

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ГІРНИЧИХ РОБІТ

УДК 621.311.004.18

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ШАХТНИХ ПІДЙОМНИХ УСТАНОВОК ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМАЛЬНОГО ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

*В. С. Лісовський, канд. техн. наук, О. М. Закладний, канд. техн. наук,
Т. М. Тимченко, асп. (НТУУ „КПІ”)*

Рассмотрены пути экономии электроэнергии в подъемных установках, одним из которых является оптимизация диаграммы скорости. Предложена методика нахождения оптимальных значений массы противовеса и линейной плотности (погонной массы) уравновешивающего каната при заданном режиме работы шахтной подъемной установки и неизменности значений других параметров. Построены графики функций энергопотребления для систем электропривода с движущим и рекуперативным режимами торможения. Предложены структурные схемы алгоритма оптимизации.

Підйомні установки є одним з основних споживачів електроенергії на шахтах. Шляхи економії електроенергії в підйомних установках: виконання оптимальної діаграми швидкості; забезпечення нормованого завантаження підйомних ємностей; ліквідація або скорочення часу роботи на неробочому ході; контроль стану підйомних ємностей; застосування досконалих видів електроприводу; специфічні способи, обумовлені типом електроприводу. На енергоспоживання діючих шахтних підйомних установок (ШПУ) впливають маси вантажів, що піднімаються і опускаються, маси противаг, головних та зрівноважувальних канатів, а також параметри тахограми.

Оптимальною діаграмою швидкості з погляду витрати електроенергії буде та, де множник швидкості приймає найменше значення:

$$\lambda = \frac{V_{\max}}{V_{\text{сеп}}} = \frac{V_{\max} T_n}{H_n}, \quad (1)$$

де V_{\max} і $V_{\text{сеп}}$ – максимальна і середня швидкості руху підйомної ємності; H_n і T_n – висота і час підйому посудини.

Оптимальну діаграму швидкості можна одержати збільшенням прискорення при запуску і уповільненні при гальмуванні, а також збільшенням в припустимих межах максимальної швидкості підйому. Виконання оптимальної діаграми швидкості забезпечується повною автоматизацією керування, в результаті чого підвищується продуктивність установки і зводиться до мінімуму витрата електроенергії. Для перевірки відповідності фактичної діаграми швидкості оптимальній необхідно не рідше одного разу в

підріччя виконувати вимірювання графіка швидкості з подальшою корекцією параметрів при їх відхиленні у схемі керування установкою.

При недовантаженні скіпів і вагонеток при видачі гірничої маси, неповному завантаженні клітей при спуску-підйомі людей нераціональна витрата електроенергії складе

$$\Delta W = W_{\text{н}} n_{\text{нр}}, \quad (2)$$

де $W_{\text{н}} = W_{\text{доб}}/n_{\text{ф}}$ – витрата електроенергії за один цикл підйому; $W_{\text{доб}}$ – добове споживання електроенергії підйомної установки (визначається за показниками лічильника активної енергії); $n_{\text{ф}}$ – фактичне число підйомів за добу; $n_{\text{нр}} = n_{\text{ф}} \cdot n_{\text{рнн}}$ – нераціональне число циклів підйому за розрахунковий період часу T ; $n_{\text{рнн}} = \frac{A_{\text{ф}}}{Q_{\text{норм}}}$ – раціональне число циклів підйому за розрахунковий період

при нормованому завантаженні підйомної ємності; $A_{\text{ф}}$ – фактична кількість виданої гірничої маси за розрахунковий період; $Q_{\text{норм}}$ – нормована вантажо-підйомність підйомної ємності.

Робота на холостому ходу пов'язана зі збільшенням кількості нераціональних циклів і додатковою витратою електроенергії. Для її усунення необхідно мати графік роботи підйомної установки і строго його дотримуватися.

