переміщення тягового елемента. Дослідження точності відпрацювання заданого закону руху показали, що максимальна динамічна похибка за швидкістю та струмом відпрацьовується за час до 0,06 с. Максимальний рівень її амплітуди не перевищує 0,33% від значення сталої швидкості руху, що не викликає коливальних процесів в конвеєрі і забезпечує стійку роботу електромеханічної системи.

Проведено дослідження енергетичних характеристик електромеханічної системи. Втрати активної потужності не перевищують 12,5% від споживаного у всьому діапазоні варіації статичного навантаження та швидкості тягового елемента. Сформульовано рекомендації щодо використання у стрічково-канатних конвеєрах електромеханічних систем з векторно-керованими асинхронними електродвигунами.

Ключові слова: безперервне транспортування; векторне керування; стрічково-канатний конвеєр; точність відпрацювання; втрати потужності.

Mykolay PECHENIK, Sergey BURIAN, Hanna ZEMLIANUKHINA, Artem HODZ
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

INVESTIGATION OF THE OPERATION MODES OF THE BELT-ROPE CONVEYOR ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH VECTOR-CONTROLLED INDUCTION ELECTRIC MOTORS

Continuous transport systems are the most promising type of movement of loose and artificial materials, have high productivity, technical and economic indicators and are widely used in world practice as main conveyors for the coal and mining industry. A special place in continuous transport is occupied by belt-rope conveyors, which are capable of transporting cargo over a distance of more than 30 km in one stop. As a rule, these main conveyors do not provide for the adjustment of movement parameters, the start is carried out using soft start systems. At the same time, such systems have high requirements for the parameters of dynamic modes of operation, the accuracy of working out the given movement program and the level of energy efficiency.

The paper proposes a modern electric drive system using vector-controlled induction electric motors. The structure of the electromechanical system is given. A mathematical model of the electromechanical system was built using known methods. As part of the "MATLAB" Simulink application program package, a model for the investigation of dynamic modes of conveyor operation was obtained. On a specific example, a research of dynamic and static modes of conveyor operation with static load and the speed of movement variations of the traction element was carried out. Studies of the accuracy of working out the given law of motion showed that the maximum dynamic error in terms of speed and current is worked out in a time of up to 0.06 s. The maximum level of its amplitude does not exceed 0.33% of the constant speed of movement, which does not cause oscillatory processes in the conveyor and ensures stable operation of the electromechanical system.

Investigation of the electromechanical system energy characteristics was conducted. Losses of active power do not exceed 12.5% of the consumed in the entire range of variation of the static load and speed of the traction element. Recommendations for the use of electromechanical systems with vector-controlled induction electric motors in belt-rope conveyors have been formulated.

Keywords: continuous transportation; vector control; belt-rope conveyor; accuracy of work; power losses.

Постановка проблеми

Одним з найбільш перспективних видів безперервного транспорту, призначеного для переміщення сипких та штучних матеріалів, є конвеєрні системи, в яких в якості тягового елемента використовуються як гнучка стрічка (стрічкові конвеєри), так і канати (канатно-стрічкові конвеєри). Дані системи мають високу продуктивність, швидкість (до 6 м/с), і широко використовуються у вугільній і гірничорудній промисловості на розрізах і в шахтах.

Стрічкові конвеєри, при використанні гумотросових стрічок, мають довжину тягового елемента в одному ставі, яка не перевищує 5 км, що викликано граничними значеннями його властивостей міцності. При транспортуванні вантажів на великі відстані, необхідно використовувати транспортну лінію, що складається з декількох конвеєрів, а це призводить до суттєвого зростання капітальних та експлуатаційних витрат. Стрічково-канатні конвеєри в одному ставі дозволяють забезпечити транспорт вантажів на відстань до 30 і більше кілометрів, при цьому питомі витрати енергії на 20-40% менші, ніж у стрічкових [1].

Досвід експлуатації стрічково-канатних конвеєрів як вітчизняний, так і зарубіжний (Австралія, США, Канада та ін.) показує, що стрічково-канатні конвеєри є досить перспективними і при переміщенні сипких вантажів на великі відстані мають істотну перевагу в порівнянні з іншими видами транспорту [2]. Але при експлуатації цих систем виникають питання стосовно вдосконалення електромеханічних систем та їх електроприводів.

Аналіз останніх джерел

Магістральні конвеєри мають досить високу продуктивність до 3-5 т/год, при цьому потужність приводної станції може досягати до 5000 кВт.

В цих умовах досить гостро ставляться вимоги до електроприводу щодо забезпечення високого рівня енергетичної ефективності. В даний час в магістральних конвеєрах у статичних режимах роботи швидкість руху тягового елемента не регулюється, тому при коливаннях навантаження, зростають втрати енергії, знижується рівень коефіцієнту корисної дії (ККД). Іншою, не менш важливою проблемою, є забезпечення стабільності швидкості конвеєра у всьому діапазоні зміни збурень в електромеханічній системі та виключення можливих коливань в пружно-в'язкому тяговому органі.[3, 4].

