

КЕРУВАННЯ ШАХТНИМИ ПІДЙОМНИМИ УСТАНОВКАМИ З УРАХУВАННЯМ ДРУГОГО ТОНУ КОЛИВАНЬ

© Довгань С.М., Самойленко А.А., Азюковський О.О., 2004

Наведено алгоритм визначення другого тону коливань статично зрівноважених шахтних підйомних установок. Розглянуто формування сигналу керування для замкнених за швидкістю САК шахтними підйомними установками з урахуванням другого тону коливань електромеханічної системи.

The algorithm of definition of the second tone of oscillations statically of balance mine winding plants is adduced. The signal conditioning of control for self-contained on speed of a ACS by mine winding plants with allowance for of second tone of oscillations of an electromechanical system is reviewed.

Вступ. Підвищення точності врахування впливу явищ, що відбуваються в шахтних підйомних установках (ШПУ), які суттєво позначаються на динаміці, дозволяє забезпечити надійну та довговічну роботу електромеханічної системи. При формуванні закону зміни рушійного зусилля, що передається від підйомної машини до барабана, необхідно враховувати найвпливовіші на динаміку системи фізичні процеси або явища. Відомо [1–4], що обмеження ривків барабана в ШПУ, забезпечує покращання динаміки електромеханічної системи в цілому.

Огляд стану проблеми. Розглянемо деякі закони, що доповнюють ідею проф. Туліна, щодо обмеження ривків при формуванні діаграми руху барабана ШПУ.

Закон обмеження ривка, запропонований в [1–3], забезпечує відсутність коливань вітки, що піднімається, в кінці періоду зміни прискорення (швидкості):

$$t_{op} = k \cdot \tau_c, \quad (1)$$

де t_{op} – час обмеження ривка, с; τ_c – період власних коливань вітки, що піднімається, с; $k = 1, 2, 3, \dots$

Закон (1) забезпечує відсутність низькочастотних коливань обох судин (обох віток) ШПУ за умови, що основні (найменші) частоти (тони) власних коливань обох віток кратні одна одній. Слід зазначити, що в основних режимах роботи статично зрівноважених ШПУ, ця умова не виконується [1].

У роботі [4] запропоновано чотири способи формування керуючого сигналу завдання на швидкість (з урахуванням обмеження основних змінних барабана: ривка, прискорення та швидкості), що забезпечує демпфування пружних коливань в ШПУ за двома (не кратними одна одній) основними власними частотами (тонами) коливань електромеханічної системи в кінці періоду зміни прискорення (швидкості).

Розглянуті закони формування керуючого сигналу завдання на швидкість, забезпечують демпфування коливань прискорення (зусиль, моменту, швидкості) за основними одним або двома тонами власних коливань електромеханічної системи ШПУ. Але деякі закони, що розглянуті в [4], потребують уточнення, особливо за умов, коли в електромеханічній системі ШПУ перший та другий тони в вітці, що опускаються, або в вітці, що піднімається, максимально наближені один до одного. Тобто при інтенсифікації режимів роботи ШПУ може трапитися, що вплив інших тонів коливань на динаміку електромеханічної системи значно зросте. Відповідно до цього необхідно визначити діапазон існування другого тону коливань у системі та розробити алгоритм розрахунку періоду коливань другого тону з подальшим впровадженням результатів у розглянуті закони керування [4].

Мета роботи. Обґрунтувати спосіб формування сигналу керування для замкненої САК статично зрівноваженої ШПУ з урахуванням другого тону коливання електромеханічної системи.

Постановка задачі. З метою покращання динаміки податливих елементів (у тому числі довгих канатів) ШПУ в кінці зміни прискорення (швидкості), розробити закон формування

керуючого впливу, що враховує три основні тони коливань електромеханічної системи ШПУ, та забезпечує зменшення відносних коливань кінцевих судин в типово-технологічних режимах роботи підйомної установки.

Матеріали дослідження. У роботі [4] розглянуто та обґрунтовано спосіб формування сигналу керування для САК швидкості ШПУ, в якій задаючий пристрій повинен відповідати структурі, що зображена на рис. 1, де τ'_1, τ'_2 – період власних коливань вітки, що піднімається, та вітки, що опускається, відповідно, с; $\dot{h}_1, \ddot{h}_1, \ddot{h}_1$ – відповідно завдання на швидкість, прискорення та ривок барабана; $\rho(t)$ – імпульсна задаюча функція, довжина імпульсу якої визначається за умовою:

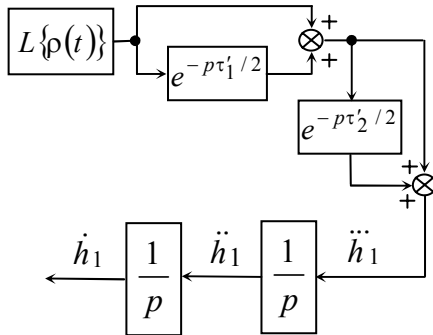


Рис. 1. Спрощена структурна схема задаючого пристрою

$$\left. \begin{aligned} \int_0^{\tau_0} \rho(t) dt &= \ddot{h}_{\max}; \\ \rho(\tau_0) &= 0, \end{aligned} \right\},$$

де τ_0 – довжина імпульсу, с; \ddot{h}_{\max} – максимальне (номінальне) значення прискорення барабана, м/с.

