

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ У ПРИВІДНІЙ СИСТЕМІ ШАХТНОЇ ПІДЙІМАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

© Харченко Є.В., Семчук Л.В., 2006

Пропонується нелінійна математична модель перехідних процесів, що відбуваються у привідній системі шахтної підйімальної установки. Модель включає рівняння руху елементів системи, записані з урахуванням несталості зведеного моменту інерції рухомих частин підйімальної установки, а також рівняння електромагнітних явищ в асинхронному двигуні. Сумісне інтегрування одержаної системи диференціальних рівнянь виконується числовим методом. Наведено результати числової реалізації побудованої моделі.

The non-linear mathematic model of transition process that take place in driving system of mining elevating plant is proposed. The model includes the equation of movement of elements of the system that are written taking in account variable moment of inertia of moving parts of elevating plant, and also an equation of electromagnetic phenomena in asynchronous engine. The joint integration of the received system of differential equations is carried out by numerical method. The results of numerical realization of a build model are given.

Загальна характеристика проблеми. Шахтні підйімальні установки споруджують для транспортування на поверхню корисних копалин, опускання і підймання людей та шахтного обладнання.

Під час неусталених режимів роботи установки (встановлення кліток на посадочні кулаки, входження і вихід скіпа з розвантажувальних кривих, пуск та гальмування приводу тощо) виникають коливальні явища у механічній системі. На характер перехідних процесів, що відбувається в період пуску приводу, суттєво впливають електромагнітні явища в асинхронному двигуні, а також податливість муфт, за допомогою яких з'єднується вал двигуна з швидкохідним валом редуктора і тихохідний вал редуктора з привідним барабаном. Маса вантажу може змінюватися у широких межах, внаслідок чого значно змінюються характеристики частотного спектра пружної системи. Характерним для шахтної підйімальної установки є те, що довжина робочих віток каната в процесі руху системи змінюється. Їхні жорсткості є функціями узагальнених координат, що необхідно враховувати у математичній моделі.

Дослідження перехідних режимів роботи та визначення динамічних навантажень елементів шахтної підйімальної установки з урахуванням наведених вище умов дасть можливість раціонально добирати конструктивні та експлуатаційні характеристики машини.

Аналіз відомих досліджень. Розрахунок нестационарних процесів у механічних системах, а також дослідження вільних і вимушених коливань [1, 2, 6, 8] є одним з основних завдань раціонального проектування і технічної діагностики шахтних підйімальних установок [11]. Вивчення динамічних явищ набуває особливо важливого значення у зв'язку з великими глибинами добування корисних копалин, значною вантажністю установок та високими вимогами щодо безпеки експлуатації технічних об'єктів [4, 7].

Однак, раціональний добір параметрів шахтних підйімальних установок потребує нових підходів до аналізу експлуатаційних режимів привідних систем, які б ґрунтувалися на розв'язанні задач динаміки у достатньо строгій постановці, з урахуванням динамічних властивостей приводу [3, 5, 7, 12]. Загальну методологію аналізу динамічних явищ у підйімальних системах, побудовану на

сумісному розгляді електромагнітних процесів у двигуні і механічних коливань у приводній системі, запропоновано у працях [3, 9, 10].

Постановка задачі. Метою статті є розроблення математичної моделі перехідних процесів у шахтній підймальній установці з урахуванням нерозривного взаємозв'язку електромагнітних і механічних коливальних явищ. Запропонована методика розрахунку ґрунтується на сумісному розв'язанні рівнянь руху пружної механічної системи зі змінними параметрами, а також рівнянь електромагнітних явищ в асинхронному двигуні.

Математична модель перехідних процесів. Шахтна підймальна установка, схему якої зображено на рис. 1, містить дві клітки, або два скіпи масами m_1 і m_2 , що утримуються за допомогою віток каната з початковими довжинами l_{o1} і l_{o2} . Одна з віток каната намотується на привідний барабан, а інша – розмотується. При цьому підймальні посудини масами m_1 і m_2 переміщуються у напрямках координат x_1 і x_2 відповідно. Барабан приводиться в рух за допомогою електродвигуна, що розвиває момент M_E , та редуктора.