Одним з перспективних напрямів вирішення поставлених завдань є використання сучасних електроприводів, у тому числі, і при використанні векторно-керованих асинхронних електродвигунів [5, 6]. Дослідження характеру розподілу втрат енергії в електромеханічних системах магістральних стрічкових конвеєрів [4, 7] показує, що використання регульованого електропривода дозволяє збільшити їх ККД до 10%. Дослідження магістральних стрічково-канатних конвеєрів в основному стосуються підвищенню їх ефективності за рахунок вдосконалення елементів механічної системи. Дослідження електромеханічних систем при використанні векторно-керованих асинхронних електродвигунів показують їх високий рівень керованості та енергетичних показників [8].

Однак для формування рекомендацій щодо використання електромеханічних систем з векторним управлінням для стрічково-канатних конвеєрів необхідно виконати дослідження їх статичних та динамічних характеристик у всьому діапазоні зміни навантаження та швидкості руху тягового елемента.

Метою роботи є: виконати дослідження характеру розподілу втрат активної потужності та рівня відпрацювання максимальної динамічної похибки за швидкістю в електромеханічній системі стрічково-канатного конвеєра з векторним управлінням при варіаціях його статичного навантаження та швидкості руху.

Виклад основного матеріалу

Дослідження проведено з використанням електромеханічної системи, функціональна схема якої наведена на рис. 1.

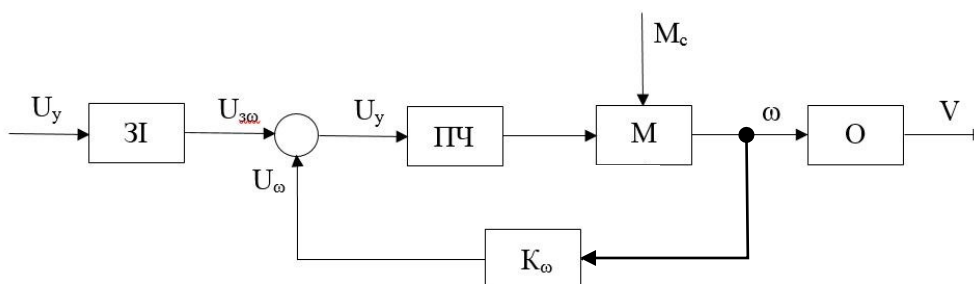


Рис. 1. Функціональна схема

У схемі наведено такі позначення: U_y – сигнал керування; $U_{3\omega}$ – напруга завдання швидкості; U_{yp} – сигнал на вході перетворювача частоти ПЧ; М – асинхронний електродвигун; ω – кутова швидкість; О – об'єкт (механізм); V – лінійна швидкість; K_{ω} – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю.

У відповідності з функціональною схемою системи керування отримані математичні моделі для окремих елементів.

Виконано синтез регулятора швидкості, отримано його передатну функцію у вигляді:

$$W_{PC}(p) = \frac{W_{PA3C}(p)}{W_{OPC}(p)} = \frac{T_M T_c p^2 + T_M p + 1}{T_U p} \quad (1)$$

де $T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta}$; $T_c = \frac{1}{\omega_0 \cdot s_k}$; $T_U = a_c \cdot k_\omega \cdot k_i \cdot k_d \cdot T_M$ – стали часу; a_c – коефіцієнт демпфування; $k_\omega = \frac{U}{1.3 \cdot \omega_H}$; $k_d = \frac{2\pi}{p}$; k_i – пропорційні складові регулятора.

Після відповідних перетворень отримано передатну функцію регулятора швидкості у вигляді ПІД-регулятора:

$$W_{PC} = \frac{T_M}{T_U} + \frac{1}{T_U p} + \frac{T_M T_c}{T_U} p \quad (2)$$

При побудові загальної математичної моделі електромеханічної системи конвеєру використано алгоритм прямого векторного керування [5].

Для дослідження статичних та динамічних режимів роботи конвеєра в межах пакету прикладних програм «MATLAB» Simulink розроблено модель з урахуванням векторно-керованого асинхронного електродвигуна [5].

Дослідження проведено на прикладі стрічково-контактного конвеєра з такими характеристиками: довжина конвеєра – 800 м; ширина стрічки – 1,2 м; продуктивність – 600 т/год; номінальна потужність приводної станції – 250 кВт; номінальна частота обертання – 1500 об/хв; номінальна лінійна швидкість – 1,5 м/с.

