

Тиханська А.М.

Криворізький національний університет

Тиханський М.П.

Криворізький національний університет

КЕРУВАННЯ ВАЖКИМ СТРІЧКОВИМ КОНВЕЄРОМ З УРАХУВАННЯМ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЙОГО ОБЛАДНАННЯ

У статті представлено комплексний підхід до керування важким стрічковим конвеєром з урахуванням технічного стану його основних вузлів та механізмів. Актуальність дослідження зумовлена потребою підвищення надійності та ефективності роботи конвеєрних систем на гірничо-видобувних підприємствах, де нерівномірне зношування стрічки, роликів і барабанів призводить до аварійних простоїв та збільшує витрати на ремонт. Для запобігання передчасним відмовам обладнання та забезпечення безпечної експлуатації необхідне керування роботою конвеєра, що адаптується до поточного технічного стану його компонентів. У дослідженні проведено аналіз сучасних рішень і наукових праць у галузі конвеєрних технологій, а також теоретичне моделювання динамічних навантажень і зношування елементів конвеєра під час пуску та роботи під навантаженням. У рамках запропонованого підходу використано частотно-регульований електропривод для реалізації плавного запуску конвеєра та розроблено алгоритми моніторингу технічного стану, інтегровані в систему керування. Отримані результати демонструють, що впровадження інтелектуальної системи керування дозволяє істотно знизити динамічні навантаження на стрічку і механізми. Розроблено алгоритм автоматизованого плавного пуску конвеєра, який регулює прискорення та тягове зусилля з урахуванням маси вантажу на стрічці і ступеня її зносу. Це дозволяє уникнути різких ривків та пробуксовок під час запуску, зменшуючи пікові навантаження, що раніше вдвічі перевищували ustalений режим при традиційних методах пуску. Також запропоновано алгоритм регулювання швидкості руху стрічки та її натягу в процесі роботи конвеєра на основі безперервного моніторингу стану обладнання. Система контролю визначає, чи відбувається прослизання стрічки по барабану, відстежує перегрів підшипників і появу пошкоджень полотна стрічки та автоматично знижує швидкість або навантаження, чи навіть зупиняє конвеєр при наблизненні параметрів до критичних. Новизна отриманих результатів полягає в інтегрованому підході до керування: вперше запропоновано поєднати алгоритми плавного запуску і робочого руху конвеєра з безперервним відстеженням технічного стану стрічки та інших вузлів. Результати дослідження можуть бути впроваджені на підприємствах гірничої промисловості та інших галузях, де використовуються важкі стрічкові конвеєри, з метою підвищення їхньої ефективності та безпечності експлуатації.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, технічний стан, автоматизоване керування, пусковий режим, інтелектуальні системи, зношування стрічки, натяг стрічки, прослизання, частотно-регульований привід, моніторинг обладнання.

Постановка проблеми. Принципи керування стрічковим конвеєром на основі технічного стану його електромеханічного обладнання визначаються з урахуванням поточного стану ключових вузлів і механізмів. Оскільки окремі елементи конструкції мають похибки під час виробництва і монтажу, в процесі експлуатації вони зношуються нерівномірно. Це може призвести до аварійних відмов або скорочення міжремонтних інтервалів.

Відомо, що коригування режимів роботи конвеєра дає змогу знизити рівень пошкоджень його елементів. Регулювання таких параме-

трів, як швидкість транспортування, ступінь завантаження, натяг стрічки і тягове зусилля під час запуску навантаженого конвеєра, сприяє зменшенню навантажень, знижує знос стрічки і роликів. Цілеспрямована оптимізація режимних характеристик допомагає запобігти критичним перевантаженням.

У разі поздовжнього або поперечного розриву стрічки, перегріву підшипникових вузлів двигуна або редуктора, а також часткового руйнування футерування барабана зниження швидкості роботи конвеєра дасть змогу продовжити експлуатацію до завершення зміни та під

час профілактичного ремонту ухвалити економічно обґрунтоване рішення. Тому розробка принципів керування важким стрічковим конвеєром з урахуванням технічного стану його обладнання є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема ефективного управління стрічковими конвеєрами із врахуванням технічного стану обладнання набуває особливої актуальності останніми роками, з огляду на необхідність підвищення надійності, зниження експлуатаційних витрат та покращення умов роботи промислових підприємств. У сучасних наукових дослідженнях особливий акцент робиться на розробці методик моніторингу та діагностики технічного стану ключових вузлів конвеєрних систем.

Деякі науковці зосередились на керуванні швидкістю конвеєра. У роботі [1] запропоновані способи плавного запуску і зупинки за допомогою частотно-регульованих приводів, що дозволяє зменшити динамічні навантаження і знос стрічки. Схожі підходи розглядаються й у вітчизняних роботах [2], де аналізується, як зміна швидкості впливає на технічний стан і надійність системи.

Інша частина досліджень присвячена прогнозованому керуванню. Наприклад, у [3] для системи «конвеєр–дробарка» застосовується метод прогнозування керування (Model Predictive Control), який дозволяє уникати перевантаження. А в [4] описано використання алгоритмів машинного навчання (random forest) для технічного обслуговування приводу і редуктора, що дає змогу виявляти критичні зміни заздалегідь і запобігати аваріям.

Для оцінки зношення стрічки у [5] використовується мультиспектральне зображення в поєднанні з глибоким навчанням – така система працює навіть у складних умовах. Щодо роликів, у [6] продемонстровано ефективність алгоритмів градієнтного бустингу для виявлення пошкоджень оболонок та підшипників, а в [7] запропоновано метод на основі аналізу вібрацій, який адаптується до конкретних умов роботи.