Слід зазначити, що період збільшення (зменшення) прискорення (τ_n) можна визначити за виразом

$$\tau_n = \frac{\tau'_1}{2} + \frac{\tau'_2}{2} + \tau_0.$$

Тобто при точному розрахунку основних періодів коливання системи (τ'_1 та τ'_2), довжину імпульсу можна задавати будь-якою (у межах швидкодії електропривода), при цьому основні тони коливань в системі (періоди яких τ'_1 та τ'_2) не впливатимуть на динаміку. Проте другі тони коливань, якщо вони достатньо близькі до основних, значно змінюватимуть динамічні характеристики системи.

Отже, довжину імпульсу (τ_0) можна задавати, враховуючи інформацію про другий тон коливання системи. У [5] розглянуто структурне зображення статично зрівноваженої ШПУ, причому відповідно до такого структурного зображення тони коливань обох віток можна визначити, якщо розв'язати такі системи рівнянь:

– для вітки, що піднімається:

$$\left. \begin{aligned} T_2\omega [1 - \cos(2\omega\tau_1) - \cos(2\omega\tau) + \cos(2\omega\tau_2)] &= \sin(2\omega\tau); \\ T_2\omega [\sin(2\omega\tau_1) + \sin(2\omega\tau) - \sin(2\omega\tau_2)] &= 1 + \cos(2\omega\tau); \end{aligned} \right\}$$

– для вітки, що опускається:

$$\left. \begin{aligned} T_3\omega [1 - \cos(2\omega\tau_2) - \cos(2\omega\tau) + \cos(2\omega\tau_1)] &= \sin(2\omega\tau); \\ T_3\omega [\sin(2\omega\tau_2) + \sin(2\omega\tau) - \sin(2\omega\tau_1)] &= 1 + \cos(2\omega\tau). \end{aligned} \right\}$$

де τ_1, τ_2 – час проходження хвилі пружної повздовжньої деформації каната в вітці, що піднімається та опускається, відповідно, с; $\tau = \tau_1 + \tau_2$; $T_2 = \frac{m_2}{2qv_0}$; $T_3 = \frac{m_3}{2qv_0}$; m_2, m_3 – маса завантаженої та порожньої судини відповідно, кг; q – маса одиниці довжини каната, кг/м; v_0 – швидкість розповсюдження хвилі пружної повздовжньої деформації каната.

Для визначення першого (найменшого) тону коливань ШПУ, необхідно знайти перше сумісне рішення кожної із систем рівнянь для обох віток підйомної установки. Тим часом наступне (друге) сумісне рішення рівнянь кожної із систем – другий тон коливань відповідних віток ШПУ.

Для визначення діапазону зміни частоти другого тону коливань електромеханічної системи відповідно до другої системи рівнянь необхідно розглянути основні типово-технологічні режими роботи статично зрівноваженої ШПУ (рис. 2):

$$L_1 = T_3 \omega [1 - \cos(2\omega\tau_2) - \cos(2\omega\tau) + \cos(2\omega\tau_1)];$$

$$L_2 = T_3 \omega [\sin(2\omega\tau_2) + \sin(2\omega\tau) - \sin(2\omega\tau_1)];$$

$$R_1 = \sin(2\omega\tau); \quad R_2 = 1 + \cos(2\omega\tau).$$

Аналізуючи отримані графічні рішення (рис. 2) систем рівнянь при різних параметрах ШПУ, слід зазначити:

– при збільшенні довжини канатів період коливань другого тону обернено пропорційний часу розповсюдження хвилі повздовжньої деформації відповідних канатів;

– при збільшенні сталої часу T_3 (максимальне значення якої для існуючих та перспективних шахт не перебільшує 1,1 с, причому приймалось, що $v = 4000$ м/с, $m_2 < 200$ т, $q > 20$ кг/м) та при найменшій глибині, перший та другий тони максимально наближені один до одного, при зменшенні T_3 – навпаки;

– при $T_3 \rightarrow 0$ або $\tau_2 \rightarrow 0$, частота коливання другого тону наближається до $\frac{3\pi}{2\tau}$ (це підтверджує, що парних гармонік у системі не існує [1]).

Причому діапазон зміни другого тону коливання електромеханічної системи статично зрівноваженої ШПУ при типово-технологічних умовах роботи і найпоширеніших та найвірогідніших параметрах підйомних установок:

$$0.7 \frac{\pi}{\tau} < \omega_{2T} < 1.45 \frac{\pi}{\tau}. \quad (2)$$

Розглянемо алгоритм отримання другого загального розв'язання систем рівнянь. З рис. 2 видно, що другий тон коливання системи можна завжди визнати при розв'язанні рівняння $L_2 = R_2$, тобто необхідно апроксимувати (через певні математичні труднощі, які пов'язані з розв'язанням таких трансцендентних рівнянь) другі рівняння розглянутих систем рівнянь.

Для існуючого (визначеного) діапазону зміни другого тону коливань (2), при розкладанні функцій синуса та косинуса в ряд, необхідно враховувати достатньо великий ступінь аргументу, що, у свою чергу, додає певних труднощів під час розв'язання повних алгебраїчних рівнянь, ступінь яких вищий за четвертий. Для того, щоб запобігти таких складнощів, необхідно по-перше, при апроксимації функцій поблизу діапазону (2) зробити фазовий зсув; по-друге, для збільшення точності розв'язання, розділити заданий діапазон (2) на два відрізки (причому один з них повинен бути більшим, – це запобігатиме можливим перешкодам, при визначенні місця знаходження другого, наближеного розв'язання трансцендентного рівняння).