У результаті налипання гірничої маси на внутрішню поверхню скіпа зменшується його фактична ємність і, як наслідок, знижується загальна продуктивність підйому, що призводить до додаткової витрати електроенергії. Контроль за станом скіпів повинен проводитися не рідше одного разу на місяць.

Недоліком реостатних систем керування роботою підйому є значні втрати енергії при пуску і гальмуванні. Частотно-керовані системи, ТП-Д та ін. мають вищі регульовальні властивості і кращі техніко-економічні показники при меншій витраті електричної енергії. При дводвигуновому електроприводі під час ремонтних і профілактичних робіт, а також у початковий момент прискорення чи гальмування можливе використання одного двигуна.

Розрахунки показують, що існує реальна можливість домогтися зниження енергоспоживання ШПУ на 3–10 % при роботі з електроприводом, який не передбачає рекуперативних режимів, і на 10–20 % – з електроприводом, який дозволяє рекуперацію механічної енергії, накопиченої в процесі розгону, назад у мережу.

Пропонована методика націлена на визначення оптимальних значень пари параметрів: маси противаги ($m_{\text{пр}}$) і лінійної густини (погонної маси) зрівноважувального каната ($\rho_{\text{жк}}$) при незмінності інших параметрів, вже розрахованих і вибраних виходячи з установлених режимів роботи і необхідних виробничих потужностей. Вибір параметрів, що оптимізуються, обумовлений такими факторами:

зміна значень цих параметрів дає відчутний енергозберігаючий ефект; заходи по їх зміні дешевші порівняно, наприклад, із заміною електропривода на більш економічний;

їх зміна локальна, тобто не спричиняє зміни інших елементів установки.

Існуючі критерії вибору даних параметрів ($m_{пр} \approx m_{кліт} + 0,5m_{вант}$; $\rho_{жк} \approx \rho_{гк}$) при проектуванні ШПУ відбивають загальні принципи фізичної моделі установки і не враховують специфіку режиму роботи конкретної ШПУ. Однак навіть приблизне врахування специфіки режимів роботи ШПУ (кількість використовуваних горизонтів, маса вантажу, переміщеного з i -го на j -й горизонт k разів), дозволяє одержати значну економію електроенергії.

Задача побудови моделі полягає в тому, щоб вивести залежність енергоспоживання ШПУ за визначений інтервал часу і при визначеному режимі роботи від досліджуваних параметрів, тобто вивести функцію двох змінних $E(m_{пр}, \rho_{жк})$. Виведення такої залежності розбивається на кілька етапів і оформляється у вигляді, доступному для подальшої програмної реалізації.

На рис. 1 показана загальна принципова електромеханічна схема шахтної підйомної установки для шахти з вертикальним стовбуром.