Окремі дослідження зосереджені на більш комплексних підходах. У [8] розглядається застосування інтелектуальних систем контролю для своєчасного виявлення дефектів та регулювання робочих параметрів, що допомагає зменшити зношення. А в роботі [9] пропонується система, яка автоматично регулює роботу багаторівневих конвеєрних систем, орієнтуючись на їхній технічний стан, що підвищує енергоефективність і знижує ризики аварій.

Таким чином, аналіз сучасної літератури свідчить про наявність численних досліджень у сфері управління стрічковими конвеєрами з урахуванням технічного стану обладнання. Проте, комплексні системи, які в єдиній архітектурі враховують одночасно параметри керування, технічного стану і навантаження, залишаються перспективним напрямом для подальших досліджень і практичної реалізації.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у розробленні системи автоматизованого керування важким стрічковим конвеєром на основі комплексного врахування технічного стану його обладнання для підвищення надійності та ефективності роботи. Науковий фокус роботи спрямований на інтеграцію методів моніторингу технічного стану конвеєра з алгоритмами керування його режимами, що дозволяє знизити знос основних елементів і запобігти аварійним відмовам.

Виклад основного матеріалу. Оптимальне керування конвеєром на основі технічного стану його вузлів передбачає автоматичний вибір пріоритетного компонента, залежно від якого коригуються швидкість транспортування, натяг стрічки, рівень завантаження, а також перерозподіляється тягове зусилля між барабанами.

Відомо, що найдорожчою і водночас найменш надійною частиною системи є конвеєрна стрічка, термін служби якої визначається характером діючих навантажень і типами зносу. Вид зносу, своєю чергою, залежить від фракційного складу матеріалу, що транспортується.

Знос робочої обкладки конвеєрної стрічки під час транспортування вантажу мілких фракцій відбувається переважно через функціональну втому поверхневого шару, спричинену впливом ковзних виступів матеріалу. Згідно з теорією фрикційно-втомного зносу при пружному контакті, розробленою І.В. Крагельським, лінійна інтенсивність зносу визначається таким виразом:

$$J_l = \varepsilon \cdot H_{max} \cdot \eta_a / (V+1) \cdot n_f \cdot d_{av}$$

де J_l – лінійна інтенсивність зносу, що відображає співвідношення висоти зношеного шару до пройденого шляху тертя; ε – відносне зближення поверхні обкладки з виступами вантажу; H_{max} – максимальна висота виступів вантажу, мкм; η_a – фактична площа контакту, віднос. єдиний; V – показник шорсткості вантажу, який транспортується; n_f – число циклів до руйнування; d_{av} – середній діаметр плями контакту окремого виступу з поверхнею обкладки. Рівняння інтенсивності зносу для залізної руди набуває такого вигляду [10]:

$$J_l = 0,92 \cdot P_{nom}^{1+0,11t_d} \cdot E^{0,89t_d^{-1}} (f / \sigma_0)^{t_d}$$

У цьому виразі f – коефіцієнт тертя вантажу по обкладці; E – модуль пружності обкладки, Па; t_d – коефіцієнт динамічної витривалості обкладки; P_{nom} – номінальний тиск (навантаження).

З рівняння випливає, що знос стрічки залежить від навантаження нелінійним чином. Отже, зменшення навантаження, що не погіршує економічних показників, збільшує працездатність стрічки.

Наступною за рівнем надійності слабкою ланкою є ролики, до того ж найбільш вразливою їхньою частиною є підшипники.

Таким чином, керування режимами роботи конвеєра повинно насамперед забезпечувати захист стрічки і роликів від надлишкових навантажень, які можна мінімізувати за допомогою автоматизованої системи керування.

Особливо інтенсивний знос футерування барабана, неробочої обкладки стрічки й оболонок роликів спостерігається під час запуску конвеєра. Аналіз пускових режимів свідчить, що запуск стрічкових конвеєрів зазвичай відбувається або з підтримкою майже постійного моменту приводного двигуна, або шляхом контролю прискорення приводного барабана. Однак обидва ці методи супроводжуються значними динамічними зусиллями в стрічці, які можуть удвічі й більше разів перевищувати навантаження в усталеному режимі.

Запуск конвеєра під навантаженням часто викликає ривки та пробуксовки, що спричиняє руйнування стикових з'єднань стрічки та прискорений знос футерування барабана і нижнього шару обкладки стрічки. Основна причина цього – неефективність наявних пускових режимів і відсутність системи контролю натягу стрічки.

У початковий момент пуску приводний барабан швидко набирає окружну швидкість, яка незабаром зрівнюється зі швидкістю руху стрічки. Однак до того, як хвиля розтягування досягне приводного барабана по нижній гілці, прискорення барабана припиняється, а швидкість стрічки, навпаки, починає знижуватися. Різниця між цими швидкостями призводить до прослизання (пробуксовки) стрічки по поверхні барабана. Пробуксовка виникає в момент, коли окружне зусилля барабана $P = S_{in} - S_{out}$ досягає максимального значення, а натяг стрічки S_{out} у точці збігання з барабана різко зменшується.

Розглянемо наявні методи пуску стрічкового конвеєра з погляду впливу на знос стрічки і барабанів. Запуск конвеєра складається з двох етапів: початкового рушання і подальшого розгону. Для оцінки умов виникнення прослизання проаналізуємо перший спосіб запуску, за якого окружне зусилля приводного барабана у фазі рушання визначається таким виразом:

$$P(t) = E_0 du(0, t) / dx = \\ = \left(P_d + m_d g x / (1 + x) \cdot \left[1 - \exp \left(-\sqrt{E_0 \rho_e} / m_d \right) \right] \right).$$

При цьому, через швидке зменшення експоненціальної складової, для довгих і важких стрічкових конвеєрів до кінця фази рушання зусилля досягає максимального значення:

$$P_{max} \approx m_d g x / (1 + x)$$

де x – швидкість поширення пружної хвилі (для конвеєрів гірничих підприємств $0,7 < x < 1$, а отже, $0,4 < x / (1 + x) < 0,5$); q – інтенсивність сил опору, яка визначається як відношення сили опору руху стрічки на одиницю її довжини до приведеної погонної маси стрічки; m_d – зосереджена маса приводу; E_0 – агрегатна динамічна жорсткість стрічки; ρ_e – еквівалентна погонна маса моделі конвеєрної стрічки, яка визначається за формулами:

$$\rho_e = E_0 / a_e^2,$$

$$a_e = 2a_1 a_2 / (a_1 + a_2)$$

де a_1, a_2 – швидкості поширення хвилі деформації по навантаженій і порожній гілках.