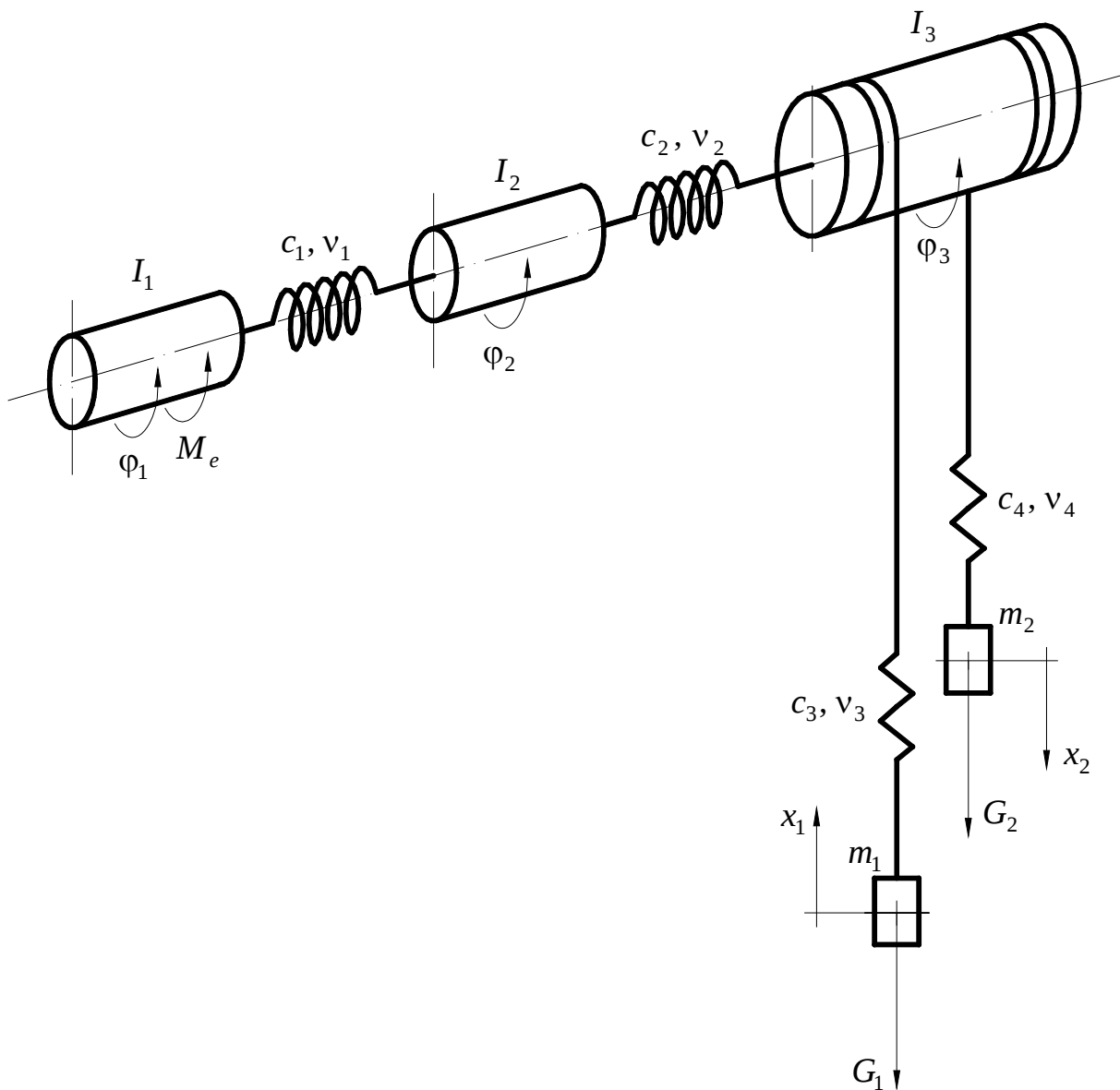


Рис. 1. Розрахункова схема шахтної підймальної установки

На рисунку позначено: I_1, I_2, I_3 – зведені до барабана моменти інерції ротора двигуна, обертових частин редуктора і момент інерції привідного барабана; c_1, v_1 – жорсткість і коефіцієнт дисипації муфти, що з'єднує двигун з редуктором; c_2, v_2 – жорсткість і коефіцієнт дисипації з'єднання редуктора і привідного барабана; c_3, v_3, c_4, v_4 – жорсткості і коефіцієнти дисипації робочих частин віток каната; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, x_1, x_2$ – зведена координата руху ротора двигуна, та координати руху веденого вала редуктора, привідного барабана і підймальних посудин.

Рух механічної системи опишемо з використанням рівняння Лагранжа другого роду

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} = Q_j \quad (j = 1, 2, 3, 4, 5), \quad (1)$$

де T, Π – кінетична і потенціальна енергія системи; q_j – узагальнена координата; t – час; Q_j – узагальнена сила.

Кінетичну енергію системи запишемо у вигляді

$$T = \frac{I_1 \cdot \omega_1^2}{2} + \frac{I_2 \cdot \omega_2^2}{2} + \frac{I_3 \cdot \omega_3^2}{2} + \frac{m_1 \cdot v_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot v_2^2}{2}, \quad (2)$$

де $\omega_1, \omega_2, \omega_3, v_1, v_2$ – швидкості руху ротора двигуна, вихідного вала редуктора, привідного барабана і підймальних посудин, причому

$$\omega_1 = \dot{\varphi}_1, \quad \omega_2 = \dot{\varphi}_2, \quad \omega_3 = \dot{\varphi}_3, \quad v_1 = \dot{x}_1, \quad v_2 = \dot{x}_2. \quad (3)$$