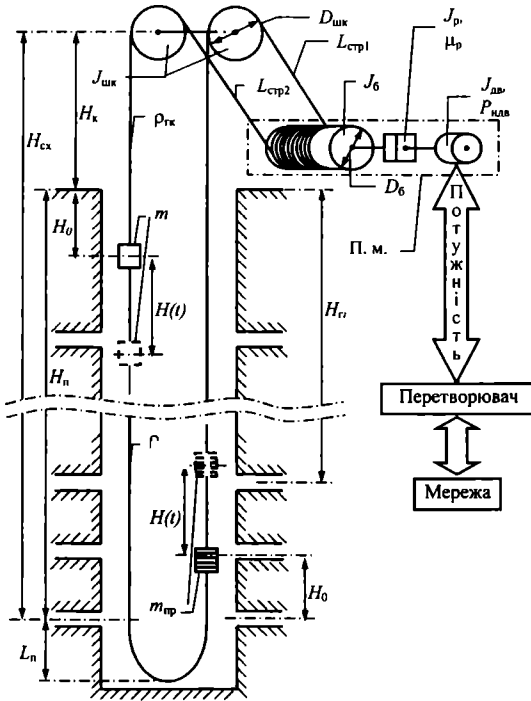


Рис. 1. Схема шахтної підйомної установки: H_n і H_k – висота підйому і копра; $H_{сх}$, L_n , $L_{стр1}$, $L_{стр2}$ – довжина схилю підйомного каната, частини петлі зрівноважувального каната, верхньої та нижньої струни відповідно; H_0 – початкова глибина, на якій знаходиться смінь з вантажем ($m = m_{кл} + m_{вант}$) або противага ($m_{пр}$), з якої починається рух; $H(t)$ – поточне переміщення вантажу в координатах від часу; $J_{дв}$, J_r , $J_б$, $J_{шк}$ – моменти інерції двигуна, редуктора, барабана і шківів відповідно; $H_{гi}$ – глибина i -го горизонту; $P_{нлв}$ – номінальна потужність двигуна; μ_r – передатне відношення редуктора; $\rho_{гк}$ і $\rho_{жк}$ – маса 1 м головного і зрівноважувального канатів

Відповідно до поданої схеми момент інерції елементів системи, які лінійно рухаються відносно осі обертання барабана,

$$J' = (m_{гк} + m_{зк} + m + m_{пр})R_6^2, \quad (3)$$

де $m_{гк} = \rho_{гк}L_{гк} = \rho_{гк}(H_{сх} + H_k + L_{стр1} + L_{стр2})$ – маса головного каната; $m_{зк} = \rho_{зк}L_{зк} = \rho_{зк}(H_0 + 2L_п)$ – маса зрівноважувального каната; m – маса вантажу; R_6 – радіус барабана.

Загальний момент інерції системи, зведений до осі обертання вала двигуна, має вигляд

$$J_{зв} = N_{дв} J_{дв} + \frac{2J_{шк} + J_6 + J_p + J'}{\mu_p^2}, \quad (4)$$

де $N_{дв}$ – кількість двигунів в установці; J' – момент інерції вантажу.

Статичний момент навантаження при русі вантажу вгору і вниз [1]

$$M_{ст}^{\downarrow}(t) = [m_{пр} - m + (\rho_{вк} - \rho_{гк}) \{2(H_0 + H(t)) - H_{п}\}] \frac{gR_6}{\mu_p^2};$$

$$M_{ст}^{\uparrow}(t) = [m - m_{пр} + (\rho_{зк} - \rho_{гк}) \{2(H(t) - H_0) + H_{п}\}] \frac{gR_6}{\mu_p^2}.$$

Повні механічні момент і потужність на валу електродвигунів

$$M(t) = M_{ст}(t) + M_{дин}(t) = M_{ст}(t) + J_{пр}\epsilon(t);$$

$$P'(t) = M(t)\omega(t), \quad (6)$$

де $\epsilon(t) = a(t) \frac{\mu_p}{R_6}$, $\omega(t) = v(t) \frac{\mu_p}{R_6}$ – кутове прискорення і швидкість обертання

вала двигуна; a – лінійне прискорення вантажу; $M_{дин}$ – динамічний момент.

Електрична потужність на затискачах електродвигуна:

для електроприводу з рекуперацією

$$P(t) = \begin{cases} \frac{P'(t)}{\eta(P'(t)/P_{ндв})}, & \text{при } P'(t) \geq 0; \\ P'(t)\eta(P'(t)/P_{ндв}), & \text{при } P'(t) < 0, \end{cases} \quad (7)$$

для електроприводу без рекуперації

$$P(t) = \left| \frac{P'(t)}{\eta(P'(t)/P_{ндв})} \right|, \quad (8)$$

де $\eta(P'(t)/P_{ндв})$ – залежність ККД електродвигуна від поточного значення потужності на його валу.