У фазі розгону окружне зусилля приводного барабана визначається рівнянням руху приведеної маси приводу: $P_{circ} = P_d - m_d j_{mov}$, де j_{mov} – прискорення рухомих мас конвеєра. Максимальне зусилля P_{max} значно перевищує зусилля у фазі розгону, оскільки у фазі рушання сили опору руху підключаються поступово, що призводить до нерівномірних навантажень на систему.

Для режиму з постійним прискоренням приводного барабана конвеєра застосовують такі формули:

$$P_{circ} = P_0 + 2\rho_e l j = 2\rho_e l (q_e + j)$$

$$P_{max} = 2\rho_e l \left(q_e + j + \sqrt{j(q_e + j)} \right)$$

Максимальне окружне зусилля у фазі розгону значно перевищує P_{circ} при цьому в момент переходу від стадії рушання до стадії розгону спостерігається різкий стрибок навантаження.

Таким чином, до завершення фази рушення окружні зусилля і натяг стрічки в точці її входу на приводний барабан досягають граничних значень, які істотно перевищують аналогічні показники у фазі розгону і в сталому режимі роботи.

Подібні перевантаження призводять не тільки до прискореного зносу стрічки і футерування барабана, а й спричиняють деформацію стикувальних з'єднань, а також інтенсивні коливання тягового органу, що негативно позначається на стані роликів і підшипників, прискорюючи їхнє руйнування.

Пробуксовки, ривки та значні динамічні зусилля в стрічці під час запуску конвеєра зумовили необхідність розроблення алгоритмів автоматичного пуску, що враховують технічний стан стрічки та наявність вантажу на ній. Такі алгоритми мають забезпечувати плавний старт, знижуючи рівень навантажень у критичні моменти.

Як перший етап реалізації цього підходу необхідно визначити тип електроприводу, який дасть змогу забезпечити плавний запуск конвеєра й ефективне регулювання швидкості.

Найповніше вимогам, що висуваються, задовольняє частотно регульований електропривод.

З урахуванням поставлених завдань було сформульовано основні принципи, на основі яких розроблено алгоритм керування тяговим зусиллям. При цьому величина прискорення на різних ділянках розраховується з урахуванням наявності матеріалу на стрічці, гранулометричного складу вантажу (включно з умістом великих фракцій) та інтенсивності зносу конвеєрної стрічки. Моменти двигуна на етапах рушення і розгону також залежать від цих параметрів.

Оптимальним рішенням у фазі рушення є зниження пускового моменту приводного двигуна порівняно з фазою розгону. Це дасть змогу змен-

шити навантаження на стрічку і, отже, знизити її знос, особливо в області нижньої обкладки.

Діаграму рекомендованої залежності моменту і швидкості електродвигунів приводу в період запуску наведено на рис. 1.

Функціонування алгоритму (рис. 2) проходить у чотири послідовні етапи: підготовчий, розрахунок моменту двигуна у фазі розгону M_{eng2} , розрахунок моменту у фазі рушення M_{eng1} , запуск двигуна за керуючим сигналом.

На першому етапі вводяться вихідні дані, необхідні для визначення пускового прискорення і крутного моменту двигуна. Також оцінюється кількість вантажу на стрічці перед зупинкою і можлива маса найбільшого фрагмента матеріалу. Потім обчислюється середня лінійна P_{nom} (блок 3), на її основі – інтенсивність зносу обкладки стрічки (блок 4) і прискорення стрічки на другій ділянці пускової діаграми (блок 5):

$$J = ([P_{nom}] - P_{\Sigma})(q_n k_p [(1 + 0,486 m_p q_n^{-1}) g]^{-1} + m_k \sin \Delta \theta,$$

де $[P_{nom}]$ – допустиме навантаження на стрічку, n ; P_{Σ} – сумарне навантаження на стрічку:

$$P_{\Sigma} = (q_l + q_L + q_r) \cdot g \ell_p; \quad \Delta \theta = \theta_2 - \theta_1.$$

де q_l , q_L , q_r – лінійна маса, відповідно вантажу, стрічки, роликів верхньої гілки, кг/м.

На наступному етапі проводиться розрахунок відсутніх параметрів, необхідних для визначення моменту двигуна на основній ділянці розгону.

Зокрема, обчислюють приведену масу вантажу і рухомих частин конвеєра G_e (блок 6):

$$G_e = k_e (m_0 + k_g m_{rot} + m_L),$$

де k_e – коефіцієнт, що враховує подовження стрічки; m_0 – маса ходової частини конвеєра; m_{rot} – маса частин, що обертаються; m_L – маса вантажу на стрічці, кг; $k_g = 0,5 \div 0,9$ – коефіцієнт, який враховує, що колова швидкість мас, що обертаються, менша за швидкість стрічки.