Потенціальну енергію системи запишемо у вигляді

$$\Pi = \frac{c_1(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} + \frac{c_2(\varphi_2 - \varphi_3)^2}{2} + \frac{c_3 \cdot \Delta_1^2}{2} + \frac{c_4 \cdot \Delta_2^2}{2}, \quad (4)$$

причому абсолютні видовження каната

$$\Delta_1 = r_3 \cdot \varphi_3 - x_1, \quad \Delta_2 = x_2 - r_3 \cdot \varphi_3, \quad (5)$$

де r_3 – радіус барабана

Довжини віток каната змінюються з часом і визначаються як функції координати руху барабана,

$$l_1 = l_{01} - r_3 \cdot \varphi_3, \quad l_2 = l_{02} + r_3 \cdot \varphi_3, \quad (6)$$

Тоді жорсткості віток каната набувають вигляду

$$c_3 = \frac{E \cdot A}{l_{01} - r_3 \cdot \varphi_3}, \quad c_4 = \frac{E \cdot A}{l_{02} + r_3 \cdot \varphi_3}, \quad (7)$$

де E – модуль пружності матеріалу каната, A – сумарна площа поперечного перерізу дротиків каната.

Рівність (4) з урахуванням залежностей (5), (6), (7) перетворимо до вигляду

$$\Pi = \frac{c_1(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} + \frac{c_2(\varphi_2 - \varphi_3)^2}{2} + \frac{E \cdot A(r_3 \cdot \varphi_3 - x_1)^2}{2(l_{01} - r_3 \cdot \varphi_3)} + \frac{E \cdot A(x_2 - r_3 \cdot \varphi_3)^2}{2(l_{02} + r_3 \cdot \varphi_3)}. \quad (8)$$

Приймаючи за узагальнені координати $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, x_1, x_2$, узагальнені сили подаємо як

$$\begin{aligned} Q_1 &= M_E - v_1(\omega_1 - \omega_2); & Q_2 &= -v_1(\omega_2 - \omega_1) - v_2(\omega_2 - \omega_3); \\ Q_3 &= (F_{v3} + F_{v4})r_3 - v_2(\omega_3 - \omega_2); & Q_4 &= -G_1 + F_{v3}; & Q_5 &= G_2 - F_{v4}. \end{aligned} \quad (9)$$

де F_{v3}, F_{v4} – сили дисипації енергії в вітках каната

$$\begin{aligned} F_{v3} &= v_3 \frac{d}{dt} \left(\frac{r_3 \varphi_3 - x_1}{l_{01} - r_3 \varphi_3} \right) = v_3 \left(\frac{r_3 \omega_3 (l_{01} - x_1)}{(l_{01} - r_3 \varphi_3)^2} - \frac{v_1}{(l_{01} - r_3 \varphi_3)} \right); \\ F_{v4} &= v_4 \frac{d}{dt} \left(\frac{x_2 - r_3 \varphi_3}{l_{02} + r_3 \varphi_3} \right) = v_4 \left(\frac{-r_3 \omega_3 (l_{02} + x_2)}{(l_{02} + r_3 \varphi_3)^2} + \frac{v_2}{(l_{02} + r_3 \varphi_3)} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Виконуючи диференціювання виразів кінетичної (2) і потенціальної (8) енергій та підставляючи одержувані залежності до рівності (1), отримаємо рівняння руху у вигляді

$$\begin{aligned}
\dot{\omega}_1 &= \frac{1}{I_1} (M_E - v_1(\omega_1 - \omega_2) - c_1(\varphi_1 - \varphi_2)); \\
\dot{\omega}_2 &= \frac{1}{I_2} (-c_1(\varphi_2 - \varphi_1) - c_2(\varphi_2 - \varphi_3) - v_1(\omega_2 - \omega_1) - v_2(\omega_2 - \omega_3)); \\
\dot{\omega}_3 &= \frac{1}{I_3} (-c_2(\varphi_3 - \varphi_2) - \frac{E \cdot A}{2} \cdot \frac{2 \cdot r_3(r_3\varphi_3 - x_1) \cdot (l_{01} - r_3\varphi_3) + (r_3\varphi_3 - x_1)^2 r_3}{(l_{01} - r_3\varphi_3)^2} - \\
&\quad - \frac{E \cdot A}{2} \cdot \frac{2 \cdot r_3(r_3\varphi_3 - x_2) \cdot (l_{02} + r_3\varphi_3) - (r_3\varphi_3 - x_2)^2 r_3}{(l_{02} + r_3\varphi_3)^2} + r_3 v_3 \left(\frac{r_3 \omega_3 (l_{01} - x_1)}{(l_{01} - r_3\varphi_3)^2} - \frac{v_1}{(l_{01} - r_3\varphi_3)} \right) + \\
&\quad + r_3 v_4 \left(\frac{-r_3 \omega_3 (l_{02} + x_2)}{(l_{02} + r_3\varphi_3)^2} + \frac{v_2}{(l_{02} + r_3\varphi_3)} \right) - v_2(\omega_3 - \omega_2)); \\
\dot{v}_1 &= \frac{1}{m_1} \left(-\frac{E \cdot A(x_1 - r_3\varphi_3)}{(l_{01} - r_3\varphi_3)} + v_3 \left(\frac{r_3 \omega_3 (l_{01} - x_1)}{(l_{01} - r_3\varphi_3)^2} - \frac{v_1}{(l_{01} - r_3\varphi_3)} \right) - G_1 \right); \\
\dot{v}_2 &= \frac{1}{m_2} \left(-\frac{E \cdot A(x_2 - r_3\varphi_3)}{(l_{02} + r_3\varphi_3)} - v_4 \left(\frac{-r_3 \omega_3 (l_{02} + x_2)}{(l_{02} + r_3\varphi_3)^2} + \frac{v_2}{(l_{02} + r_3\varphi_3)} \right) + G_2 \right). \quad (11)
\end{aligned}$$