Отже, приймемо фазовий зсув аргументів другого рівняння другої системи рівнянь, таким, що дорівнює $\frac{5\pi}{2}$, при цьому фазовий зсув частоти дорівнює $\frac{5\pi}{4\tau}$. Додаючи фазовий зсув частоти в аргументах функцій відповідного рівняння, отримаємо

$$T_3 \left(x + \frac{5\pi}{4\tau} \right) \left[\sin 2\tau_2 \left(x + \frac{5\pi}{4\tau} \right) + \sin 2\tau \left(x + \frac{5\pi}{4\tau} \right) - \right. \\ \left. - \sin 2\tau_1 \left(x + \frac{5\pi}{4\tau} \right) \right] = 1 - \sin 2\tau x. \quad (3)$$

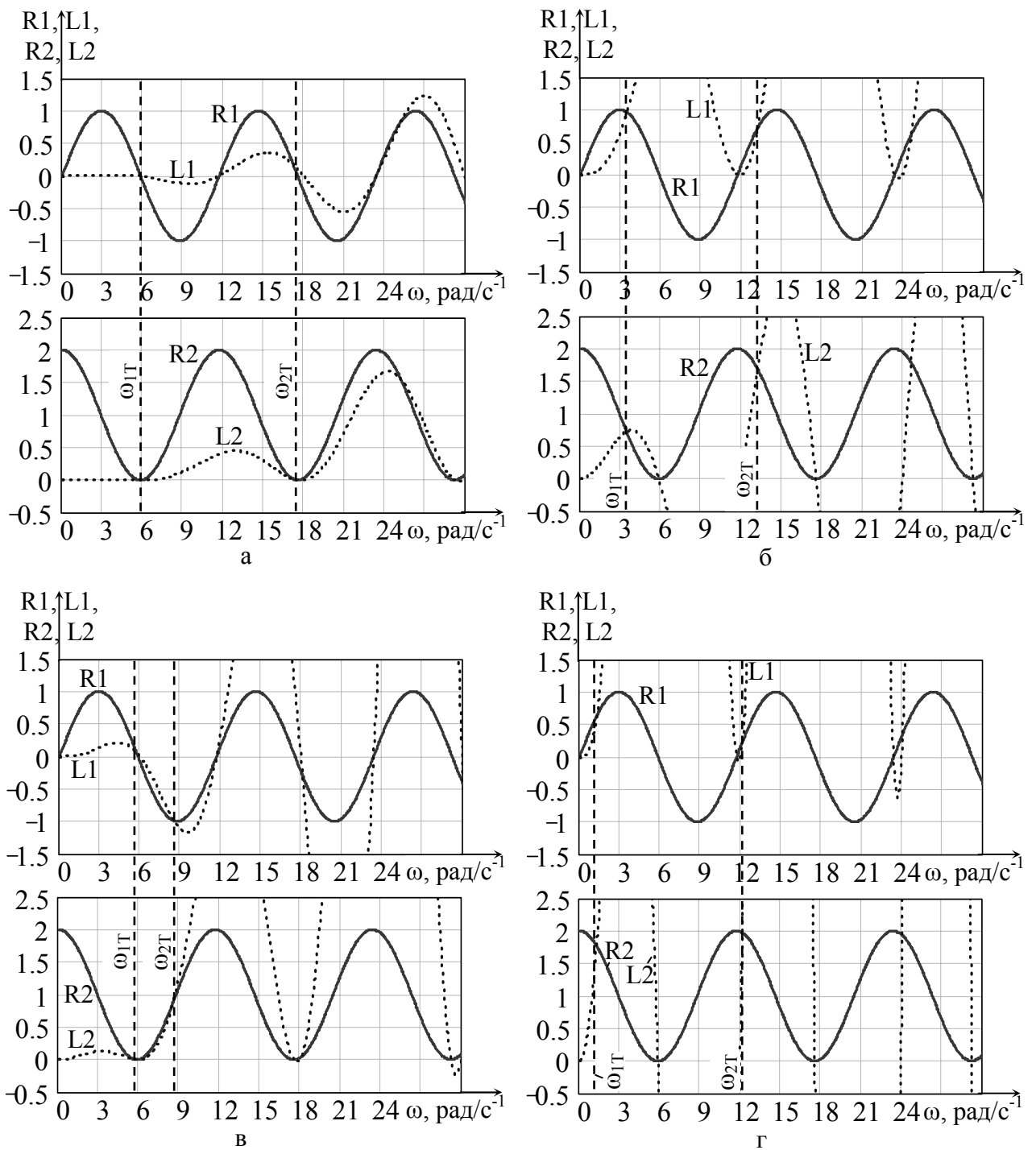


Рис. 2. Графічні розв'язання систем рівнянь при:

а – $T_3 = 0,1121$ с, $\tau_1 = 0,2625$ с, $\tau_2 = \tau_1/40$ с;

б – $T_3 = 0,1121$ с, $\tau_1 = \tau_2/40$ с, $\tau_2 = 0,2625$ с;

в – $T_3 = 1,121$ с, $\tau_1 = 0,2625$ с, $\tau_2 = \tau_1/40$ с;

г – $T_3 = 1,121$ с, $\tau_1 = \tau_2/40$ с, $\tau_2 = 0,2625$ с

З урахуванням дійсного розв'язання рівняння (3), частота другого тону коливань електро-механічної системи (ω_{2T}) визначається так:

$$\omega_{2T} = x^* + \varphi_1, \quad (4)$$

де x^* – перший (найменше за модулем) розв'язку рівняння (3), рад/с; φ_1 – фазовий зсув частоти, що дорівнює $\frac{5\pi}{4\tau}$, рад/с.

