

УДК 622.673.1

О.С. Бешта, О.В. Балахонцев, С.С. Худолій, Є.Г. Худий, О.В. Михайленко

### ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНИХ ПІДЙОМНИХ УСТАНОВОК

Стаття присвячена дослідженню оптимальних режимів експлуатації електроприводів шахтних підйомних установок. Наведені типові діаграми навантажень електропривода та формули для розрахунку складових втрат в перехідних і усталених режимах. Розроблені закони управління електроприводом, які забезпечують мінімальне енергоспоживання.

Статья посвящена исследованию оптимальных режимов эксплуатации электроприводов шахтных подъемных установок. Приведены типовые нагрузочные диаграммы электропривода и формулы для расчета составляющих потерь в переходных и установившихся режимах. Разработаны законы управления электроприводом, которые обеспечивают минимальное энергопотребление.

Article is devoted to research and development of efficient maintenance modes for mine lifting installations. Typical load diagrams of electric drive are presented. Formulas are given for calculation of power loss is transient and steady-state operation. Control laws providing minimum energy consumption are developed.

**Вступ.** Робота кожної підйомної установки протікає в повторно-короткочасному режимі, для якого дуже важливе значення мають перехідні процеси, що виникають під час розгону й уповільнення підйомної машини. На характер і тривалість протікання цих процесів впливає масивність установки, величина кінцевих навантажень, встановлена максимальна швидкість руху підйомної посудини, тип електропривода і робота гальмівної системи.

**Мета роботи.** Порівняльний аналіз та обґрунтування раціональних режимів експлуатації електроприводів шахтних підйомних установок.

**Матеріал і результати дослідження.** Робота шахтної підйомної установки для більшості вантажних установок проводиться згідно з п'ятиперіодною діаграмою [1]. Перший період – вихід посудини з розвантажувальних кривих. Другий – розгін машини до заданої швидкості, його тривалість залежить від заданих прискорення і максимальної швидкості. Третій період – рух з максимальною швидкістю, його тривалість залежить від максимальної швидкості та глибини стовбура. Четвертий період – уповільнення до швидкості, допустимої для входу в розвантажувальні криві. Він звичайно співпадає з другим періодом.

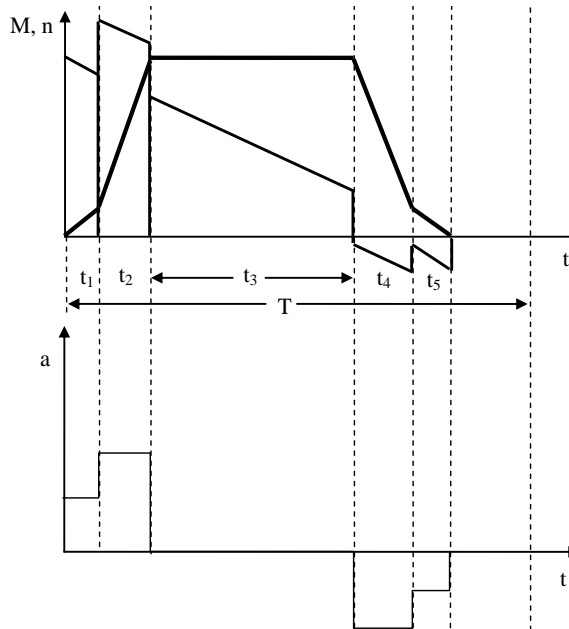
Залежно від характеристик машини і заданої величини уповільнення вона працює в режимі вільного вибігу, з пригальмовуванням механічним гальмом або замість гальма з використанням двигуна в режимі динамічного гальмування. З погляду використання механічних характеристик двигуна буде розглянутий тільки останній варіант уповільнення.

В п'ятому періоді – дотягуванні та русі в розвантажувальних кривих, звичайно, використовується режим двигуна. Час першого і п'ятого періодів приблизно однаковий.

Розглянемо розподіл та перетворення енергії для електропривода змінного та постійного струму. Потужність  $P_i$ , споживана приводом з мережі, витрачається в основному на реалізацію руху робочої машини

$$P_{pm} = M_{pm} \omega_{pm}.$$

Частина електроенергії розсіюється у вигляді тепла в активних опорах. Зміна магнітного потоку призводить до втрат у магнітному колі, обумовлених вихровими струмами і гістерезисом. До складу сумарних втрат входять також втрати на тертя.



*Рис.1 Діаграма швидкостей, зусиль і прискорень підйомної установки*

З урахуванням викладеного вище сумарну потужність втрат можна навести у вигляді:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= \Delta P_{\text{ое}\Sigma} + \Delta P_{pm} = \\ &= \sum_{i=1}^{i=n} I_i^2 R_i + \Delta P_{cm} + \Delta P_{\text{мех.об}} + \Delta P_{pm}, \end{aligned}$$

де  $\Delta P_{\text{ое}\Sigma}$  – потужність втрат енергії в двигуні та його електричних колах;  $\Delta P_{pm}$  – потужність втрат у робочій машині;  $\Delta P_{cm}$  – втрати в сталі;  $\Delta P_{\text{мех.об}}$  – механічні втрати в двигуні.