Одержані рівності (11) та співвідношення (3) утворюють сукупність рівнянь руху, поданих безпосередньо в нормальній формі Коші. Сумісно з рівняннями електромагнітного стану асинхронного двигуна вони становлять замкнуту систему нелінійних диференціальних рівнянь, що підлягають числовому інтегруванню.

Зведений електромагнітний момент двигуна визначаємо як

$$M_{E3} = M_E \cdot u,$$

де M_E – електромагнітний момент на валі двигуна; u – передавальне відношення приводу.

Для інтегрування диференціальних рівнянь (11) необхідно визначити електромагнітний момент двигуна M_E і похідну функції J_1 за координатою φ_1 .

Початкові умови інтегрування рівнянь (11) мають вигляд:

$$\varphi_{10} = \varphi_{20} + \frac{(m_1 - m_2) \cdot g \cdot r_3}{c_1}; \quad \varphi_{20} = \frac{(m_1 - m_2) \cdot g \cdot r_3}{c_2}; \quad x_{10} = \frac{m_1 \cdot g \cdot l_{10}}{E \cdot A}; \quad x_{20} = \frac{m_2 \cdot g \cdot l_{20}}{E \cdot A}. \quad (12)$$

Рівняння електромагнітних процесів в асинхронному двигуні. Електромагнітні явища в асинхронному двигуні з урахуванням насичення магнітопроводу описуються рівняннями:

$$\begin{aligned}
\frac{di_S}{dt} &= A_S(u + \Omega_S \Psi_S - R_S i_S) + B_S(\Omega_R \Psi_R - R_R i_R); \\
\frac{di_R}{dt} &= A_R(\Omega_R \Psi_R - R_R i_R) + B_R(u_S + \Omega_S \Psi_S - R_S i_S), \quad (13)
\end{aligned}$$

де i_S , i_R і u_S – матриці-колони струмів і напруг; A_S , B_S , A_R , B_R – матриці зв'язків; Ω_S , Ω_R – матриці частот обертання; Ψ_S , Ψ_R – матриці-колони потокозчеплень.

Індекс S вказує на приналежність величини до обмотки статора, а R – ротора.

Матриці-колони i_S , i_R , u_S визначаються рівняннями

$$i_j (j = S, R) = \text{col}(i_{jx}, i_{jy}); \quad u_S = \text{col}(U_m, 0),$$

де i_{jx} , i_{jy} – проекції струмів на координатні осі x , y ; U_m – амплітуда напруги мережі живлення.

Квадратні матриці A_S , B_S , A_R , B_R визначаються залежностями

$$A_S = \alpha_S(1 - \alpha_S G); \quad B_S = -\alpha_S \alpha_R G; \quad A_R = \alpha_R(1 - \alpha_R G); \quad B_R = B_S,$$

де

$$G = \frac{1}{i_m^2} \begin{bmatrix} Ri_x^2 + Ti_y^2 & (R-T)i_x i_y \\ (R-T)i_x i_y & Ti_x^2 + Ri_y^2 \end{bmatrix},$$

причому

$$R = \frac{1}{\rho + \alpha_s + \alpha_R}; \quad T = \frac{1}{\tau + \alpha_s + \alpha_R}.$$

Тут i_m , i_x , i_y – намагнічувальний струм та його складові за осями x , y ; τ , ρ – величини, що визначаються за кривою намагнічення, яка є функціональною залежністю робочого потокозчеплення Ψ_m від намагнічувального струму; α_s , α_R – величини, обернені до індуктивностей розсіяння обмоток статора і ротора.

Матриці частот обертання

$$\Omega_s = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\omega_0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \Omega_R = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 - \omega_R \\ \omega_R - \omega_0 & 0 \end{bmatrix},$$

де ω_0 і ω_R – синхронна кутова швидкість двигуна і кутова швидкість ротора, виражені в електрорадіанах за секунду. Величини ω_0 і ω_R мають значення

$$\omega_0 = 314; \quad \omega_R = \omega_0 \cdot u \cdot p_0,$$

де u – передавальне відношення приводу; p_0 – число пар магнітних полюсів.