Розкладаючи функції синуса в ряд до четвертого ступеня аргументу включно, апроксимуємо (3) таким рівнянням:

$$A'_4 x^4 + A'_3 x^3 + A'_2 x^2 + A'_1 x + A'_0 = 0 \quad (5)$$

де

$$\begin{aligned} A'_4 &= \frac{4}{3} A'_{41} + A'_{42}; & A'_3 &= \frac{5\pi}{3\tau} A'_{41} + 2A'_{31} - \frac{4\tau^3}{3}; \\ A'_2 &= 2A'_{21} + \frac{5\pi}{2\tau} A'_{31}; & A'_1 &= \frac{5\pi}{2\tau} A'_{21} + A'_{11} + 2\tau; \\ A'_0 &= \frac{5\pi}{4\tau} A'_{11} - 1; & A'_{41} &= T_3 \left(\tau_1^3 \cos \frac{5\pi\tau_1}{2\tau} - \tau_2^3 \cos \frac{5\pi\tau_2}{2\tau} \right); \\ A'_{42} &= \frac{5\pi T_3}{6\tau} \left(\tau^4 + \tau_2^4 \sin \frac{5\pi\tau_2}{2\tau} - \tau_1^4 \sin \frac{5\pi\tau_1}{2\tau} \right); \\ A'_{31} &= T_3 \left(\tau_1^2 \sin \frac{5\pi\tau_1}{2\tau} - \tau_2^2 \sin \frac{5\pi\tau_2}{2\tau} - \tau^2 \right); \\ A'_{21} &= T_3 \left(\tau_2 \cos \frac{5\pi\tau_2}{2\tau} - \tau_1 \cos \frac{5\pi\tau_1}{2\tau} \right); \\ A'_{11} &= T_3 \left(\sin \frac{5\pi\tau_2}{2\tau} - \sin \frac{5\pi\tau_1}{2\tau} + 1 \right). \end{aligned}$$

Для знаходження коренів рівняння (5), застосуємо рішення Декарта-Ейлера (причому для розв'язання неповного рівняння четвертого ступеня, знайдемо відповідні корені кубічного рівняння, застосовуючи рішення Кардано) та з урахуванням (4), отримаємо:

$$\omega_{2T} = x_1 + \frac{5\pi}{4\tau}, \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} x_1 &= R - \frac{A_3}{4}; & R &= -\sqrt{y_1 - \frac{a}{3}} - \sqrt{y_2 - \frac{a}{3}} + \sqrt{y_3 - \frac{a}{3}}; \\ y_1 &= A + B; & y_2 &= -\frac{A+B}{2} + i \frac{A-B}{2} \sqrt{3}; \\ y_3 &= -\frac{A+B}{2} - i \frac{A-B}{2} \sqrt{3}; & A &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}; \\ B &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}; & p &= -\frac{a^2}{3} + b; \\ q &= 2 \left(\frac{a}{3} \right)^3 - \frac{ab}{3} + c; & Q &= \left(\frac{p}{3} \right)^3 + \left(\frac{q}{3} \right)^2; & a &= \frac{p'}{2}; \end{aligned}$$

$$b = \frac{p'^2 - 4r'}{16}; \quad c = -\frac{q'^2}{64}; \quad p' = -\frac{3}{8}A_3^2 + A_2;$$

$$q' = \frac{A_3^3}{8} - \frac{A_3A_2}{2} + A_1;$$

$$r' = \frac{A_3^2A_2}{16} - \frac{3}{256}A_3^4 - \frac{A_3A_1}{4} + A_0; \quad A_3 = \frac{A'_3}{A'_4};$$

$$A_2 = \frac{A'_2}{A'_4}; \quad A_1 = \frac{A'_1}{A'_4}; \quad A_0 = \frac{A'_0}{A'_4};$$

i – уявна одиниця.

В усіх випадках приймається дійсне значення $x = \text{Re}\{x\}$.

Відносна похибка визначення частоти другого тону коливань за рівнянням (6) не перебільшує 2% в діапазоні $-0.26\frac{\pi}{\tau} < x < 0.2\frac{\pi}{\tau}$.

