

УДК 621.867-83: 620.9

Ю.Г. ОСАДЧУК, Г.В. КРУТОВ, О.І. САВИЦЬКИЙ, кандидати. техн. наук, доц.,  
Є.Д. САПРИКІН, магістрант Криворізький національний університет,  
О.І. КОЧУБЕЙ, В.В. ВОЛЬЩИКОВ, ПАТ «Північний ГЗК»

## ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДІАПАЗОНУ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ КОНВЕЄРНИХ УСТАНОВОК В УМОВАХ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ СТРАТЕГІЇ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТІВ

Розглянуто актуальні питання, пов'язані з економічною ефективністю енергозберігаючих заходів щодо експлуатаційних режимів потужних конвеєрних установок гірничо-збагачувальних комбінатів. Конвеєрні установки центрально-поточної технології є одними з найбільш енерговитратних об'єктів гірничо-збагачувальних комбінатів. Підвищення енергоефективності конвеєрних установок обумовлюється використанням регульованих за швидкістю систем електроприводу, що дає можливість зменшити холостий обіг конвеєрів, підтримуючи одночасно рівень продуктивності, відповідний вхідному вантажопотоку з кар'єру. На основі досліджень фактичних характеристик кар'єрних вантажопотоків в статті з економічної точки зору обгрунтовано оптимальну глибину регулювання швидкості електроприводу конвеєра, що є важливою характеристикою з точки зору як експлуатаційних режимів роботи конвеєрних установок, так і вибору необхідної потужності обладнання для регульованого електроприводу. За результатами досліджень розроблено методику визначення економічно доцільного діапазону регулювання швидкості конвеєрів в умовах здійснення енергозберігаючої стратегії гірничо-збагачувальних комбінатів. Економічний ефект регулювання швидкості залежить від статистичних характеристик графіків продуктивності конвеєрних установок, одним із основних параметрів якої є коефіцієнт завантаження конвеєра. Регулювання швидкості конвеєрів доцільно при значеннях коефіцієнта завантаження не більших за 0,7-0,75. Економічний ефект має максимум при коефіцієнті завантаження конвеєра 0,35-0,4.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Енергоефективність та енергозбереження є пріоритетними напрямками енергетичної політики більшості країн світу. Актуальність проблеми енергозбереження в Україні обумовлюється високою енергоємністю виробництва, значною залежністю від імпорту енергоносіїв. Причиною високої енергоємності є застаріле та енерговитратне обладнання значної частини вітчизняних підприємств, відсутність достатніх фінансових ресурсів для модернізації обладнання, розпорошеність законодавчої бази, низька ефективність менеджменту [1]. Для ефективної реалізації енергозберігаючої стратегії на рівні підприємств питання енергозбереження повинні розглядатися не як окрема (самостійна) функція якого-небудь відділу або служби, а як невід'ємний елемент діяльності всього підприємства в цілому. Концепція управління енергозбереженням повинна стати однією із основних складових системного підходу до керування підприємством на всіх рівнях управління.

Безумовно, що енергозберігаюча стратегія потребує значних капіталовкладень на сучасні технології, переозброєння сучасним енергозберігаючим обладнанням, енергозберігаючі будівельні матеріали і т.п. Іншим важливим напрямом енергозбереження слід вважати ефективне поточне управління виробничими процесами (виробничий менеджмент), орієнтоване в тому числі на енергозбереження.

На гірничо-збагачувальних підприємствах Криворізького басейну значного поширення набули потужні конвеєрні установки, використовувані для транспортування руди та скельної породи з кар'єрів на об'єкти поверхневого комплексу. Крім того, практично всі операції по внутрішньовиробничому переміщенню руди та концентрату виконуються з використанням конвеєрного транспорту. Середній рівень енерговитрат на транспортні операції сировини і готової продукції в умовах гірничо-збагачувальних комбінатів становить 18-20 % від сумарного енергоспоживання. Встановлена потужність приводних електродвигунів найбільш енергоємних конвеєрних установок досягає 3-4 МВт на конвеєр, при цьому транспортування руди з кар'єру на поверхню здійснюється за 2-3-стадійною схемою, враховуючи гірничо-геологічні умови кар'єра.

Основний резерв підвищення енергоефективності конвеєрних установок гірничо-збагачувальних комбінатів обумовлений застосуванням нерегульованих за швидкістю систем електроприводу, проектні рішення по яких приймалися без урахування завдань енергозбереження. Проекти останніх років стали передбачати можливість регулювання швидкості потужних конвеєрів, проте ряд експлуатаційних факторів перешкоджає широкому впровадженню в практику режимів енергозберігаючого регулювання швидкості.