ККД електродвигуна є нелінійною залежністю. Аналітичне зображення функції ККД $\eta(P^{відн}(t))$ досягається кусочно-лінійною інтерполяцією по опорних даних:

$$\eta(P^{\text{відн}}(t)) = \eta_i + \Delta\eta_i = \eta_i + k_i (P^{\text{відн}}(t) - P_i^{\text{відн}}) \text{ при } P_i^{\text{відн}} < P^{\text{відн}}(t) < P_{i+1}^{\text{відн}}, \quad (9)$$

де коефіцієнт $k_i = (\eta_{i+1} - \eta_i) / (P_{i+1}^{\text{відн}} - P_i^{\text{відн}})$.

Енергія на виході електродвигуна визначається інтегруванням функції потужності за часом:

$$E(t) = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt. \quad (10)$$

Чисельно проінтегруємо функцію потужності за часом методом трапецій [2]:

$$E(t) = \int_{t_2}^{t_1} P(t) dt = \frac{t_1 - t_2}{2n} [P(t_0) + 2P(t_1) + 2P(t_2) + \dots + 2P(t_{n-1}) + P(t_n)] = \frac{\Delta t}{2} \sum_{j=0}^n c_j P(t_j), \quad (11)$$

де n – кількість інтервалів, на які розбивається проміжок часу інтегрування; c_j – коефіцієнт, що дорівнює 1 для $j = 0, n$ і 2 для інших значень j .

Загальне енергоспоживання ШПУ залежно від досліджуваних параметрів за розглянутий період роботи визначається як сумарне енергоспоживання установки при переміщенні вантажу масою m_{ijk} з i -го на j -й горизонт N_{ij} разів:

$$\Sigma E(m_{\text{пр}}, \rho_{\text{вк}}) = \sum_{i=0}^{N_{\text{гор}}} \sum_{j=0}^{N_{\text{гор}}} \sum_{k=1}^{N_{ij}} E_{ijk}(m_{\text{пр}}, \rho_{\text{вк}}), \quad (12)$$

де $N_{\text{гор}}$ – кількість горизонтів.

Дослідження цієї моделі проведено в середовищі обчислень Mathcad 2001 Professional. На рис. 2 показані графіки функцій енергоспоживання $E(m_{\text{пр}}, \rho_{\text{вк}})$. Значення розподілу осей координат подані у відносних одиницях. Графіки показують наявність чітко виражених областей мінімуму значень енергоспоживання в обох випадках, що доводить актуальність постановки задачі оптимізації зазначених параметрів енергоспоживання установки.

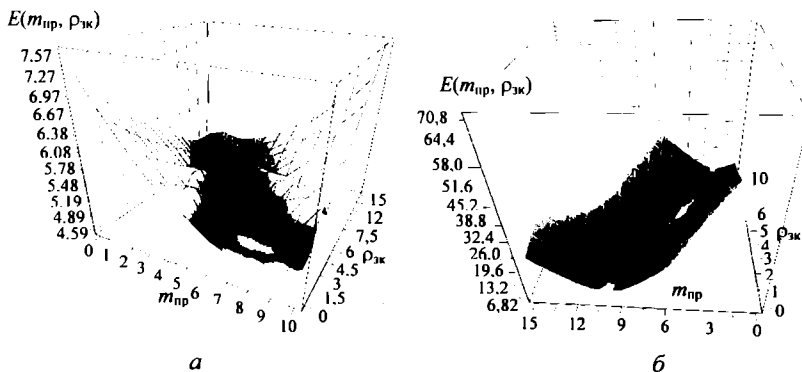
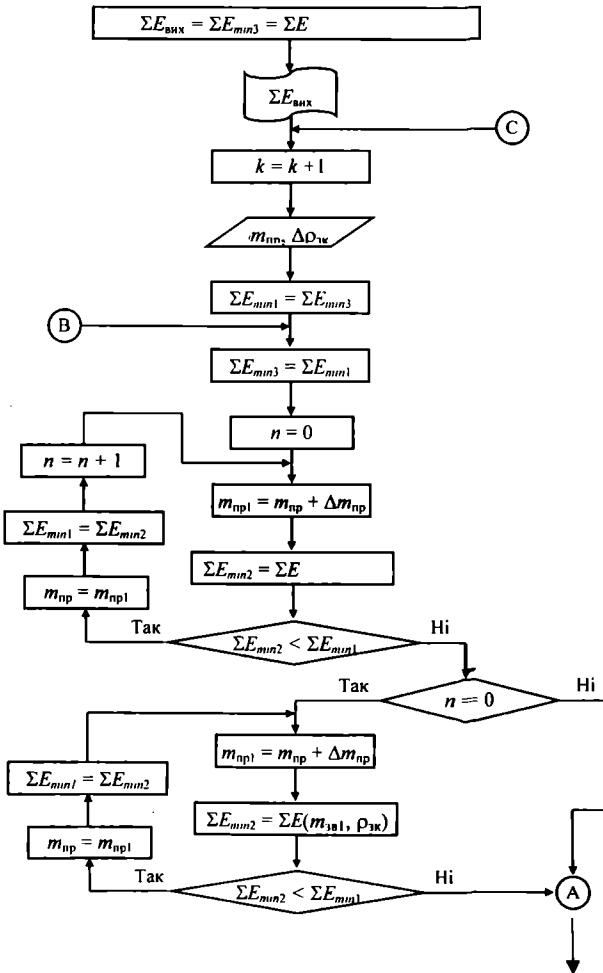