Втрати потужності в двигуні можна представити у вигляді суми постійних втрат  $\Delta P_n$  та змінних  $\Delta P_g$

$$\Delta P_{\text{ое}} = \Delta P_n + \Delta P_g.$$

До постійних втрат відносяться: втрати в сталі магнітопроводу; механічні втрати; втрати в обмотках збудження двигунів. До змінних втрат відносять втрати в міді силового кола двигуна:

– для двигуна постійного струму

$$\Delta P_g = I_a^2 R_a ;$$

– для асинхронного двигуна

$$\Delta P_g = I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2' .$$

Змінні втрати залежать від навантаження і можуть бути представлені через

електромагнітний момент і кутову швидкість (ковзання) двигуна:

– для двигуна постійного струму

$$\Delta P_g = M(\omega_0 - \omega) = M\Delta\omega = M\omega_0 S = P_1 S, \quad (1)$$

де  $P_1$  – електромагнітна потужність;  $\Delta\omega$  – падіння (перепад) швидкості під дією статичного навантаження;  $\omega_0$  – кутова швидкість ідеального холостого ходу;

– для асинхронного двигуна (без урахування втрат від струму намагнічування)

$$\Delta P_g = M\omega_0 S \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) = P_1 S \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right).$$

Розглянемо більш детально змінні втрати енергії в перехідних режимах. Для двигуна постійного струму незалежного збудження з урахуванням (1) втрати енергії при пуску становлять:

$$\Delta A_{\text{пус}} = \int_0^m M(\omega_0 - \omega) dt. \quad (2)$$

Якщо пуск реалізується без навантаження ( $M_c = 0$ ), то з рівняння руху випливає  $dt = J d\omega / M$ . З урахуванням цього отримаємо з (2) втрати енергії за час перехідного процесу

$$\Delta A_{\text{пус}} = \int_0^{\omega_0} J(\omega_0 - \omega) d\omega = \frac{J\omega_0^2}{2}, \quad (3)$$

які дорівнюють запасу кінетичної енергії у механічній частині в кінці пуску.

Підставляючи в (2) значення  $M$ , виражене через ковзання

$$M = -J\omega_0 \frac{ds}{dt},$$

одержимо іншу форму запису вираження втрат при пуску

$$\Delta A_{\text{пус}} = \int_{S_{\text{кін}}}^{S_{\text{поч}}} J\omega_0^2 s ds = \frac{J\omega_0^2}{2} (S_{\text{поч}}^2 - S_{\text{кін}}^2). \quad (4)$$

Для процесу пуску без навантаження  $S_{\text{поч}} = 1$ ,  $S_{\text{кін}} = 0$ . При цьому результат однаковий, як і в (3).

Енергія, споживана з мережі за час пуску

$$A_M = \int_0^m P_M dt = \int_0^{t_n} M\omega_0 dt = \int_0^{\omega_0} J\omega_0 d\omega = J\omega_0^2.$$

Аналіз наведених виразів показує, що половина енергії, споживаної з мережі за час пуску без навантаження, витрачається у вигляді тепла в роторному колі двигуна. Залежності (3) і (4) не мають обмежень на наявність додаткових опорів, тому вони справедливі й для реостатного пуску двигуна. Втрати енергії залишаються однаковими і відбувається лише їхній перерозподіл між двигуном і додатковим опором. Втрати енергії в якорі складають при цьому

$$\Delta A_{\text{я.пус}} = \frac{J\omega_0^2}{2} \frac{r_{\text{я}}}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}},$$

а в додаткових резисторах

$$\Delta A_p = \frac{J\omega_0^2}{2} \frac{R_{\text{д}}}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}.$$

Отже, при реостатному пуску втрати енергії, що виділяються безпосередньо в двигуні,

складають лише незначну частину загальних втрат, основна частина яких виноситься з двигуна в зовнішній додатковий опір.

При пуску двигуна постійного струму під навантаженням і  $M_c = const$

$$\Delta A_{\text{нyc}} = \int_0^m M (\omega_0 - \omega) dt = \int_0^m (M_c + M_{\text{дин}}) (\omega_0 - \omega) dt.$$

Оскільки в цьому випадку  $dt = J \frac{d\omega}{M_{\text{дин}}}$ , то після перетворень одержимо в припущенні, що

$$M = M_{cp} = const, \text{ а } \omega_c \approx \omega_0$$

$$\Delta A_{\text{нyc}} \approx \frac{M_{cp}}{(M_{cp} - M_c)} \frac{J \omega_0^2}{2}. \quad (5)$$

Втрати в роторі при пуску асинхронного двигуна (АД) визначаються наведеними виразами: (4) – при пуску на неробочий хід і (5) – пуск під навантаженням.

Сумарні втрати енергії під час пуску асинхронного двигуна без навантаження з урахуванням втрат в обмотці статора визначаються як

$$\Delta A_{\text{нyc}} = \frac{J \omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + I_0^2 R_1 t_n, \quad (6)$$

де  $I_0$  – струм намагнічування АД;  $t_n$  – час пуску.