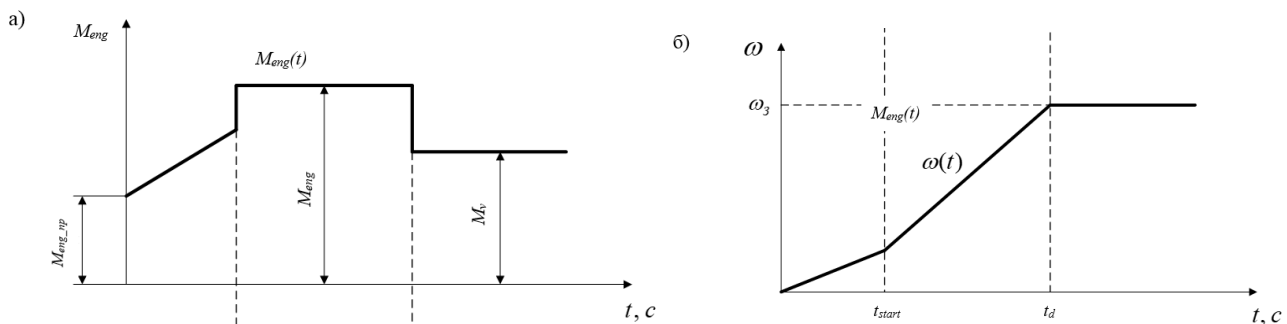


Рис. 1. Зміна режимів роботи двигуна під час пуску конвеєра:
а) зміна моменту двигуна; б) зміна швидкості двигуна

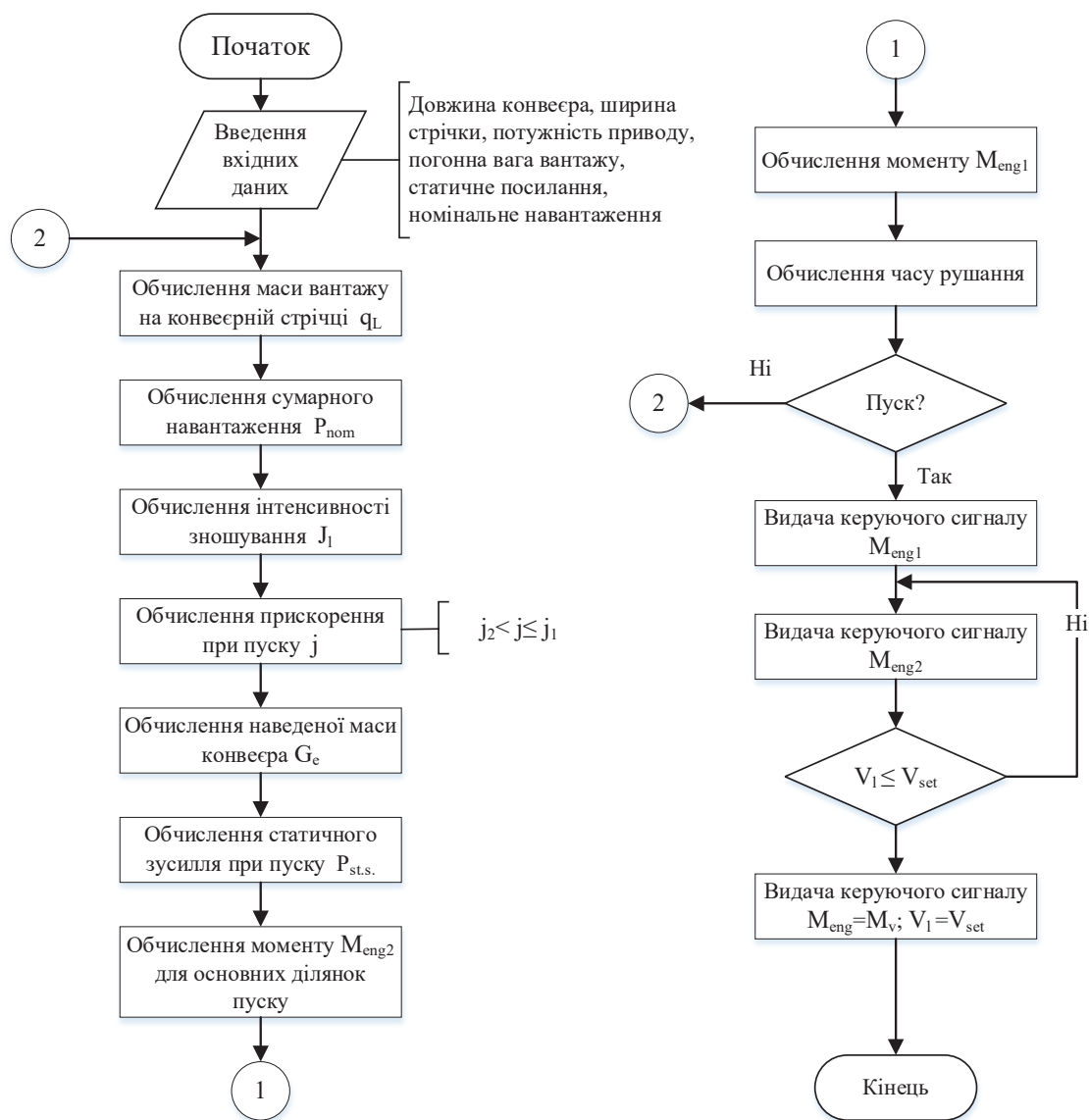


Рис. 2. Алгоритм формування закону керування пуском конвеєра

У блоці 7 визначається статичне зусилля в період пуску $P_{st.s.}$:

$$P_{st.s.} = q_l H + \omega_{st} (P - q_l H),$$

де q_l – лінійне навантаження конвеєра; P – тягове зусилля під час усталеного руху, н; H – висота підйому вантажу, м; ω_{st} – коефіцієнт статичних опорів тертя.

У блоці 9 проводиться остаточний розрахунок крутного моменту двигуна на основній ділянці розгону M_{eng2} :

$$M_{eng2} = j [D_0^{-1} (G_e D_0^2 + C_i (G_i D_i^2) \cdot i_0^2 \eta_0 + P_{st.s.} D_0) \cdot (2i_0 \eta_0)^{-1},$$

причому $M_{eng2} \leq 1,3 M$.