Дослідження проведено при фіксованих значеннях навантаження тягового елемента: $M_{ст} = M_{ст.н.} = 1608.44$ Нм; $M_{ст} = 0,9 M_{ст.н.} = 1447,6$ Нм; $M_{ст} = 0,7 M_{ст.н.} = 1125.91$ Нм; $M_{ст} = 0,4 M_{ст.н.} = 643.37$ Нм. та лінійної швидкості тягового елемента: $V_{л.} = V_{л.н.} = 1,5$ м/с; $V_{л.} = 0,6 V_{л.н.} = 0,9$ м/с; $V_{л.} = 0,3 V_{л.н.} = 0,45$ м/с. (відповідні значення кутової швидкості: $\omega_H = 155,43$ рад/с; $\omega_H = 0,6 \omega_H = 93,26$ рад/с; $\omega_H = 0,3 \omega_H = 46,63$ рад/с).

$M_{ст}$, $M_{ст.н.}$ – поточний та номінальний статичні моменти; $V_{л.}$ та $V_{л.н.}$ – поточна та номінальна лінійна швидкість.

Результати досліджень наведено на рис. 2 - рис. 8 та табл. 1 - табл. 2.

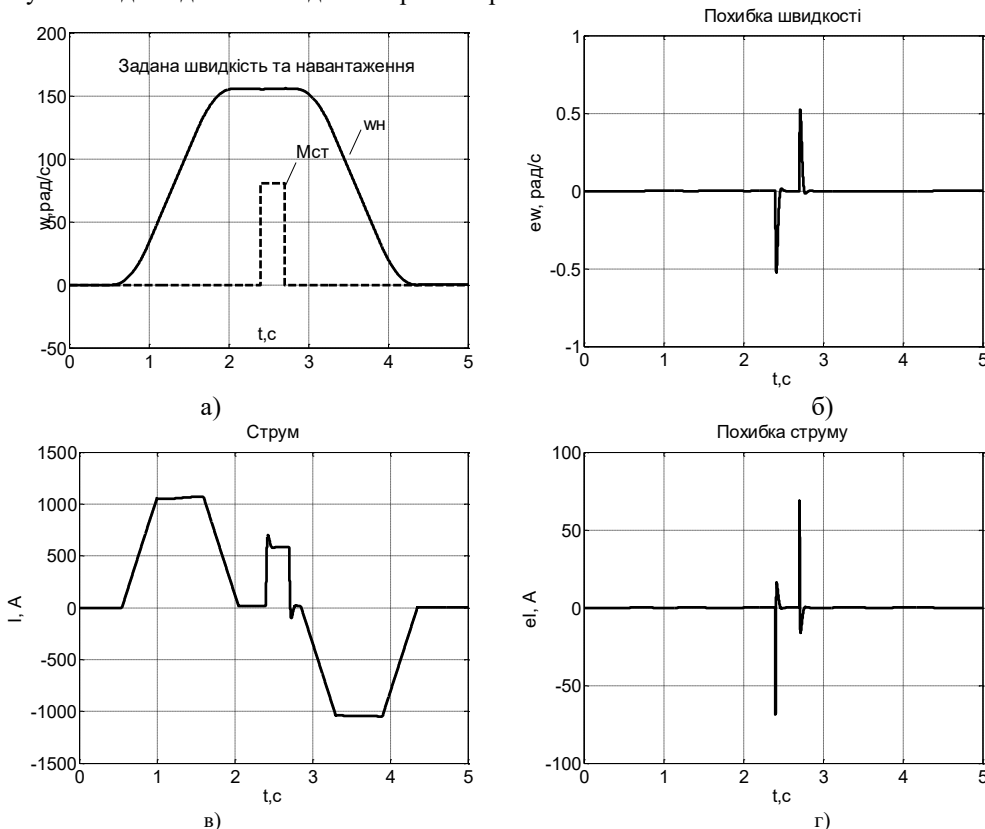


Рис. 2. Перехідні процеси при $\Omega = \omega_H$; $M_{ст} = M_{ст.н.}$: а) – траєкторія швидкості та момент навантаження, б) – похибка відпрацювання швидкості, в) – перехідний процес по струму, г) – похибка відпрацювання струму