Під час пуску асинхронного двигуна при наявності навантаження втрати енергії за аналогією з (5) складають

$$\Delta A_{\text{нyc}} = \frac{M_{cp}}{(M_{cp} - M_c)} \frac{J \omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + I_0^2 R_1 t_n. \quad (7)$$

При гальмуванні противмиканням без навантаження ( $M_c = 0$ ),  $S_{\text{нов}} = 2$ , а  $S_{\text{кін}} = 1$ . При цьому згідно з (4) втрати енергії для двигуна постійного струму

$$\Delta A_z = \frac{3}{2} J \omega_0^2.$$

З урахуванням статичного навантаження

$$\Delta A_z = \frac{M_{cp}}{M_{cp} + M_c} \frac{3}{2} J \omega_0^2.$$

Для процесу реверса двигуна постійного струму втрати енергії

$$\Delta A_{\text{рев}} = \Delta A_{\text{нyc}} + \Delta A_z = 2J \omega_0^2.$$

Для асинхронного двигуна сумарні втрати в роторі та статорі при гальмуванні противмиканням з урахуванням (6) і (7) визначаються як:

– при гальмуванні без навантаження

$$\Delta A_z = \frac{3}{2} J \omega_0^2 (1 + R_1/R_2) + I_0^2 R_1 t_z;$$

– з урахуванням статичного навантаження

$$\Delta A_z = \frac{M_{cp}}{M_{cp} + M_c} \frac{3}{2} J \omega_0^2 (1 + R_1/R_2) + I_0^2 R_1 t_z,$$

де  $t_z$  – час гальмування.

Для режиму динамічного гальмування вся кінетична енергія, запасена приводом, витрачається у вигляді тепла в силовому колі двигуна і тому втрати енергії будуть [2]

$$\Delta A_{o,z} = \frac{J \omega_0^2}{2}.$$

Досягти економії електроенергії в підйомних установках можливо за рахунок: виконання оптимальної діаграми швидкості; забезпечення нормованого завантаження підйомних посудин; ліквідації або скорочення роботи в режимі без навантаження (неробочий хід); контролю стану підйомних посудин; застосування досконалих видів електропривода.

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

$$\lambda = \frac{V_{\max}}{V_{cp}} = \frac{V_{\max} T_n}{H_n},$$

де  $V_{\max}, V_{cp}$  – максимальна і середня швидкості руху підйомної посудини м/с;  $H_n$  – висота підйому, м;  $T_n$  – час підйому посудини, с.

Оптимальну діаграму швидкості можна одержати збільшенням прискорення під час пуску й уповільнення при гальмуванні (в останньому випадку це доцільно під час уповільнення чи вільного вибігу), а також при збільшенні в допустимих межах максимальної швидкості підйому.

Виконання оптимальної діаграми швидкості забезпечується повною автоматизацією керування, внаслідок чого підвищується продуктивність установки і забезпечується робота з мінімальною витратою електроенергії.

При недовантаженні скіпів і вагонеток при видачі гірської маси, неповному завантаженню клітей при спуску-підйомі людей нераціональна витрата електроенергії складе:

$$\Delta W = W_{\text{ци}} n_{\text{пр}} \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де  $W_{\text{ци}} = W_{\text{доб}} / n_{\text{ф}}$  – витрата електроенергії за один цикл підйому, кВт·год/цикл;  $W_{\text{доб}}$  – добове споживання електроенергії підйомної установки (визначається за показниками лічильника активної енергії), кВт·год/добу;  $n_{\text{ф}}$  – фактична кількість підйомів за добу;

$n_{\text{пр}} = n_{\text{ф}} - n_{\text{рац}}$  – нераціональна кількість циклів за розрахунковий період часу  $T$  (дн);  $n_{\text{рац}} = \frac{A_{\text{ф}}}{Q_{\text{норм}}}$  – раціональна кількість циклів за розрахунковий період при нормованому завантаженні підйомної ємності;  $A_{\text{ф}}$  – фактична кількість виданої гірської маси за розрахунковий період, т;  $Q_{\text{норм}}$  – нормована вантажопідйомність підйомної посудини.

**Висновки.** Робота без навантаження пов'язана зі збільшенням нераціональних циклів і додатковою витратою електроенергії. Для її усунення необхідно мати графік роботи підйомної установки і строго його дотримуватись.

Енергетична модель потребує інформації щодо реальної навантажувальної здатності електропривода та поточного значення завантаження підйомної посудини. Навантажувальна здатність електропривода підйомної установки залежить від точного визначення номінальних параметрів електричного двигуна та від правильного вибору потужності установки. В більшості випадків проектна потужність електричних двигунів є заздалегідь вищою.

### Список літератури

1. Федоров М.М. Шахтные подъемные установки. – М.: Недра, 1979. – 309 с.
2. Колб А.А., Колб А.А. Теорія електроприводу: Навч. посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 511 с.