Якщо $\text{Re}\{x\} < -0.26\frac{\pi}{\tau}$, тоді частоту другого тону системи необхідно визначати розв'язанням систем рівнянь з зсувом частоти, що дорівнює $\frac{3\pi}{4\tau}$, для другого рівняння другої системи рівнянь, отримаємо:

$$T_3 \left(x + \frac{3\pi}{4\tau} \right) \left[\sin 2\tau_2 \left(x + \frac{3\pi}{4\tau} \right) + \sin 2\tau \left(x + \frac{3\pi}{4\tau} \right) - \right. \\ \left. - \sin 2\tau_1 \left(x + \frac{3\pi}{4\tau} \right) \right] = 1 + \sin 2\tau x. \quad (7)$$

Тоді частота другого тону коливань, з урахуванням дійсного розв'язку рівняння (7), визначається так:

$$\omega_{2T} = x^{**} + \varphi_2, \quad (8)$$

де x^{**} – перший (найменший за модулем) розв'язок рівняння (7), рад/с; φ_2 – фазовий зсув частоти, що дорівнює $\frac{3\pi}{4\tau}$, рад/с.

Аналогічно алгоритму визначення розв'язку (3), розкладемо функції синуса (7) в ряд до четвертого ступеня аргументу включно і апроксимуємо (7) так:

$$B'_4x^4 + B'_3x^3 + B'_2x^2 + B'_1x + B'_0 = 0 \quad (9)$$

де

$$B'_4 = \frac{4}{3}B'_{41} + B'_{42}; \quad B'_3 = \frac{\pi}{\tau}B'_{31} + 2B'_{31} + \frac{4\tau^3}{3}; \quad B'_2 = 2B'_{21} + \frac{3\pi}{2\tau}B'_{31}; \quad B'_1 = \frac{3\pi}{2\tau}B'_{21} + B'_{11} - 2\tau;$$

$$B'_0 = \frac{3\pi}{4\tau}B'_{11} - 1; \quad B'_{41} = T_3 \left(\tau_1^3 \cos \frac{3\pi\tau_1}{2\tau} - \tau_2^3 \cos \frac{3\pi\tau_2}{2\tau} \right); \quad B'_{42} = \frac{\pi T_3}{2\tau} \left(\tau_2^4 \sin \frac{3\pi\tau_2}{2\tau} - \tau^4 - \tau_1^4 \sin \frac{3\pi\tau_1}{2\tau} \right);$$

$$B'_{31} = T_3 \left(\tau_1^2 \sin \frac{3\pi\tau_1}{2\tau} - \tau_2^2 \sin \frac{3\pi\tau_2}{2\tau} + \tau^2 \right); \quad B'_{21} = T_3 \left(\tau_2 \cos \frac{3\pi\tau_2}{2\tau} - \tau_1 \cos \frac{3\pi\tau_1}{2\tau} \right);$$

$$B'_{11} = T_3 \left(\sin \frac{3\pi\tau_2}{2\tau} - \sin \frac{3\pi\tau_1}{2\tau} - 1 \right);$$

Застосовуючи розв'язок Декарта-Ейлера, знаходимо відповідний корінь (x_1) рівняння (9) та з урахуванням (8) визначимо другий тон коливань системи:

$$\omega_{2T} = x_2 + \frac{3\pi}{4\tau}, \quad (10)$$

де

$$\begin{aligned} x_2 &= R - \frac{B_3}{4}; \quad R = \sqrt{y_1 - \frac{a}{3}} - \sqrt{y_2 - \frac{a}{3}} - \sqrt{y_3 - \frac{a}{3}}; \quad y_1 = A + B; \\ y_2 &= -\frac{A+B}{2} + i\frac{A-B}{2}\sqrt{3}; \quad y_3 = -\frac{A+B}{2} - i\frac{A-B}{2}\sqrt{3}; \\ A &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}; \quad B = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}; \quad p = -\frac{a^2}{3} + b; \\ q &= 2\left(\frac{a}{3}\right)^3 - \frac{ab}{3} + c; \quad Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{3}\right)^2; \quad a = \frac{p'}{2}; \quad b = \frac{p'^2 - 4r'}{16}; \quad c = -\frac{q'^2}{64}; \\ p' &= -\frac{3}{8}B_3^2 + B_2; \quad q' = \frac{B_3^3}{8} - \frac{B_3B_2}{2} + B_1; \quad r' = \frac{B_3^2B_2}{16} - \frac{3}{256}B_3^4 - \frac{B_3B_1}{4} + B_0; \quad B_3 = \frac{B'_3}{B'_4}; \\ B_2 &= \frac{B'_2}{B'_4}; \quad B_1 = \frac{B'_1}{B'_4}; \quad B_0 = \frac{B'_0}{B'_4}. \end{aligned}$$

Слід зазначити, що в усіх випадках береться дійсне значення $x = \operatorname{Re}\{x\}$, відносна похибка визначення частоти другого тону не перевищує 2 % в діапазоні $-0.05\frac{\pi}{\tau} < x < 0.25\frac{\pi}{\tau}$.

Значить за рівняннями (6) та (10) визначається частота другого тону коливань вітки, що опускається з відносною похибкою, меншою 2 % в визначеному діапазоні (2).

Для знаходження частоти другого тону коливання в вітці, що піднімається, необхідно в виразах (5) та (9) замість τ_1, τ_2, T_3 підставити τ_2, τ_1, T_2 відповідно.

Слід також акцентувати увагу на той факт, що визначення другого тону коливання електромеханічної системи статично зрівноваженої або не зрівноваженої ШПУ має практичну цінність при розгляданні процесів гальмування завантаженої судини. Відповідно до рис. 2, в, при достатньо великій масі судини та достатньо малій довжині канату, перший та другий тони максимально наближаються один до одного, і неврахування другого тону коливань електромеханічної системи, може привести до значних коливань зусиль у різних точках перерізу головного каната, особливо у точці набігання каната на барабан.