Рис. 2. Функції енергоспоживання для системи з електроприводом: а – з рекуперацією; б – без рекуперації

Відносно згладжений вигляд залежностей дозволяє ефективно використовувати для оптимізації метод простого покоординатного спуску, який полягає в почерговому варіюванні значень параметрів, які оптимізуються ($m_{np}, \rho_{зк}$), з метою визначення позитивних напрямків їхньої зміни. Процес продовжується доти, поки функція мети не досягне мінімального значення.

Постановка задачі оптимізації: $\Sigma E(m_{np}, \rho_{зк}) \rightarrow \min$.

Структурна схема алгоритму оптимізації параметрів за описаним методом зображена на рис. 3.



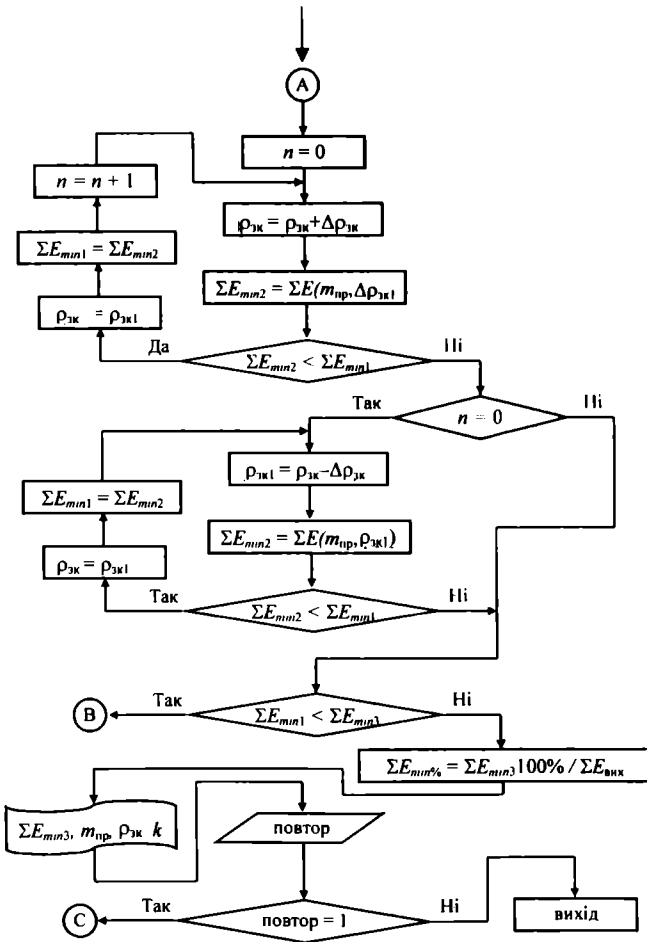


Рис. 3. Структурна схема алгоритму оптимізації: $m_{пр}$, $m_{пр1}$, ρ_{2k} , ρ_{2k1} – поточні та проміжні значення; $\Delta m_{пр}$, $\Delta \rho_{2k}$ – вибрані значення дискретності зміни значень на k -й ітерації; k – номер ітерації; $\Sigma E_{вих}$ – значення енергоспоживання при вихідних значеннях маси противаги і густини зрівноважувального канату; ΣE_{min1} , ΣE_{min2} , ΣE_{min3} – поточні мінімальні значення енергоспоживання в процесі оптимізації; $SE(m_{пр}, \rho_{2k})$ – значення сумарного енергоспоживання; “повтор” – змінна, значення якої позначає завершення процесу оптимізації (повтор = 0) або перехід на наступну ітерацію (повтор = 1)

Результати оптимізації для реальної ШПУ, що працює на кілька горизонтів, представлені в таблиці (№_і – номер ітерації з вибраними значеннями дискретності зміни досліджуваних параметрів $\Delta m_{пр}$ і $\Delta \rho_{2k}$). У

рядках з №, – 0 наведено дані по енергоспоживанню ШПУ при вихідних значеннях параметрів, вибраних за існуючими критеріями. В інших рядках представлені значення, отримані в результаті розрахунку та оптимізації енергоспоживання за описаною вище методикою.