Матриці-колонки повних потокозчеплень обмоток статора і ротора мають вигляд

$$\Psi_s = \frac{1}{\alpha_s} i_s + \frac{1}{\tau} i; \quad \Psi_R = \frac{1}{\alpha_R} i_R + \frac{1}{\tau} i,$$

де

$$i = \text{col}(i_x, i_y).$$

$$\text{Величини } i_x = i_{Sx} + i_{Rx}; \quad i_y = i_{Sy} + i_{Ry}; \quad i_m = \sqrt{i_x^2 + i_y^2}.$$

Значення τ і ρ визначаються виразами

$$\tau = \frac{i_m}{\Psi_m}; \quad \rho = \frac{di_m}{d\Psi_m}. \quad (14)$$

Електромагнітний момент знаходимо за формулою

$$M_E = \frac{3}{2} p_0 \frac{1}{\tau} (i_{Rx} i_{Sy} - i_{Ry} i_{Sx}). \quad (15)$$

Криву намагнічування подаємо у вигляді

$$\Psi_m = a_1 i_m + a_2 i_m^3 + a_3 i_m^5, \quad \text{якщо } i_m > i_{mk};$$

$$\Psi_m = \alpha_m^{-1} i_m, \quad \text{якщо } i_m \leq i_{mk} \quad (16)$$

де i_{mk} – критичне значення намагнічувального струму, за межею якого залежність $\Psi_m(i_m)$ є нелінійною. Тоді τ і ρ , згідно з виразами (14), визначаються залежностями

$$\tau = (a_1 i_m + a_2 i_m^2 + a_3 i_m^4)^{-1}, \quad \text{якщо } i_m > i_{mk};$$

$$\tau = \alpha_m, \quad \text{якщо } i_m \leq i_{mk}; \quad (17)$$

$$\rho = (a_1 i_m + 3a_2 i_m^2 + 5a_3 i_m^4)^{-1}, \quad \text{якщо } i_m > i_{mk};$$

$$\rho = \alpha_m, \quad \text{якщо } i_m \leq i_{mk}. \quad (18)$$

Для здійснення числового інтегрування диференціальних рівнянь (13) необхідність наявності в пам'яті комп'ютера інформації про криву намагнічування (16) відпадає, оскільки для розрахунку використовують безпосередньо вирази (17) і (18).

Проекції векторів струмів на координатні осі в момент початку пуску двигуна дорівнюють нулеві, тобто,

$$i_{Sx}(0) = 0; i_{Sy}(0) = 0; i_{Rx}(0) = 0; i_{Ry}(0) = 0. \quad (19)$$

Результати аналізу перехідних процесів. Розрахунок перехідних процесів у привідній системі шахтної підйимальної установки зводиться до інтегрування рівнянь (11) і (13) з урахуванням залежностей (15), (17), (18) та початкових умов (12), (19).

Розглянемо головну шахтну підйимальну установку, яка містить два скіпи 2СН9,5–2 вантажністю 8500 кг, власною масою 8460 кг, підвішені на канаті ЛК–РО 6х36 діаметром 46,5 мм. Площа поперечного перерізу $A=848 \text{ мм}^2$, модуль пружності каната $E=150000 \text{ МПа}$. Підйимальна машина ЦР–5х3/0,6 моментом інерції $I_3=1700000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, редуктор 2ЦО–22, передатне число якого $u=20$, момент інерції рухомих частин $I_2=25000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Електродвигун АК3–15–41–8Б. Параметри двигуна: амплітуда напруги мережі живлення $U_m=4900 \text{ В}$, активні опори фаз $r_s=0.38 \text{ Ом}$, $r_R=0.318 \text{ Ом}$, індуктивності розсіяння $L_s=1,048\cdot 10^{-2} \text{ Г}$, $L_R=1,112\cdot 10^{-2} \text{ Г}$, робоча індуктивність $L_m=0.505 \text{ Г}$, число пар магнітних полюсів $p_0=4$, момент інерції ротора $I_1=55 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, частота обертання ротора $\omega_{10}=78,5 \text{ рад/с}$.