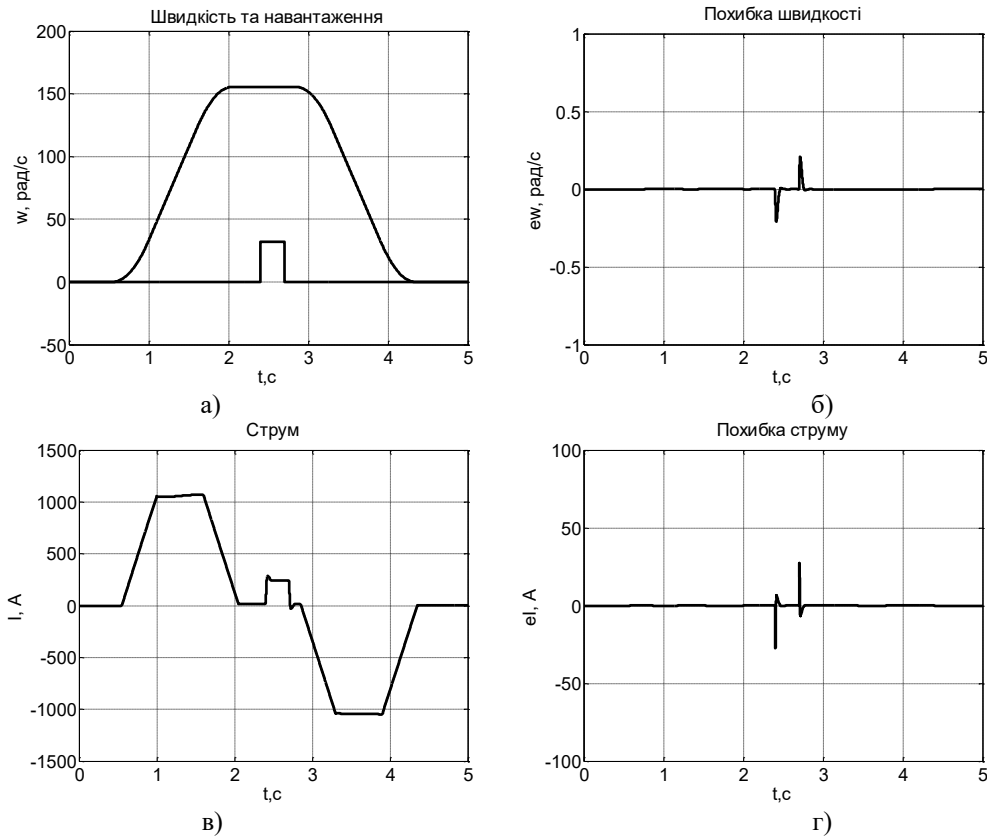


Рис. 3. Перехідні процеси при $\Omega = \Omega_n$; $M_{ст.н.} = 0,4M_{ст.н.}$: а) – траєкторія швидкості та момент навантаження, б) – похибка відпрацювання швидкості, в) – перехідний процес по струму, г) – похибка відпрацювання струму

На рисунках 2, 3 наведено результати дослідження характеру відпрацювання максимальної динамічної похибки за швидкістю тягового елемента конвеєра при варіаціях статичного навантаження $M_{ст.н.} = 0,4M_{ст.н.}$ до $M_{ст.н.} = M_{ст.н.}$.

Аналіз результатів показує, що при $\omega = \omega_n$ максимальна похибка коливається в межах 0,02 рад/с при $M_{ст.н.} = M_{ст.н.}$ до 0,21 рад/с при $M_{ст.н.} = 0,4M_{ст.н.}$, що відповідає 0,33% і 0,14% від встановленої швидкості.

Результати розподілу максимальних похибок струму електродвигуна при тих же варіаціях статичного моменту і швидкості (рис. 2) показують, що максимальне значення при $\omega = \omega_n$ коливаються від 68,9 при $M_{ст.н.} = M_{ст.н.}$ до 27,6 при $M_{ст.н.} = 0,4M_{ст.н.}$, що відповідає від 11,8% до 22,4% від значення струму.

Аналогічні дослідження проведені для швидкостей переміщення тягових канатів: $\omega = 0,6\omega_n$; $\omega = 0,3\omega_n$ при $M_{ст.н.} = 0,4M_{ст.н.}$ та $\omega = \omega_n$ для $M_{ст.н.} = M_{ст.н.}$; $M_{ст.н.} = 0,9M_{ст.н.}$; $M_{ст.н.} = 0,7M_{ст.н.}$; $M_{ст.н.} = 0,4M_{ст.н.}$. Результати приведені на рис. 4, 5 та в табл. 1.

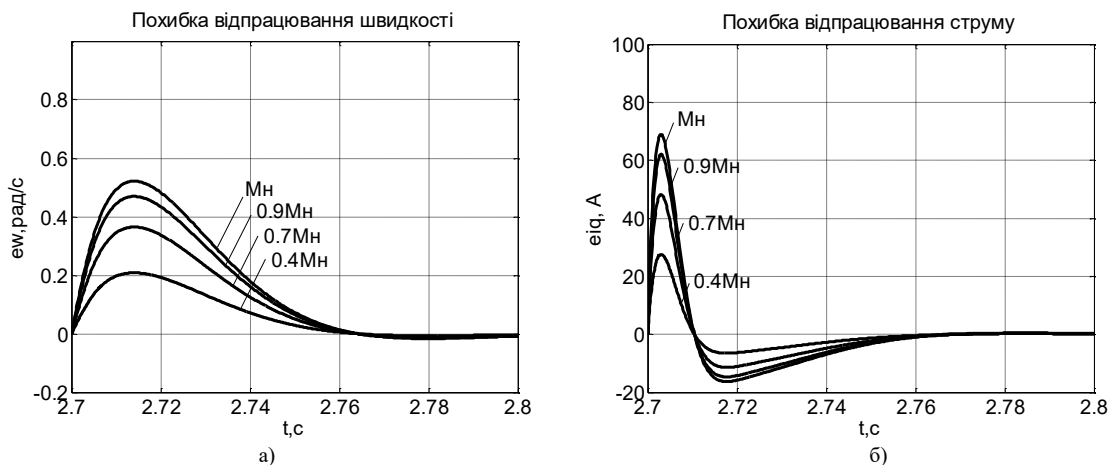


Рис. 4. Похибки відпрацювання швидкості (а) та струму (б) при варіації навантаження від $0,4M_{ст.н.}$ до $M_{ст.н.}$