На рис. 3 зображені графіки перехідних процесів у статично зрівноваженій ШПУ, при використанні структурного зображення, яке розглянуто [5], за умов $\tau_0 = \tau_{2T}$ ($\tau_{2T} = 0,7$ с), $\ddot{h}_{\max} = 1$ м/с². Дисипація енергії в канатах врахована за гіпотезою Фойгта ($\mu = 0.01$). Параметри механічної частини: $m_1 = 45$ т, $m_2 = 55,5$ т; $m_3 = 25,5$ т; $L_1 = 1050$ м; $L_2 = 380$ м (довжина головного та зрівноважуючого канатів відповідно); $q = 28.4$ кг/м; $v_6 = 4000$ м/с² (механічні властивості головних та зрівноважуючих канатів прийняті однаковими).

На рис. 4 показана спрощена та апроксимована за трьома частотами (тонами) структурна схема ШПУ, за умовою повної компенсації негативних пружних зв'язків в електроприводі при безінерційній САК. Таке достатньо спрощене зображення ШПУ (з урахуванням другого тону коливання в вітці, що опускається в режимі підйому вантажу), дозволяє оцінити перерегулювання прискорення барабана, за умовою різної довжини задаючого імпульсу (τ_0). Похибка оцінки менше 10 % порівняно з результатами, які отримані на моделі ШПУ, що розглянуто в [5].

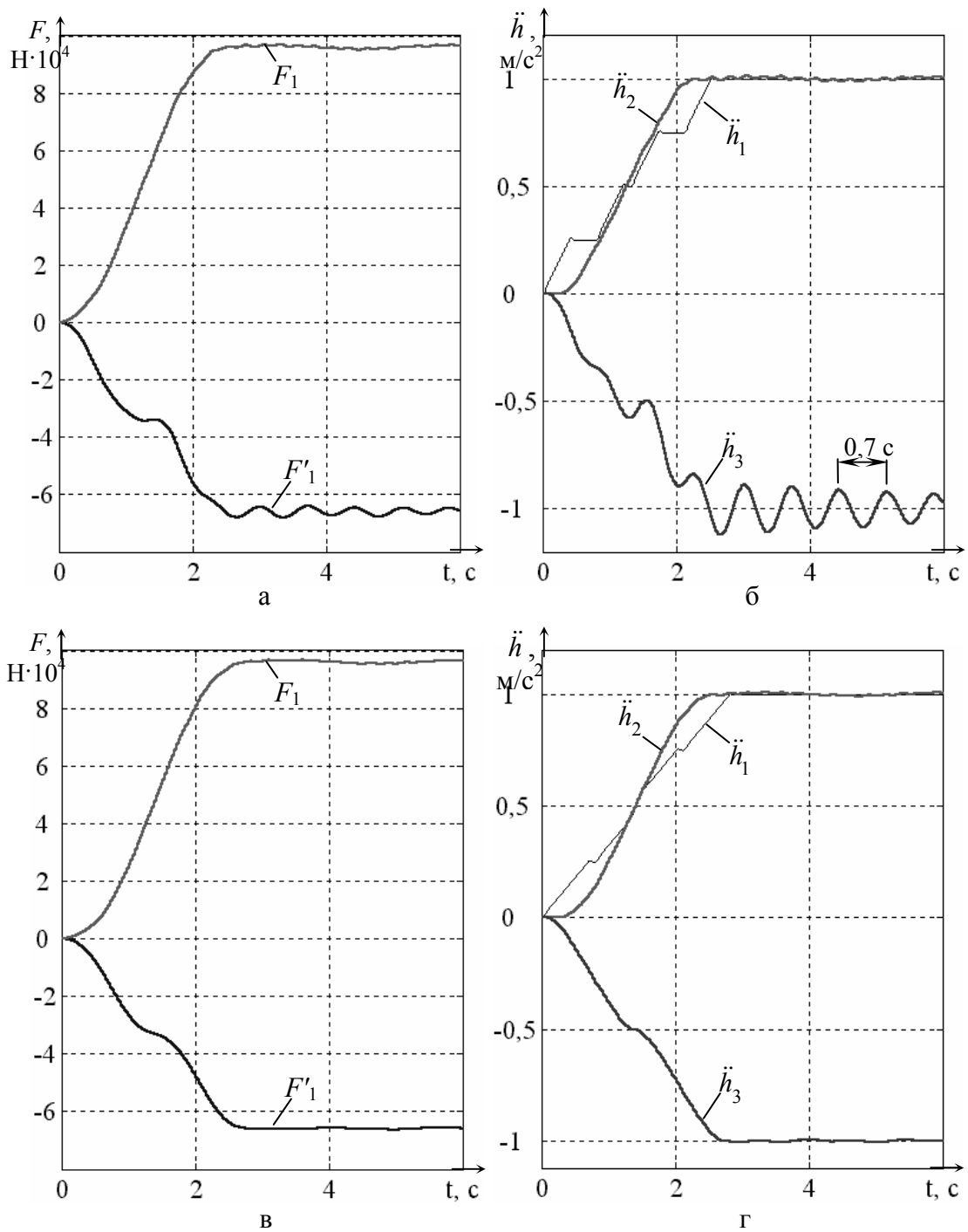


Рис. 3. Графіки перехідних процесів у статично зрівноваженій ШПУ при $\tau'_1 = 2,6 \text{ c}$, $\tau'_2 = 1,6 \text{ c}$, за умов $\tau_0 = 0,4 \text{ c}$ – а, б; $\tau_0 = 0,7 \text{ c}$ – в, г:
 а, в – зусилля в канаті у точці набігання (F_1) та збігання (F'_1) каната на барабан;
 б, г – прискорення барабана (\ddot{h}_1), завантаженої судини (\ddot{h}_2) та протизваги (\ddot{h}_3)