Моменти в пружних ланках 1 і 2 визначаються відповідно до залежностей:

$$M_1 = v_1(\omega_1 - \omega_2) + c_1(\varphi_1 - \varphi_2); M_2 = c_2(\varphi_2 - \varphi_3) + v_2(\omega_2 - \omega_3); \quad (20)$$

Зусилля у вітках каната визначаються за формулами:

$$N_1 = \frac{E \cdot A(r_3\varphi_3 - x_1)}{(l_{01} - r_3\varphi_3)} + v_3 \left(\frac{r_3\omega_3(l_{01} - x_1)}{(l_{01} - r_3\varphi_3)^2} - \frac{v_1}{(l_{01} - r_3\varphi_3)} \right);$$

$$N_2 = \frac{E \cdot A(x_2 - r_3\varphi_3)}{(l_{02} + r_3\varphi_3)} + v_4 \left(\frac{-r_3\omega_3(l_{02} + x_2)}{(l_{02} + r_3\varphi_3)^2} + \frac{v_2}{(l_{02} + r_3\varphi_3)} \right). \quad (21)$$

Максимальні значення електромагнітного моменту двигуна M_E , моментів і сил у пружних ланках M_1 , M_2 , N_1 , N_2 , а також коефіцієнти динамічності ($k_{дин.} = \frac{N_{max}}{mg}$) у вітках каната, що відповідають різним завантаженням скіпа, наведено у таблиці. Активні опори ступенів реостата обчислювали за залежностями $r_{R1}=16r_R$ якщо $\omega_1 < 0,52\cdot\omega_{10}$, $r_{R2}=13r_R$ якщо $0,52\cdot\omega_{10} \leq \omega_1 < 0,78\cdot\omega_{10}$, $r_{R3}=8r_R$ якщо $0,78\cdot\omega_{10} \leq \omega_1 < 0,93\cdot\omega_{10}$, $r_{R4}=r_R$ якщо $0,93\cdot\omega_{10} \leq \omega_1$.

Максимальні значення моменту двигуна M_E , моментів і сил у пружних ланках M_1 , M_2 , N_1 , N_2 , а також коефіцієнти динамічності у вітках каната

M_1 Кг	m_2 кГ	M_{Emax} Н·м	M_{1max} Н·м	M_{2max} Н·м	N_{1max} Н	N_{2max} Н	$k_{дин.1}$	$k_{дин.2}$
8500	8500	71620	840400	835900	185700	107600	2,23	1,292
10000	8500	72100	833600	840900	212100	114400	2,164	1,373
12000	8500	72740	818800	842000	242800	101500	2,065	1,218
14000	8500	73380	797000	833500	273300	101900	1,992	1,223
15000	8500	74010	775200	810100	303800	103900	1,937	1,247
16960	8500	74310	761800	771400	306600	99810	1,845	1,198

Як показали дослідження, двигун не можна запустити без реостата через велику інерційність привідної системи. Зокрема у цьому приводі застосовують чотириступеневий реостатний пуск двигуна. Суттєве значення має раціональний добір опорів ступенів реостата, що вводяться в обмотку ротора. Найбільш плавний розгін привідної системи скіпової підйимальної установки вдалося отримати за значень опорів, наведених вище. На рис. 2, 3, 4, 5, 6, 7 показано часові залежності кутової швидкості ротора двигуна ω_1 , електромагнітного моменту двигуна M_E , а також моментів і сил пружності M_1 , M_2 , N_1 , N_2 .