Таблиця 1

Значення похибок при зміні заданих параметрів

ω	M	$\tilde{\omega}$	\tilde{i}	$\tilde{\omega}, \%$	$\tilde{i}, \%$
ω_H	M_H	0.52	68.9	0,33	11,82
$0.6 \cdot \omega_H$	M_H	0.52	68.9	0,56	11,91
$0.3 \cdot \omega_H$	M_H	0.52	68.9	1,12	12,06
ω_H	$0.9 \cdot M_H$	0.47	62	0,3	11,76
$0.6 \cdot \omega_H$	$0.9 \cdot M_H$	0.47	62	0,5	11,89
$0.3 \cdot \omega_H$	$0.9 \cdot M_H$	0.47	62	1,01	12,04
ω_H	$0.7 \cdot M_H$	0.365	48.25	0,23	11,68
$0.6 \cdot \omega_H$	$0.7 \cdot M_H$	0.365	48.25	0,39	11,83
$0.3 \cdot \omega_H$	$0.7 \cdot M_H$	0.365	48.25	0,78	12,01
ω_H	$0.4 \cdot M_H$	0.21	27.57	0,14	11,39
$0.6 \cdot \omega_H$	$0.4 \cdot M_H$	0.21	27.57	0,23	11,6
$0.3 \cdot \omega_H$	$0.4 \cdot M_H$	0.21	27.57	0,45	11,9

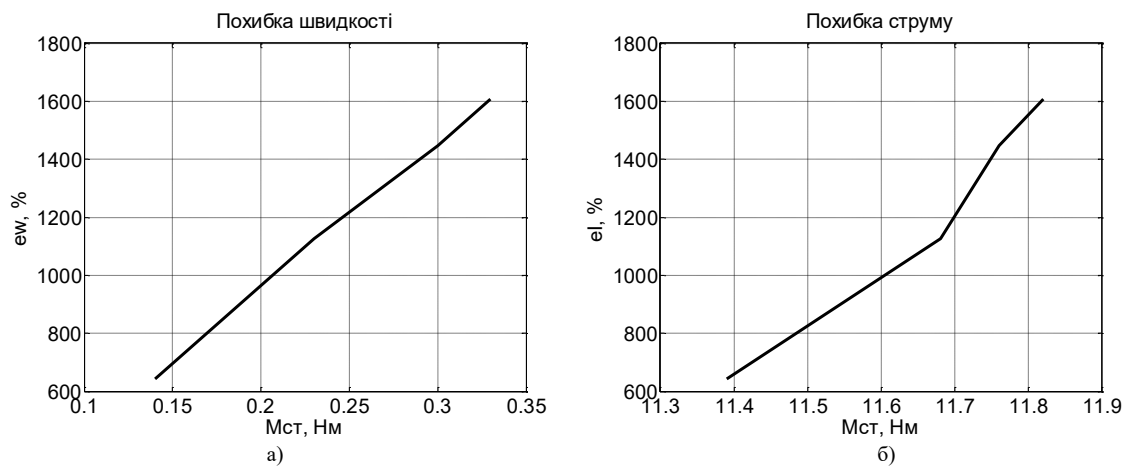


Рис. 5. Похибки відпрацювання швидкості (а) та струму (б) у відсотках зміні навантаження

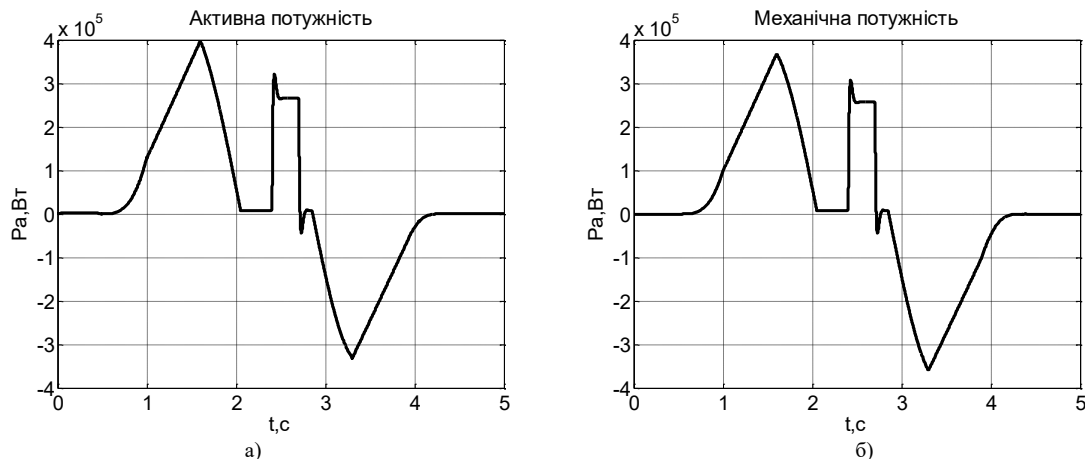
Результати показують, що при зміні швидкості руху в межах постійного навантаження, абсолютна величина максимальної динамічної похибки по швидкості залишається постійною. Відносна її величина коливається в середньому від 0,14% при $\omega = \omega_H$ і $M_{ст.} = 0,4 M_{ст.н.}$ до 1,12% при $\omega = 0,3\omega_H$ і $M_{ст.} = M_{ст.н.}$