Після цього приступають до обчислення параметрів першої ділянки діаграми, а саме, моменту і тривалості першої фази пуску (рушення). Для обчислення часу рушення використовуємо

низку залежностей, наведених до досліджуваної задачі (блок 10):

$$x = 1 - 2\rho_e q_e l (M_{eng2} / D_0 - P_{circ,0})^{-1}$$

$$a_e = (E_0 / \rho_e)^{-1/2}; \quad t_{start} = 2La_e^{-1} (1 + 1/x),$$

де x – відносна швидкість пружної хвилі; ρ_e , Q_e – еквівалентні інтенсивності сил опору двигуна і погонна маса; $P_{circ,0}$ – початкове окружне зусилля; E_0 – динамічна агрегатна жорсткість стрічки; L – довжина конвеєра.

Потім обчислюють момент двигуна на ділянці рушення за відомою залежністю:

$$M_{eng1} = D_0 (i_0 \eta_0)^{-1} (m_d k x a_e + P_{circ,0} + k E_0 t),$$

$$\text{де } k = q_e x / a_e (1 - x^2)$$

Після цього запускають двигун і подають керуючий сигнал для реалізації фази рушення

(M_{eng2}, t_{start}). Після завершення цієї фази формується сигнал на розгін двигуна M_{eng2} . Паралельно контролюють процес розгону $V_b \leq V_{set}$ і забезпечують роботу приводу у встановлених режимах.

Такий поступовий запуск дає змогу не тільки захистити стрічку від надмірних навантажень, а й знизити знос роликів, барабанів і опорних конструкцій.

Швидкість руху стрічки, особливо якщо вона вже має певний знос або пошкодження, істотно впливає на подальший розвиток дефектів і прискорення зношування. Зниження швидкості транспортування в моменти підвищеного навантаження (наприклад, під час перевезення великогабаритного вантажу) або в разі прогресуючих ушкоджень – таких як руйнування кромки або поява «пробоїв» у покритті – допомагає продовжити термін служби стрічки та зберегти її працездатність.

На рисунку 3 наведено алгоритм керування швидкістю конвеєра і натягом стрічки відповідно до її технічного стану. Оскільки стан стрічки тісно пов'язаний зі станом приводних і відхиляючих барабанів, наявністю прослизання і технічним станом роликів, ці елементи розглядаються як єдина взаємопов'язана система [12, 13].

На початковому етапі здійснюють введення вихідних параметрів, необхідних для побудови алгоритму запуску конвеєра і подальшого регулювання його роботи. Зокрема, задають номінальну швидкість, швидкість обертання барабана і натяг стрічки.

Після цього перевіряють, чи відбувається прослизання стрічки на барабані. Для цього порівнюють швидкість руху стрічки на барабані та на робочій гілці. Якщо прослизання зафіксовано, оцінюють натяг стрічки і, за потреби, його коригують.

Далі контролюють технічний стан підшипникових вузлів барабана і оболонки. Окрему увагу приділяють самій стрічці – перевіряють наявність поздовжніх і поперечних розривів, а також розбіжність швів. Виявлені пошкодження порівнюють з допустимими або аварійними межами. Залежно від результатів, система формує команди на зниження швидкості, зменшення лінійного навантаження або повне відключення конвеєра.

Ступінь зносу стрічки визначається за спеціальним алгоритмом. Якщо знос досягає рівня, який ще дозволяє експлуатацію ($\delta_1 + \Delta$), навантаження на конвеєр знижують для полегшення умов роботи. Якщо ж знос наближається до

критичного ($\delta_1 + \Delta_d$), але є необхідність продовжити роботу до найближчого ремонту, формується додатковий сигнал на зниження швидкості транспортування.

Наступним важливим елементом є опорні ролики [13]. Їхній стан оцінюють за станом підшипників і зношеністю оболонки. Якщо кількість роликів з несправними підшипниками або сильно зношеними оболонками не перевищує допустиму норму, переходять на щадний режим експлуатації. Якщо ж пошкоджень більше – конвеєр переводять в аварійний режим або зупиняють.

Висновки. У результаті проведеного дослідження запропоновано підхід до автоматизованого керування важким стрічковим конвеєром з урахуванням технічного стану його обладнання. Розроблено алгоритми плавного пуску конвеєра з урахуванням зносу стрічки і навантаження, що дозволяють значно знизити динамічні навантаження на елементи системи. Це забезпечує зменшення інтенсивності зношування стрічки та роликів, знижує ризик аварійних відмов і підвищує загальну надійність конвеєрної лінії. Додатково, інтегроване регулювання швидкості та натягу стрічки на основі моніторингу її технічного стану дозволяє своєчасно виявляти погіршення стану обладнання та оперативно коригувати режими роботи. Досягнуто підвищення рівня автоматизації керування конвеєром, оскільки система самостійно адаптується до поточного стану вузлів без втручання оператора. Впровадження запропонованих рішень сприяє подовженню терміну служби основних компонентів та покращує техніко-економічні показники роботи транспортної системи. Втім, отримані результати є лише одним кроком у вирішенні проблеми, і окремі аспекти потребують подальших досліджень. Зокрема, актуальним є удосконалення алгоритмів пуску для різних умов експлуатації та типів конвеєрів, щоб забезпечити оптимальні режими розгону без перевантажень. Перспективним напрямом є впровадження нових матеріалів з підвищеною зносостійкістю для стрічок та роликів, що дозволить зменшити зношення і продовжити ресурс обладнання. Подальшого розвитку потребують інтегровані системи моніторингу технічного стану, здатні у реальному часі оцінювати параметри роботи конвеєра і прогнозувати виникнення несправностей. Поєднання таких систем з автоматизованим керуванням створить передумови для максимально надійної та ефективної роботи важких стрічкових конвеєрів.