Ритмічність роботи конвеєрних установок щодо транспортування гірничої маси з кар'єру в знач-

ній мірі визначається характером внутрішньокар'єрних вантажопотоків, що формуються в умовах існуючої технології відкритих гірничих робіт і центрально-поточної технології (ЦПТ) доставки.

Досвід експлуатації кар'єрів Криворізького басейну свідчить про наявність великих коливань фактичної продуктивності вантажопотоку, що надходить до конвеєрних установок ЦПТ [7]. Нерівномірність надходження руди до конвеєрів обумовлює змінний режим роботи конвеєра, який в умовах нерегульованої швидкості характеризується нерівномірністю завантаження стрічки конвеєра, фактичні значення якої, як правило, набагато нижче номінального (проектного) значення. Недовантаження конвеєра призводить до того, що значна частина електроенергії, що витрачається на привод конвеєра, використовується вхолосту. У практиці експлуатації конвеєрні установки працюють на номінальній швидкості навіть при відсутності руди по всій довжині конвеєра. Якщо цей період роботи не збігається з періодом регламентованих перерв, конвеєр не зупиняють.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Відомі публікації вітчизняних і зарубіжних авторів щодо необхідності та ефективності різних способів регулювання швидкості конвеєрних установок. Ці питання детально розглядалися в роботах [2-6]. Основні напрями досліджень присвячені наступним аспектам:

- обґрунтуванню застосовуваних систем електроприводу конвеєрних установок;
- вибору перетворювачів частоти для регулювання швидкості приводного електродвигуна;
- розробці систем автоматичного управління розгалуженими конвеєрними лініями;
- забезпеченню сприятливих пускових режимів стрічкових конвеєрів;
- впливу швидкості конвеєра на знос стрічки;
- управлінню багатодвигунним електроприводом конвеєрного транспорту.

Однак питання обґрунтування необхідного діапазону регулювання швидкості конвеєрних установок досліджені недостатньо. Особливо важливим в нинішніх умовах є економічний аспект проблеми, враховуючи те, що для більшості конвеєрних установок, що експлуатуються в Криворізькому басейні, забезпечення режиму регулювання швидкості пов'язано з необхідністю інвестиційних витрат.

**Викладення матеріалу та результати.** Дослідженнями, виконаними в умовах Ганнівського та Першотравневого кар'єрів ПАТ «Північний ГЗК», визначені статистичні характеристики нерівномірності вантажопотоку, що надходить на конвеєрні установки.

Гістограми розподілу фактичних навантажень по руді і скельній породі (годинна продуктивність) за аналізом репрезентативних вибірок представлені на рис. 1-2.



Рис. 1. Гістограма розподілу навантажень Першотравневого кар'єру: а - по руді; б - по скельній породі

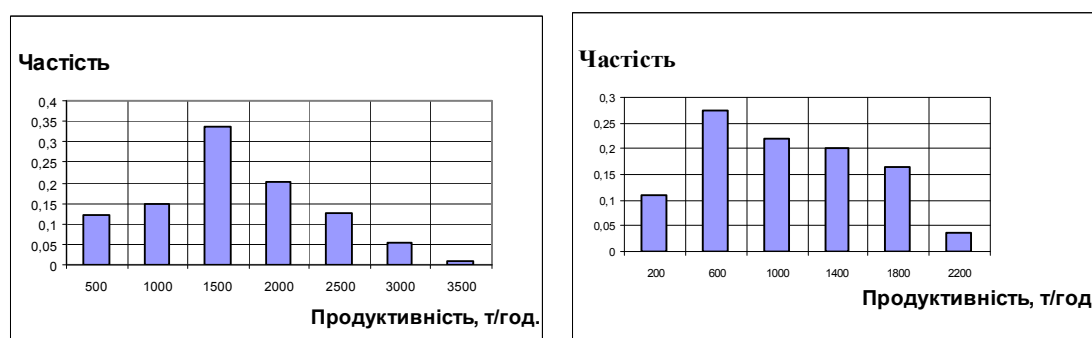


Рис. 2. Гістограма розподілу навантажень Ганнівського кар'єру: а - по руді; б - по скельній породі

Представлені дані свідчать про те, що навантаження конвеєрних установок змінюються в широкому діапазоні продуктивностей, що зумовлює необхідність дослідження економічно доцільного діапазону регулювання швидкості конвеєрів.