Величина максимальної похибки за струмом за тих самих умов змінюється від 11,39% до 12,06%.

Час відпрацювання максимальної динамічної помилки за швидкістю та струмом знаходиться в межах 0,06 с.

Отримані результати дозволяють відзначити чітке відпрацювання максимальних помилок струму і швидкості в електромеханічній системі і не призводять до коливань в пружному тяговому органі конвеєра.

Результати досліджень енергетичних показників електромеханічної системи конвеєра наведено на рис. 6 - 8 та табл. 2.



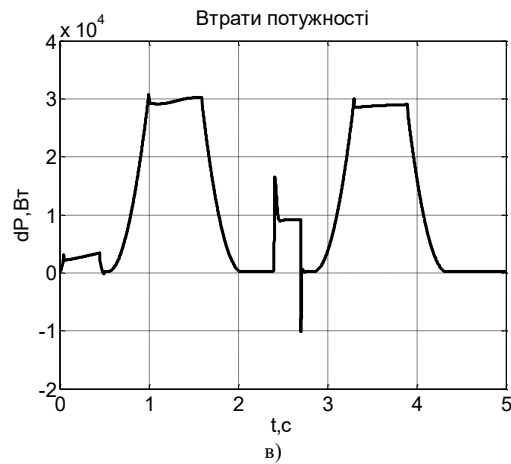


Рис. 6. Енергетичні показники при $M_{ct}=M_{ct.n.}$: а) – активна потужність P_a , б) – механічна потужність P_m , в) – втрати потужності ΔP