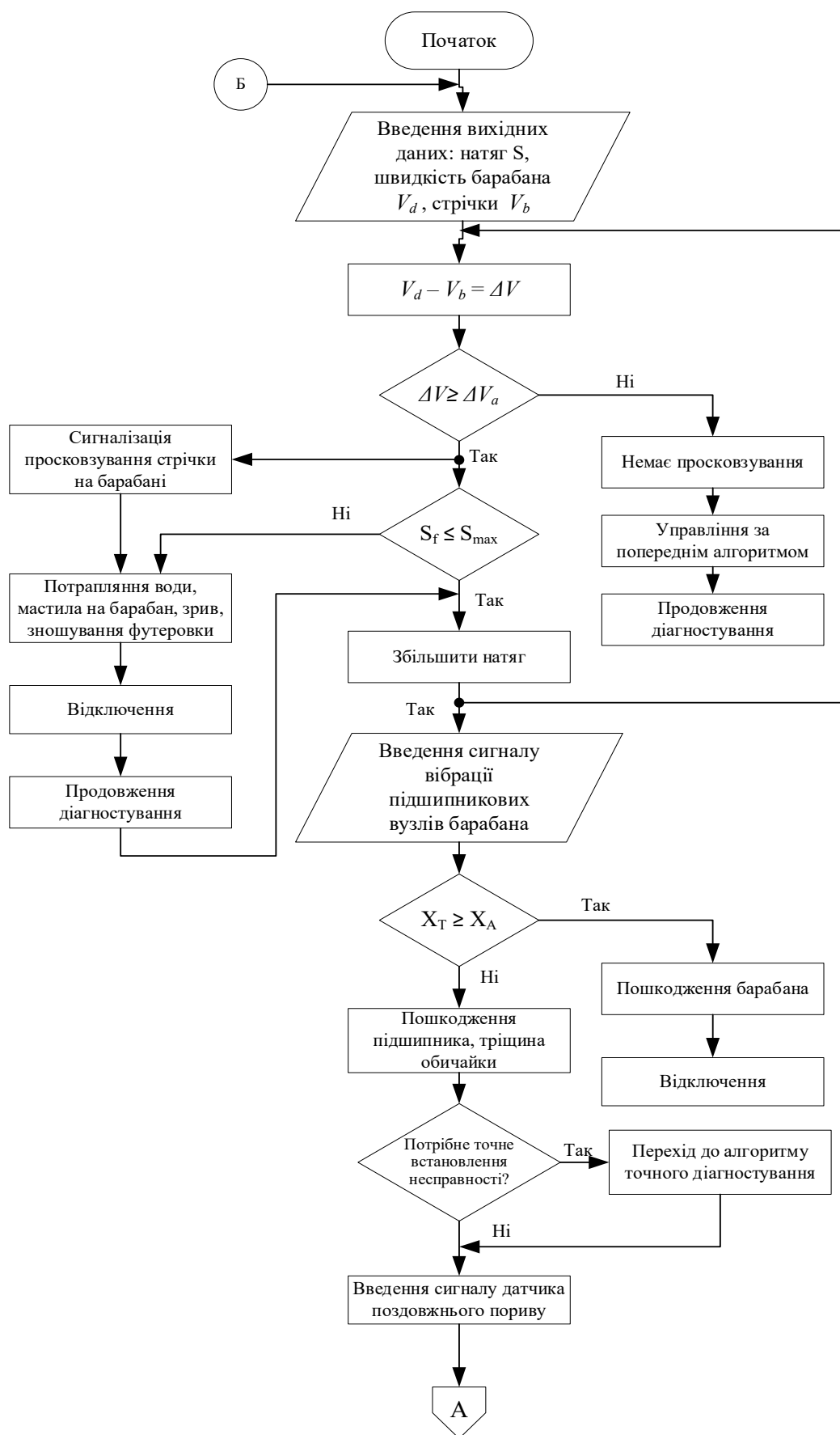


Рис. 3. Алгоритм формування керуючих сигналів за технічним станом елементів стрічкового конвеєра