Вид гістограм дозволяє розглядати гіпотезу про відповідність емпіричного розподілу навантажень по руді нормальному закону; а розподіл навантажень по скельній породі не має узагальнюючої для апроксимації властивості.

Порівняння цих режимів, як за інтенсивністю, так і за часом роботи конвеєра, говорить про те, що визначальним з точки зору параметрів використовуваного обладнання та граничних режимів експлуатації слід вважати режим навантажень по руді.

Враховуючи те, що один і той самий конвеєр, згідно з технологією, може працювати в певні періоди часу по руді, в інші періоди часу – з видачі скельної породи, надалі будемо досліджувати можливості регулювання швидкості щодо режимів по руді, як більш напружених (з точки зору експлуатаційних параметрів), так і більш енерговитратних. При цьому будемо вважати, що нижня межа регулювання швидкості конвеєра для режиму по скельній породі збігається з мінімальним значенням швидкості для режиму по руді, так як для забезпечення таких режимів регулювання буде використано одне й те саме обладнання.

Для визначення необхідного діапазону регулювання швидкості конвеєра скористаємося статистичними даними навантажень по руді для умов Першотравневого кар'єру, визначивши показники фактичних навантажень у відносних одиницях до номінальної (паспортної) продуктивності конвеєра, яка становить  $Q_n = 4000$  т/год.

Для визначення економічно доцільного діапазону регулювання швидкості конвеєра приймемо такі припущення:

1. У діапазоні швидкостей від номінальної  $v_n$  до обраної мінімальної  $v_{min}$  швидкості регулювання конвеєра погонне навантаження 1 м стрічки конвеєра вважаємо постійним, тобто продуктивність конвеєра  $Q$  в цьому діапазоні пропорційна швидкості конвеєра  $v$ . Продуктивність конвеєра в граничній точці діапазону пропорційна мінімальній швидкості діапазону регулювання

$$Q_0 = Q_n \cdot v_{min} / v_n.$$

У відносних одиницях  $Q_0^* = v_{min}^*$ .

2. У діапазоні продуктивностей від 0 до  $Q_0$  швидкість конвеєра не регулюється і залишається рівною  $v_{min}$ .

3. Капітальні витрати на реалізацію режиму регулювання швидкості для номінальних параметрів електропривода (3x1000кВт) визначатимемо у вигляді суми постійної частини (що не залежить від обраного діапазону)  $A$  і змінної частини витрат, пропорційної діапазону регулювання швидкості, з коефіцієнтом  $B$

$$K = A + B \cdot \left( \frac{v_n - v_{min}}{v_n} \right) = A + B \cdot (1 - v_{min}^*),$$

а експлуатаційні витрати (річні) щодо забезпечення режиму регулювання швидкості будемо вважати постійними (незалежними від діапазону):  $Z_{експл.} = C$ .

Складові витрат  $A, B$  приймаємо виходячи з таких міркувань: змінні витрати, залежні від діапазону регулювання швидкості, відповідають потужності електрообладнання, що встановлюється в роторному ланцюзі двигуна стосовно до електроприводу за системою асинхронно-вентильного каскаду (АВК). Чим глибше регулюється швидкість АВК, тим більш потужними повинні бути випрямляч, інвертор і трансформатор. Постійна складова капітальних витрат відповідає вартості придбання, монтажу та наладки системи управління (програмований контролер, додатково встановлювані датчики та ін.), вартість якої не залежить від потужності устаткування.

Приймаємо вартість системи управління  $A = 400$  тис. грн, що відповідає ціні і вартості монтажно-налагоджувальних робіт для контролерів фірми «Schneider Electric». Вартість 3-х комплектів обладнання (3-двигунний електропривод) в роторному ланцюзі двигуна, виходячи з максимальної глибини регулювання швидкості, складає (з урахуванням монтажно-налагоджувальних робіт)  $B = 4500$  тис. грн. Річні експлуатаційні витрати з обслуговування цього обладнання, виходячи з досвіду експлуатації, приймаємо рівними  $C = 100$  тис. грн.

Залежність споживаної потужності приводу конвеєра від навантаження (по продуктивності) при незмінній швидкості має вигляд [8]

$$N_1 = N_{xx} + b \cdot Q$$

де  $N_{xx}$  - потужність холостого ходу конвеєра;  $b$  - коефіцієнт пропорційності;  $Q$  - продуктивність.