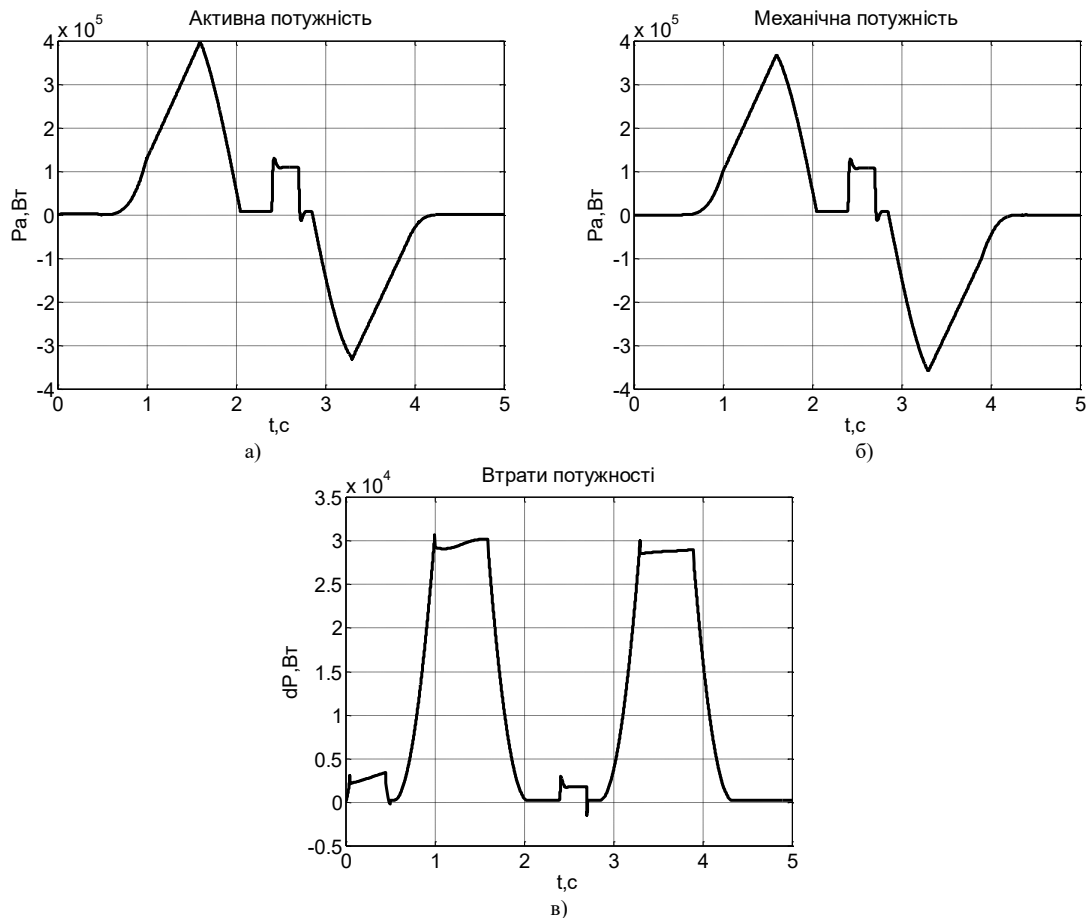


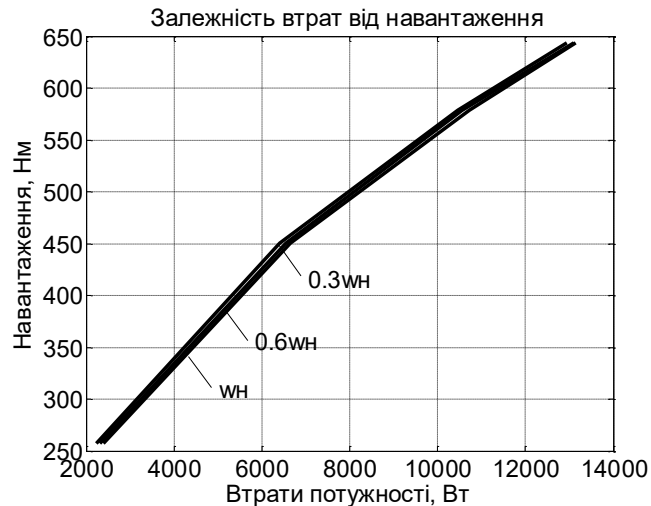
Рис. 7. Енергетичні показники при $M_{ct}=0,4M_{ct.n.}$: а) – активна потужність P_a , б) – механічна потужність P_m , в) – втрати потужності ΔP

Таблиця 2.

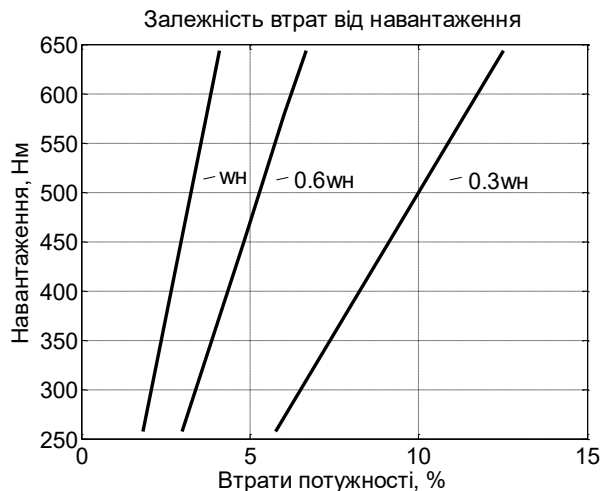
Розподіл втрат потужності ΔP_a

ω	M	$P_a, \text{Вт}$	$P_m, \text{Вт}$	$\Delta P, \text{Вт}$	$\Delta P, \%$
1	2	3	4	5	6
ω_H	M_H	321 240	308 100	13140	4,09
$0.6 \cdot \omega_H$	M_H	196 000	182 900	13100	6,68
$0.3 \cdot \omega_H$	M_H	103 400	90 450	12950	12,52
ω_H	$0.9 \cdot M_H$	288 800	278 080	10720	3,71
$0.6 \cdot \omega_H$	$0.9 \cdot M_H$	175 500	164 940	10560	6,02
$0.3 \cdot \omega_H$	$0.9 \cdot M_H$	92 000	81 530	10470	11,38

1	2	3	4	5	6
ω_H	$0.7 \cdot M_H$	224 640	218 000	6640	2,96
$0.6 \cdot \omega_H$	$0.7 \cdot M_H$	135 500	128 950	6550	4,83
$0.3 \cdot \omega_H$	$0.7 \cdot M_H$	70 060	64 650	6410	9,15
ω_H	$0.4 \cdot M_H$	130 150	127 750	2400	1,84
$0.6 \cdot \omega_H$	$0.4 \cdot M_H$	77 200	74 890	2310	2,99
$0.3 \cdot \omega_H$	$0.4 \cdot M_H$	38 970	36 730	2240	5,75



а)



б)

Рис. 8. а) – втрати потужності ΔP в абсолютних величинах, б) – втрати потужності $\Delta P\%$ при зміні навантаження та швидкості

У всьому діапазоні варіацій навантаження (від $0,4M_{ст.}$ до $M_{ст.н}$) та швидкості (від $0,3\omega_H$ до ω_H) втрати активної потужності коливаються від 1,84% при $\omega = \omega_H$ $M_{ст.} = 0,4M_{ст.н}$ до 12,52% при $\omega = 0,3\omega_H$ і $M_{ст.} = M_{ст.н}$.