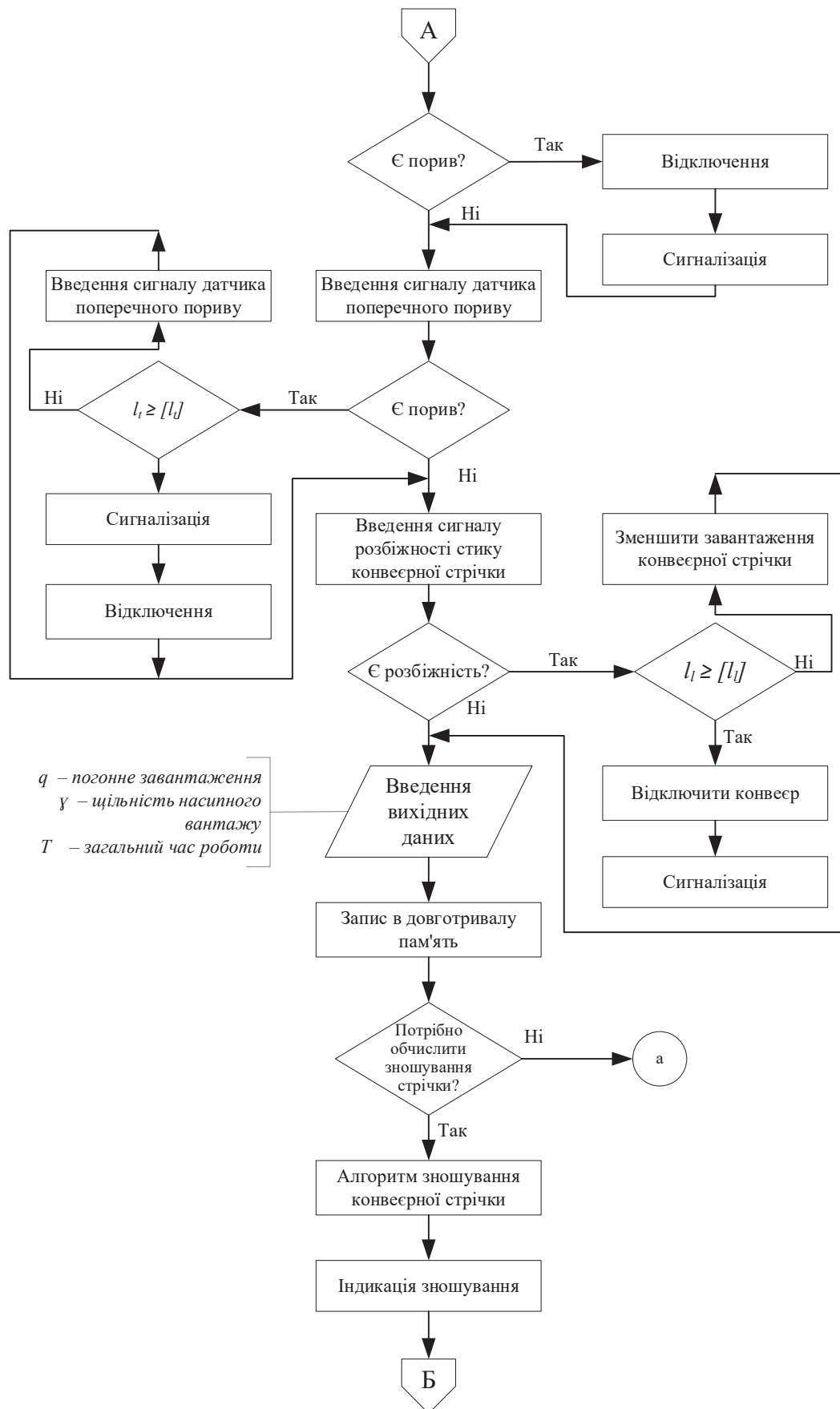


Рис. 3. Алгоритм формування керуючих сигналів за технічним станом елементів стрічкового конвеєра (продовження)

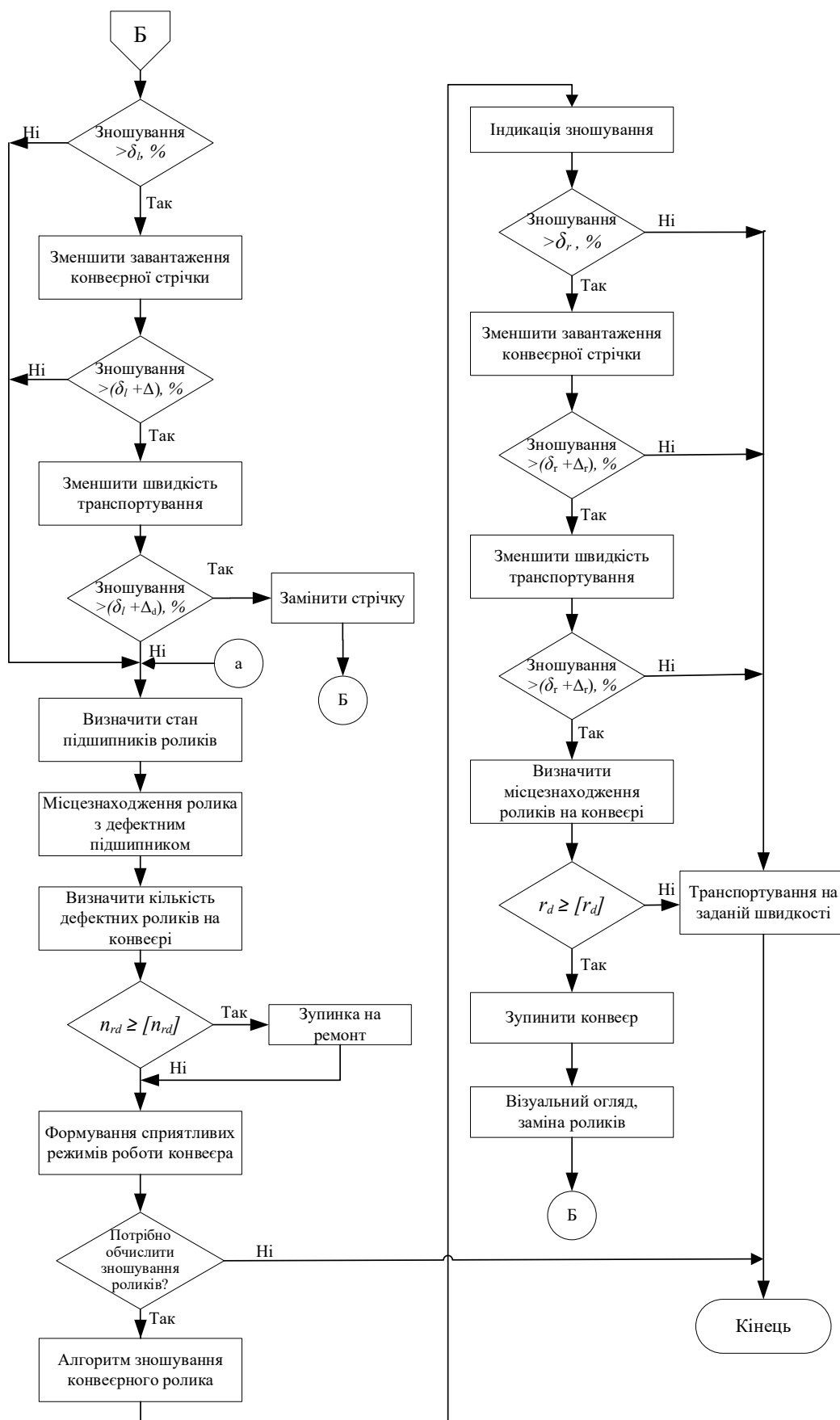


Рис. 3. Алгоритм формування керуючих сигналів за технічним станом елементів стрічкового конвеєра (продовження)