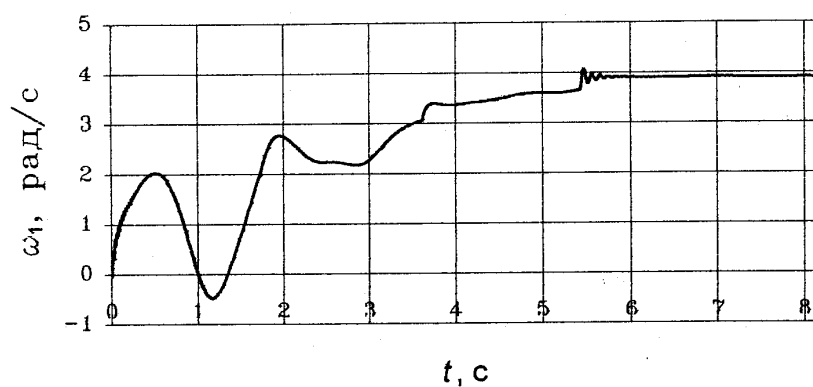


Рис. 2. Часова залежність кутової швидкості ротора двигуна

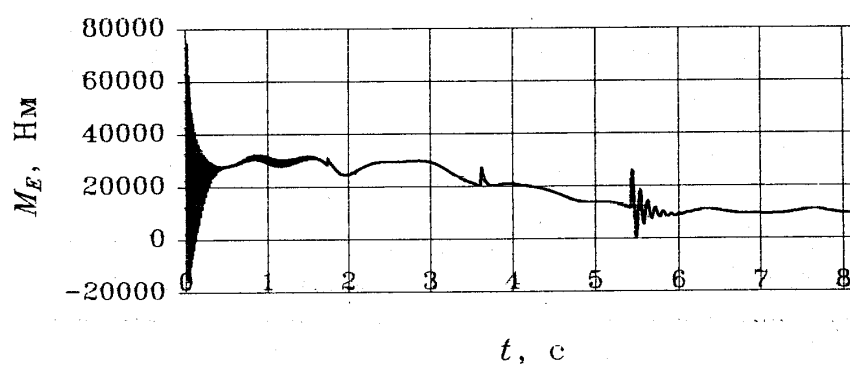


Рис. 3. Часова залежність електромагнітного моменту двигуна M_E

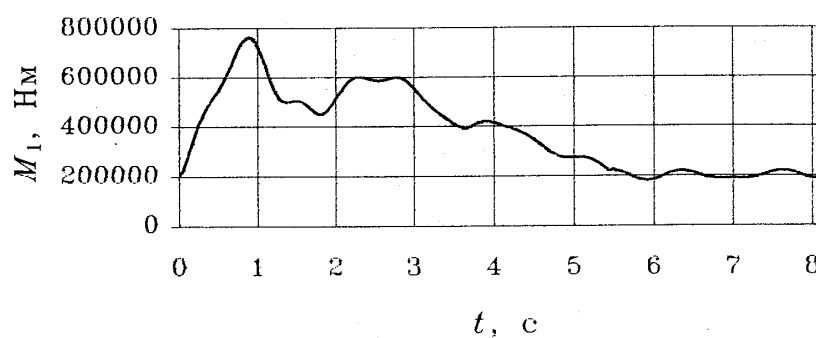


Рис. 4. Часова залежність сил пружності M_1

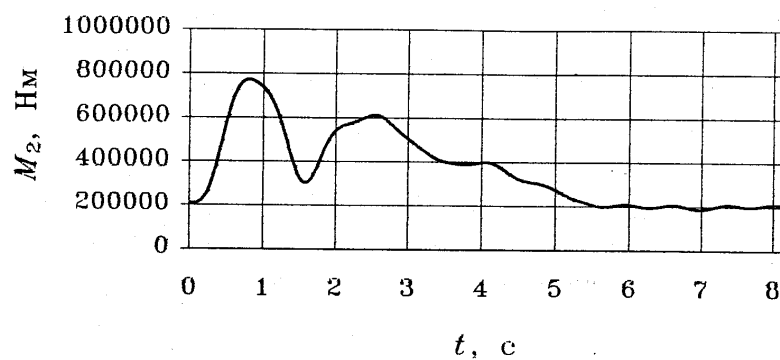


Рис. 5. Часова залежність сил пружності M_2

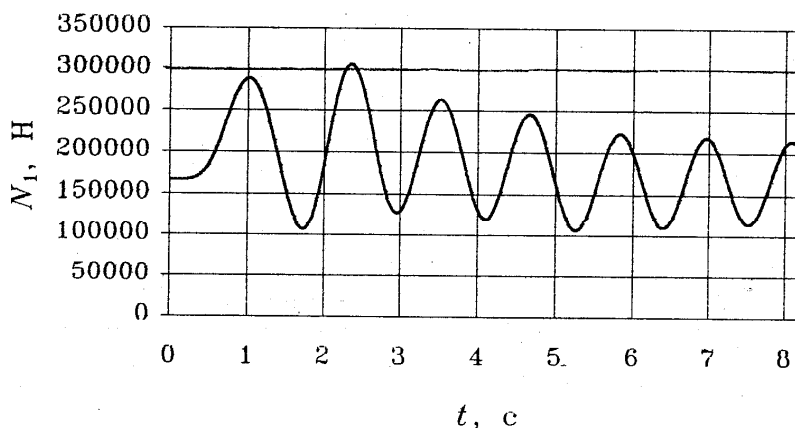


Рис. 6. Часова залежність сил пружності в канаті N_1

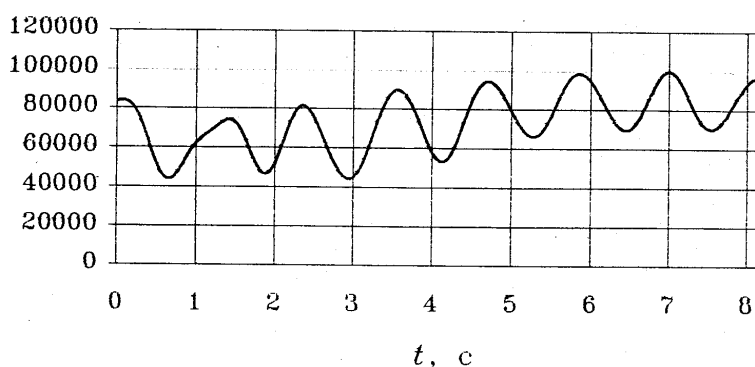


Рис. 7. Часова залежність сил пружності в канаті N_2

Розгін електродвигуна і всієї механічної системи шахтної підйомальної установки відбувається приблизно протягом 5,5 с (рис. 2). На початковій стадії розгону тривалістю близько 0,25 с (рис. 3) спостерігаються інтенсивні коливання електромагнітного моменту з частотою, близькою до частоти напруги живильної мережі (50 Гц). Це явище мало відбивається на динаміці механічної системи у зв'язку з великою розбіжністю частот електромагнітних і механічних коливальних процесів, однак запуск двигуна призводить до збурення коливань механічної системи, у яких найсуттєвіше проявляється перша гармоніка з періодом близько 0,9 с. Це значно збільшує внутрішні сили, однак з часом значення моментів і сил пружності стабілізуються.