У межах постійного моменту навантаження у разі зниження швидкості має місце тенденція до збільшення втрат активної потужності. Загалом рівень втрат активної потужності відповідає вимогам рівня енергетичної ефективності, що пред'являються до систем безперервного транспорту.

Висновки

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Застосування векторно-керованих асинхронних електродвигунів в електромеханічних системах стрічково-канатних конвеєрів забезпечує ефективний процес стабілізації швидкості тягового елемента, що унеможливує виникнення коливальних процесів у тяговому канаті. При цьому, максимальна динамічна помилка за швидкістю та струмом не перевищує відповідно $\tilde{\omega} = 1,1\%$ та $\tilde{i} = 12,06\%$. Час відпрацювання помилок не перевищує 0,06 с.

2. Аналіз характеру розподілу енергетичних характеристик у всьому діапазоні можливого за технологічними умовами режимів роботи транспортної системи показав, що втрати активної потужності ΔP_a

коливаються в межах від 1,84%, при номінальних параметрах роботи конвеєра до 12,52%, при зниженій швидкості руху тягового каната.

3. Використання електромеханічних систем стрічково-канатних конвеєрів з векторно – керованими асинхронними електродвигунами повною мірою відповідають вимогам технологічного процесу та режимів експлуатації транспортних систем безперервної дії та може бути рекомендовано до використання при модернізації діючих та проектуванні нових магістральних стрічково-канатних конвеєрів.

Література

1. Giezlotka, "Historia goznictwa", Wydwnictwo Noucowe Slask. Katowice, pp. 210, 2009
2. V.R. Bezhok, V.I. Dvornikov and I.G. Manets, "Mine elevation: Scientific-industrial publication", LLC "South-East Ltd." Donetsk T, vol. 624, 2007.
3. Печеник М.В., Бур'ян С.О., Наумчук Л.М. Дослідження втрати енергії в електромеханічних системах багатодвигунних стрічкових конвеєрів. Технічна електродинаміка. 2016. №3. С. 82-84.
4. М.В.Печеник, С.О.Бур'ян, Л.М.Наумчук, А.О.Грицай. Дослідження впливу оптимального регулятора напруги на рівень коливань у стрічці конвеєра. International scientific and technical conference, Ktelenchuk, НАУ, - №1/2016 – 298с.
5. Peresada, S. M., Kovbasa, S. N. Generalized algorithm of direct vector control of induction motor. ekhnichna elektrodynamika, 2002. №4. Pp. 17-22.
6. Pechenik, Mykola, et al. "Analysis of the Given Law Accuracy of a Mine Skip Lifting Unit Movement Using a Vector-Controlled Electric Drive System." 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). IEEE, 2020.
7. Pang, Yusong, and Gabriel Lodewijks. "Determining stress cycles for belt conveyor speed control in transient operations." 2016 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI). IEEE, 2016.
8. Pechinik, M., Pushkar, M., Burian, S., & Kazmina, L. "Investigation of energy characteristics of the electromechanical system in multi-motor conveyors under variation of traction load level on the belt." 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). IEEE, 2019.

References

1. Giezlotka, "Historia goznictwa", Wydwnictwo Noucowe Slask. Katowice, pp. 210, 2009
2. V.R. Bezhok, V.I. Dvornikov and I.G. Manets, "Mine elevation: Scientific-industrial publication", LLC "South-East Ltd." Donetsk T, vol. 624, 2007.
3. Pechenik M.V., Burian S.O., Naumchuk L. M. Research of energy modes of operation of a multi-engine belt conveyor. Tekhnichna Elektrodynamika. 2016. №3. P. 82-84. (Ukr)
4. M.V. Pechenik, S.O. Burian, L.M. Naumchuk, A.O. Hrytsai. Study of the influence of the optimal voltage regulator on the level of oscillations in the conveyor belt. International scientific and technical conference, Ktelenchuk, NAU, - No. 1/2016 – 298 p.
5. Peresada, S. M., Kovbasa, S. N. Generalized algorithm of direct vector control of induction motor. ekhnichna elektrodynamika, 2002. №4. Pp. 17-22.
6. Pechenik, Mykola, et al. "Analysis of the Given Law Accuracy of a Mine Skip Lifting Unit Movement Using a Vector-Controlled Electric Drive System." 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). IEEE, 2020.
7. Pang, Yusong, and Gabriel Lodewijks. "Determining stress cycles for belt conveyor speed control in transient operations." 2016 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI). IEEE, 2016.
8. Pechinik, M., Pushkar, M., Burian, S., & Kazmina, L. "Investigation of energy characteristics of the electromechanical system in multi-motor conveyors under variation of traction load level on the belt." 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). IEEE, 2019.