Відносне зниження споживаної потужності приводом конвеєра при регулюванні швидкості вниз від номінальної визначається за формулою [8]

$$\Delta N^* = N_{xx}^* \cdot (1 - v^*).$$

Тоді залежність споживаної потужності приводом конвеєра у відносних одиницях від навантаження (по продуктивності) при регульованій швидкості і незмінному погонному навантаженні має вигляд

$$N_2^* = N_1^* - \Delta N^* = Q^* \cdot (b + N_{xx}^*).$$

Середнє значення споживаної потужності приводом конвеєра за певний, досить тривалий період часу (при регулюванні швидкості вниз від номінальної до граничного значення  $v_{min}$  і незмінній швидкості при  $Q < Q_0$ ), можна визначити, використовуючи фактичну статистику навантажень, за формулою

$$N_{cp.} = \int_0^{Q_0} N_1(Q) p(Q) dQ + \int_{Q_0}^{Q_n} N_2(Q) p(Q) dQ$$

де  $p(Q)$  - щільність ймовірності розподілу навантажень конвеєра (відповідно до гістограми емпіричних значень продуктивності).

В якості критеріального показника вибираємо мінімум сумарних приведених витрат, враховуючи що капітальні витрати приводяться з коефіцієнтом нормативної ефективності  $\alpha = 0,15$ :

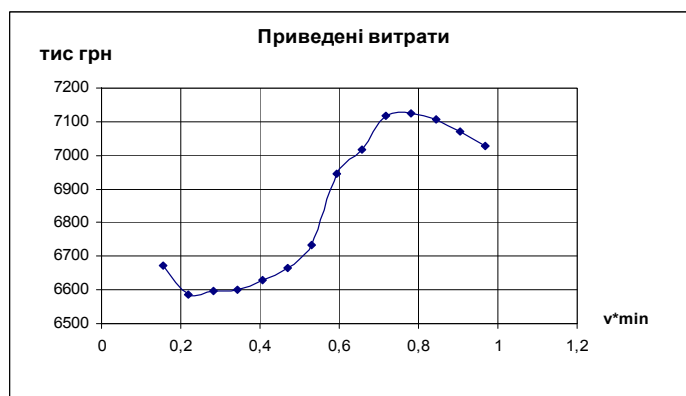
$$Z_{np.}(Q) = N_{cp.}(Q) \cdot T_{год.} \cdot \tau + \alpha \cdot K(Q) + Z_{експ.}$$

де  $T_{год.}$  - кількість годин роботи конвеєра на рік (приймаємо  $T_{год.} = 8000$  год.);  $\tau$  - тариф 1 кВт години електричної енергії (приймаємо  $\tau =$  грн/кВт год.).

Функція, що мінімізується, має вигляд

$$Z_{np.}(Q) = \tau \cdot T_{год.} \cdot \left[ \int_0^Q [N_1(Q) p(Q)] dQ + \int_Q^{Q_n} [N_2(Q) p(Q)] dQ \right] + \alpha \cdot \left( A + B \frac{Q_n - Q}{Q_n} \right) + C \longrightarrow \min$$

На рис. 3 наведено графік залежності приведених витрат для фактичного розподілу навантажень по продуктивності конвеєра.



**Рис. 3.** Графік залежності приведених витрат від мінімальної швидкості діапазону для умов навантажень конвеєра за фактичними даними

Виходячи з наведених даних, мінімальне значення відповідає швидкості  $v^*_{min} = 0,219$  і, таким чином, економічно доцільний (оптимальний) діапазон регулювання швидкості становить

$$D = 1 - 0,219 = 0,781$$

або 78,1% вниз від номінальної швидкості.

Наведені витрати становлять

$$Z_{np. min} = 6585,57 \text{ тис. грн.}$$

Економічний ефект (різниця приведених витрат відносно базового варіанту - без регулювання швидкості) дорівнює  $E = 442,5$  тис. грн.

Для узагальнення отриманих результатів виконаємо імітаційне моделювання оптимального діапазону регулювання швидкості, згідно із запропонованою методикою, варіюючи показники коефіцієнта завантаження конвеєра  $k_{зав.} = Q_{сеп.}/Q_n$  і середньоквадратичного відхилення  $\sigma^* = \sigma/Q_{сеп.}$

На рис. 4-5 представлені графіки залежностей оптимального діапазону  $D$  регулювання швидкості конвеєрів, а також відносного значення економічного ефекту  $E^*$  від варійованих параметрів.