Висновки. 1. Побудована математична модель дає можливість докладно аналізувати перехідні процеси у привідній системі шахтної підйомальної установки з урахуванням нерозривної взаємодії електродвигуна і механічної частини приводу. Коливальні явища, що виникають у механізмах пристрою під час пуску привідної системи, необхідно враховувати у розрахунках елементів конструкцій на міцність. Так, коефіцієнт динамічності у більш навантаженій вітці каната для робочого діапазону завантаження становить 2,230–1,845.

2. Результати аналізу перехідних процесів свідчать, що за рахунок раціонального добору опорів ступенів реостата можна в 1,2–1,9 рази зменшити динамічні навантаження і пришвидшити процес розгону шахтної підйомальної установки.

3. Більші динамічні навантаження виникають у вітці каната, зв'язаній з завантаженим скіпом, а менші – у вітці каната, зв'язаній з противагою. Коефіцієнти динамічності зусиль у вказаних вітках знаходяться у межах 2,230–1,845 і 1,292–1,198 відповідно. Менші значення відповідають більшому завантаженню скіпів.

1. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Наука, 1968. 2. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высшая школа. 1972. 3. Вейц В.Л., Вербовой А.Ф., Кочура А.Е. Динамика управляемого электромеханического привода с асинхронными двигателями. – К.: Вища школа, 1988. – 295 с. 4. Давыдов Б. Л. Динамика горных машин. М.: Гортехиздат, 1961. 5. Калинин С.Г.,

Харченко Е.В. Динамика несущих конструкций буровых установок. – Львов: Вища школа, 1988 – 144 с. 6. Комаров М. С. Динамика механизмов и машин. – М.: Машиностроение, 1969. – 297 с. 7. Остапенко В.А. Динамика волн в канатах переменной длины: Зб. наук. пр. – Полтава: ПНТУ, 2005. – № 16. – С. 216–220. 8. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. – М.: Физматгиз, 1959. 9. Харченко Е.В. Динамические процессы буровых установок. – Львов: Свит, 1991. – 176 с. 10. Харченко Е. В. Расчет нестационарных процессов электромеханических приводных систем. Изв. вузов. – М.: Машиностроение, 1986. – № 8. – С. 62–67. 11. Хаджиков Р.Н. Горная механика. – М.: Недра, 1982. 12. Чабан В. Й. Методы анализа электромеханических систем. – Львов: Вища школа, 1985. – 189 с.

УДК 51.001.57

А.В. Чабан

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електропостачання промислових підприємств,
міст і сільського господарства

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ МЕХАНІЧНИХ КРУТИЛЬНИХ КОЛИВНИХ ПРОЦЕСІВ НА ПРИКЛАДІ СИСТЕМИ “ПАРОВА ТУРБИНА – РОТОР” СИНХРОННОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

© Чабан А.В., 2006

Запропоновано метод розрахунку крутильних коливань системи “парова турбіна – ротор” турбогенератора за умови постійного в часі розподіленого електромагнітного моменту генератора. Диференціальні рівняння системи наведено в нормальній формі Коші.

Here is proposed the method of calculation of rotatory vibration electromechanical processes on example of steam turbine and rotor of turbogenerator on condition that distributed turbogenerator torque is constant. The differential equations of system state are written down in normal Cauchy form. The results of computation are given.

Вступ. Аналіз коливних процесів у валопроводах електромеханічних систем займає чільне місце на етапі проектування та експлуатації електроприводів. Особливо це стосується розрахунку крутильних коливань. У роботі запропоновано аналіз механічних коливних процесів, що виникають у системі “парова турбіна – ротор” синхронного турбогенератора. Цілком зрозуміло, що в повному обсязі задача є досить складна, оскільки характер коливних процесів у роторі машини залежить як від електричної, так і від механічної частини математичної моделі генератора. Для спрощення задачі розглянемо лише механічну частину системи, а електричну частину подамо постійним у часі розподіленим електромагнітним моментом. За таких допущень цілком очевидно, що електромагнітна частина математичної моделі не впливатиме на механічну, тобто задача зводиться до суто механічної. Математичну модель досліджуваної системи будують на підставі диференціального рівняння крутильних коливань пружного валу, що впливає з інтегрального варіаційного принципу Гамільтона–Остроградського. Тобто вона будується на підставі диференціальних рівнянь механічного стану в частинних похідних з крайовими умовами другого та третього роду [4].

Мета роботи. Побудова математичної моделі високого рівня адекватності, яка б дала змогу повноцінно враховувати крутильні коливні процеси у валах системи “парова турбіна – ротор” генератора та у з’єднанні валу турбіни з ротором турбогенератора генератора через пружну муфту в єдиний валопровід за умови відсутності електромагнітного впливу на механічну частину моделі.