Список літератури:

1. He D., Pang Y., Lodewijks G. Speed control of belt conveyors during transient operation. *Powder Technology*. 2016. Vol. 301, P. 622–631. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.07.004.
2. Печеник М.В., Бур'ян С.О., Маліборський С.О. Аналіз характеру відпрацювання динамічної похибки за швидкістю електромеханічної системи, спричиненої штучною зміною навантаження в автоматизованому комплексі металообробки. *Вісник ВПІ*, 2021. Вип. 5, С. 103–107. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-103-107>
3. Zhang S., Mao W. Optimal operation of coal conveying systems assembled with crushers using model predictive control methodology. *Applied Energy*. 2017. Vol. 198, P. 65–76. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.037.
4. Wu M., Goh K.W., Chaw K.H., et al. An intelligent predictive maintenance system based on random forest for addressing industrial conveyor belt challenges. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 10. DOI: 10.3389/fmech.2024.1383202.
5. Zhou M., Chen Y., Hu F., Lai W., Gao L. A deep learning approach for accurate assessment of conveyor belt wear state based on multispectral imaging. *Optics & Laser Technology*. 2025. Vol. 181. Part B. 111782. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111782>.
6. Soares J.L.L., Costa T.B., Moura L.S., et al. Fault diagnosis of belt conveyor idlers based on gradient boosting decision tree. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 132. P. 3479–3488. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-024-13549-0>.
7. Liu X., He D., Lodewijks G., Pang Y., Mei J. Integrated decision making for predictive maintenance of belt conveyor systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. Vol. 188. P. 347–351. DOI: 10.1016/j.ress.2019.03.047.
8. Mahmood M. S., Shareef I. R. Applications of Artificial Intelligence for Smart Conveyor Belt Monitoring Systems: A Comprehensive Review. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. 2024. Vol. 57 (4). P. 1195–1206. DOI: 10.18280/jesa.570426.
9. Fei Zeng; Zhe-yang Xie. Coordinated Control System of Multi-Level Belt Conveyors for Promotion the Energy Efficiency Based on IoT-Technology. *5th International Conference on Information Science and Control Engineering, Zhengzhou, China*. 2018. DOI: 10.1109/ICISCE.2018.00145
10. Лобов В.Й., Єфіменко Л.І., Тиханський М.П., Рубан С.А. Автоматизовані системи керування конвеєрними установками : монографія. Кривий Ріг: Видавничий центр ДВНЗ “КНУ”, 2015. 450 с.
11. Тиханський М. П., Єфіменко Л. І., Тиханська А. М. Узгодження системи керування режимами роботи й системи діагностування технічного стану конвеєра. *Гірничий вісник*. 2017. Вип. 102. С. 129–134.
12. Єфіменко Л.І., Тиханський М.П., Тиханська А.М. Автоматичне керування конвеєрними установками з адаптацією за технічним станом його обладнання. *Вісник Криворізького національного університету*. 2020. Вип. 50. С.122–126. DOI: 10.31721/2306-5451-2020-1-50-122-126
13. Єфіменко Л.І., Тиханський М.П., Тиханська А.М. Структура блоку визначення технічного стану роликів стрічкового конвеєра оснащеного автоматичною системою керування. *Вісник Криворізького національного університету*. 2019. Вип. 49. С. 96–101.

Tykhanska A.M., Tykhanskyi M.P. CONTROL OF A HEAVY BELT CONVEYOR TAKING INTO ACCOUNT THE TECHNICAL CONDITION OF ITS EQUIPMENT

The article presents a comprehensive approach to the control of a heavy belt conveyor that takes into account the technical condition of its main units and mechanisms. The relevance of the study is due to the need to increase the reliability and efficiency of conveyor systems at mining enterprises, where uneven wear of the belt, rollers, and drums leads to unplanned downtimes and increased maintenance costs. To prevent premature equipment failures and ensure safe operation, the conveyor must be controlled in a way that adapts to the current technical condition of its components. The study includes an analysis of modern solutions and scientific works in the field of conveyor technologies, as well as theoretical modeling of dynamic loads and wear of conveyor elements during start-up and operation under load. As part of the proposed approach, a variable-frequency drive is used to enable smooth conveyor start-up, and algorithms for monitoring technical condition are developed and integrated into the control system.

The results show that the implementation of an intelligent control system significantly reduces dynamic loads on the belt and mechanical components. An algorithm for automated smooth conveyor start-up has been developed, which adjusts acceleration and traction force based on the load mass on the belt and its degree of wear. This avoids sharp jerks and slippage during start-up, reducing peak loads that previously exceeded

steady-state levels by up to two times under traditional start-up methods. An algorithm is also proposed for regulating belt speed and tension during conveyor operation, based on continuous monitoring of equipment condition. The control system detects whether slippage of the belt on the drum occurs, monitors overheating of bearings and the appearance of belt damage, and automatically reduces speed or load, or even stops the conveyor as critical thresholds are approached.

The novelty of the obtained results lies in the integrated control approach: for the first time, algorithms for both smooth start-up and steady-state operation of the conveyor are combined with continuous monitoring of the technical condition of the belt and other components. The research results can be implemented at mining enterprises and in other industries that use heavy belt conveyors, with the aim of improving their efficiency and operational safety.

Key words: belt conveyor, technical condition, automated control, start-up mode, intelligent systems, belt wear, belt tension, slippage, variable-frequency drive, equipment monitoring.