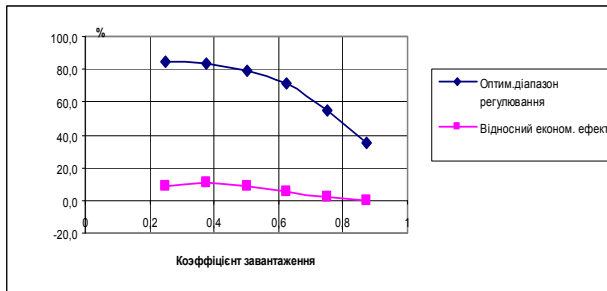


Рис. 4. Графіки залежності оптимального діапазону регулювання швидкості і відносного економічного ефекту від коефіцієнта завантаження

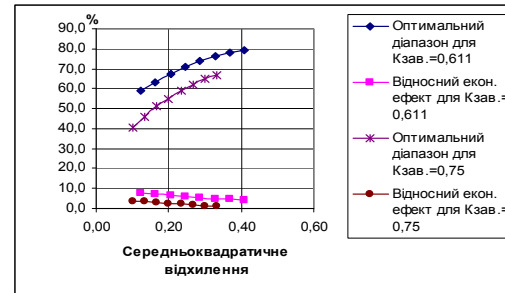


Рис. 5. Графіки залежності оптимального діапазону регулювання швидкості і відносного економічного ефекту від варіації навантаження конвеєра

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** У результаті аналізу графіків можна зробити висновок, що регулювання швидкості конвеєрів доцільно при значеннях середнього навантаження  $Q_{ср.} < (0,7-0,75)Q_n$ . Відносний економічний ефект має максимум при  $k_{зав.} = 0,35-0,4$ .

Збільшення варіації навантаження конвеєрів призводить до необхідності збільшення діапазону регулювання швидкості, при цьому відносний економічний ефект знижується.

У будь-якому випадку для підвищення ефективності регулювання швидкості конвеєрів необхідно вживати заходів для стабілізації вхідного вантажопотоку (зниження варіації навантаження).

При незмінному середньому значенні навантаження конвеєра і зниженні в 2 рази середнього квадратичного відхилення економічний ефект регулювання швидкості зростає в 1,7-2,0 рази, а діапазон регулювання швидкості конвеєра може бути скорочений на 15-20%.

#### Список літератури

1. Мазур І. Энергоемність валового внутрішнього продукту України: передумови зниження // Вісник ТНЕУ. – 2012. – №1. – С.54-71.
2. Черемушкина М.С., Козярук А.Е. Повышение безопасности и эффективности управления многодвигательным электроприводом конвейерного транспорта // В сб.: Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т.2. – 2007. – С. 108-112.
3. Назаренко В.М., Савицкий А.И., Сокольников Ю.А. Система управления регулируемым приводом тяжелых ленточных конвейеров // Горная электромеханика и автоматика. – 1985. – №46. – С. 84-90.
4. Волотковский В.С. и др., Износ и долговечность конвейерных лент. – М.: Недра, 1976. – 174с.
5. Кречнев Э.Г., Селищев Ю.А. Об экономической эффективности применения регулируемых приводов в ленточных типажных конвейерах // В сб.: Конвейерный и рельсовый транспорт в горной промышленности. – 1968. – С. 81-87.
6. Бабочкин Г.И. Энергосбережение в электроприводе конвейера // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2002. – №1. – С. 122-125.
7. Назаренко В.М. О колебании грузопотоков поточно-транспортных систем дробильных фабрик ГОКов // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 1977. – №9. – С. 138-143.
8. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: В 5 книгах: Практик. пособие / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Высшая школа, 1989. – Кн. 2: Энергосбережение в электроприводе / Н.Ф. Ильинский, Ю.В. Рожанковский, А.О. Горнов. – 127 с.

Рукопис подано до редакції 06.01.14

УДК 622.235: 622.271

К.А. ФЕДИН, аспирант, «Криворожский национальный университет

### ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПОРОДНЫХ УСТУПОВ

С учетом анализа ранее выполненных работ, получены аналитические выражения для определения степени устойчивости открытых горных выработок с учетом сейсмического воздействия на них массовых взрывов. Определены параметры БВР, использование которых обеспечивает долговременную устойчивость уступов и групп уступов на карьерах.

**Постановка научной задачи.** Степень устойчивости открытых горных выработок определяется, как правило, либо при проектировании горных предприятий, либо при их реконструк-