Чисельні результати оптимізації параметрів для реальної ШПУ, що працює на кілька горизонтів

№,	$\Delta m_{пр},$ т	$\Delta \rho_{зк},$ кг/м	$m_{пр},$ т	$\rho_{зк},$ кг/м	$\Sigma E_{min},$ кВт·год	$\Sigma E_{min},$ %
з електроприводом, що використовує режим рекуперації						
0	–	–	12,50	11,550	5,79371	100,0
1	0,1	0,1	13,0	11,550	5,260	99,0255
2	0,05	0,05	13,0	11,50	5,73688	99,0191
3	0,01	0,01	13,010	11,490	5,73680	99,0177
4	0,005	0,005	15,7050	5,2750	5,66659	97,8060
5	0,001	0,001	15,7130	5,260	5,66657	97,8055
6	0,0005	0,0005	15,7130	5,260	5,66657	97,8055
з електроприводом, що не використовує режим рекуперації						
0	–	–	12,50	11,550	10,02930	100,0
1	0,5	0,5	11,50	20,050	8,76385	87,3825
2	0,1	0,1	5,60	29,850	7,35806	73,3656
3	0,05	0,05	5,350	30,50	7,35067	73,2919
4	0,01	0,01	5,240	30,760	7,34970	73,2823
5	0,005	0,005	5,2150	30,8250	7,34964	73,2816

Аналізуючи отримані результати оптимізації, можна зробити висновок, що у випадку використання безрекуперативних електроприводів досягається більш істотний енергозберігаючий ефект, оскільки в самому режимі рекуперації фізично закладений енергозберігаючий фактор. Однак економія енергії навіть у межах 3 % за тривалий період роботи ШПУ дає відчутний економічний ефект, тим більше в сучасних умовах дефіциту електроенергії і збитковості більшості шахт.

1. Терпигорєва А. М. Горное дело. Энциклопедический справочник – М.: Госгортехиздат. – Т. VIII. – 1960.

2. Фильчаков П. Ф. Численные и графические методы прикладной математики. – К.: Наукова думка, 1970.

3. Закладной А. Н. Энергосбережение средствами промышленного электропривода. – К.: Дия, 2001. – 168 с.