Максимальне перерегулювання прискорення в усталеному динамічному режимі визначається (рис. 5, 6) так:

$$\ddot{h}_2 = \left| \frac{\ddot{h}_{1\max} (a_1 + a_2)}{2\pi \tau_0 (\omega_{K1}^2 - \omega_{K1\Gamma}^2)} \right|;$$

$$\ddot{h}_3 = \left| \frac{\ddot{h}_{1\max} (a_3 + a_4)}{2\pi\tau_0 (\omega_{K2}^2 - \omega_{K2T}^2)} \right|,$$

де

$$a_1 = \omega_{K1T}^2 \tau'_1 \sin \frac{\pi\tau_0}{\tau'_1} \cos \frac{\pi}{2\tau'_1} (\tau'_1 + \tau'_2) -$$

$$- \omega_{K1}^2 \tau'_{1T} \sin \frac{\pi\tau_0}{\tau'_{1T}} \cos \frac{\pi}{2\tau'_{1T}} (\tau'_1 + \tau'_2);$$

$$a_2 = \omega_{K1T}^2 \tau'_1 \sin \frac{\pi\tau_0}{\tau'_1} \cos \frac{\pi}{2\tau'_1} (\tau'_1 - \tau'_2) -$$

$$- \omega_{K1}^2 \tau'_{1T} \sin \frac{\pi\tau_0}{\tau'_{1T}} \cos \frac{\pi}{2\tau'_{1T}} (\tau'_1 - \tau'_2);$$

$$a_3 = \omega_{K2T}^2 \tau'_2 \sin \frac{\pi\tau_0}{\tau'_2} \cos \frac{\pi}{2\tau'_2} (\tau'_1 + \tau'_2) - \omega_{K2}^2 \tau_{2T} \sin \frac{\pi\tau_0}{\tau_{2T}} \cos \frac{\pi}{2\tau_{2T}} (\tau'_1 + \tau'_2);$$

$$a_4 = \omega_{K2T}^2 \tau'_2 \sin \frac{\pi\tau_0}{\tau'_2} \cos \frac{\pi}{2\tau'_2} (\tau'_1 - \tau'_2) - \omega_{K2}^2 \tau_{2T} \sin \frac{\pi\tau_0}{\tau_{2T}} \cos \frac{\pi}{2\tau_{2T}} (\tau'_1 + \tau'_2);$$

$$\omega_{K1} = \frac{2\pi}{\tau'_1}; \quad \omega_{K1T} = \frac{2\pi}{\tau'_{1T}}; \quad \omega_{K2} = \frac{2\pi}{\tau'_2}; \quad \omega_{K2T} = \frac{2\pi}{\tau'_{2T}}.$$

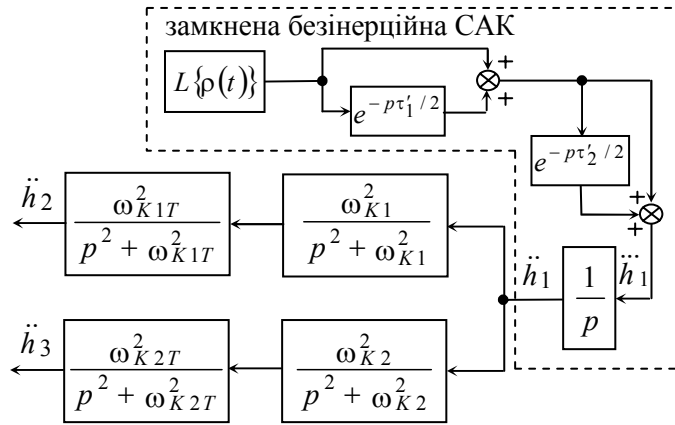


Рис. 4. Структурна схема електромеханічної системи, що містить другі тони коливань

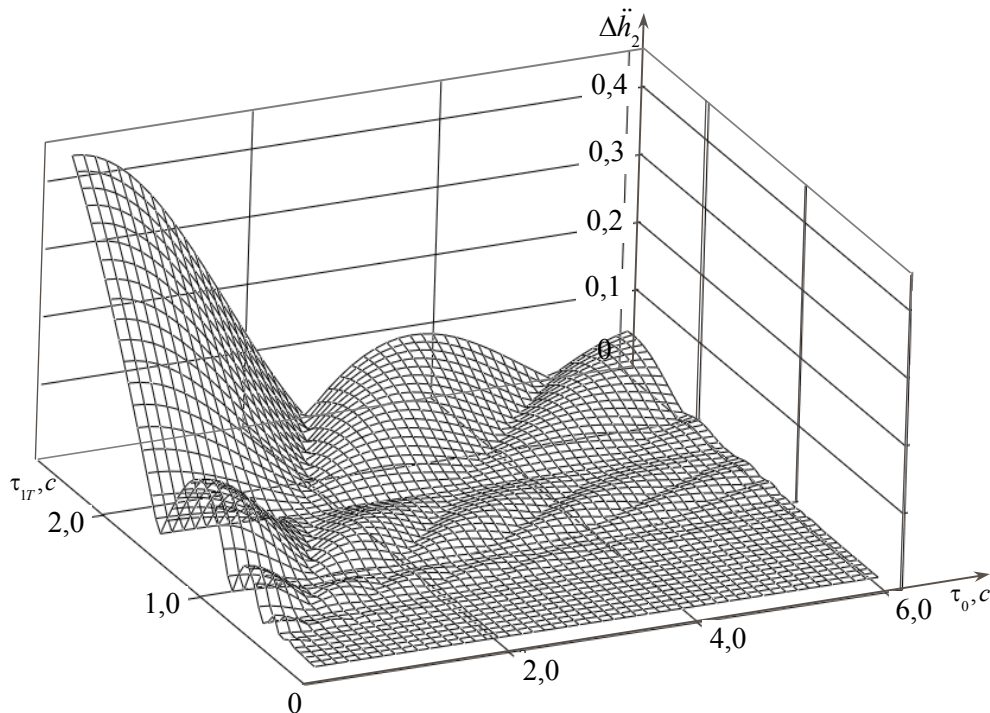


Рис. 5. Графіки амплітуди коливань прискорення \ddot{h}_2 під час формування сигналу керування за умов врахування другого тону коливань в електромеханічній системі ШПУ (прийнято $\tau'_1 = 2,6$ с, $\tau'_2 = 1,6$ с)

На рис. 5, 6 показані графіки оцінки перерегулювання прискорень (в.о.).

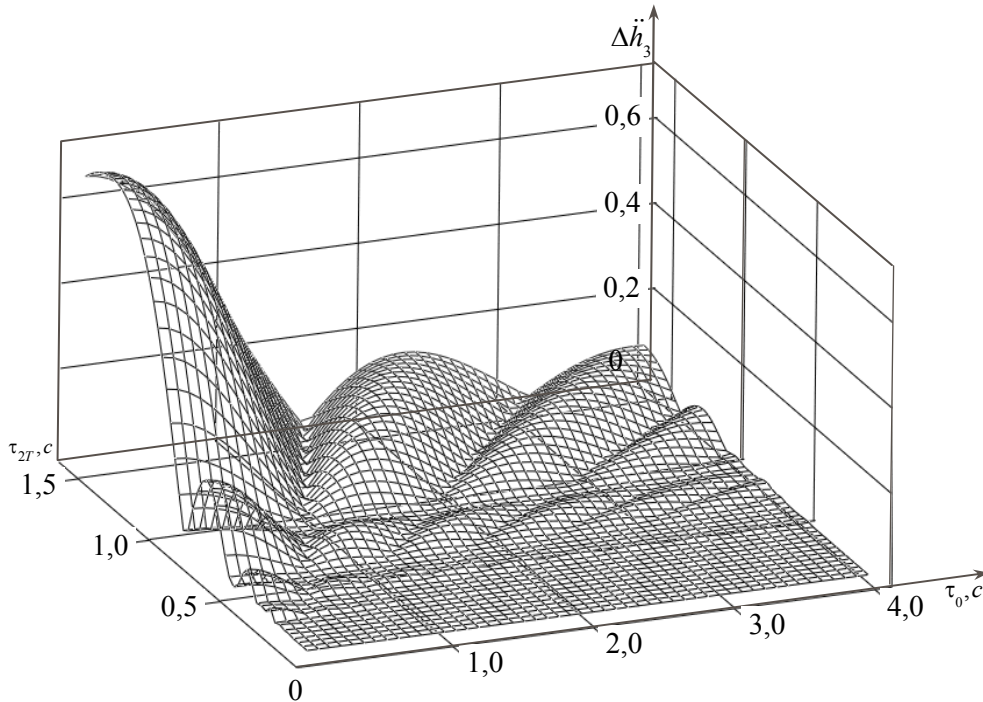


Рис. 6. Графіки амплітуди коливань прискорення \ddot{h}_3 під час формоутворення сигналу керування за умов врахування другого тону коливань в електромеханічній системі ШПУ (прийнято $\tau'_1 = 2,6$ с, $\tau'_2 = 1,6$ с)

Висновки. Аналізуючи отримані результати (рис. 3), зазначимо, що при використанні розглянутого способу формоутворення керуючого впливу, необхідно вибирати $\tau_0 = \tau_{2T}$.

Сформований сигнал керування за розглянутим способом забезпечує демпфування коливань (прискорення, зусиль, моменту та швидкості) ШПУ в кінці зміни прискорення барабана, за трьома частотами (тонами) коливання електромеханічної системи і в разі, коли $\frac{\tau'_2}{2} + \tau_{2T} < \frac{\tau'_1}{2}$ забезпечує більший темп розгону порівняно з законом (1).

Зауваження. Цей спосіб не може забезпечити інтенсифікацію режимів роботи, коли не виконується умова $\frac{\tau'_2}{2} + \tau_{2T} < \frac{\tau'_1}{2}$. Тому необхідно синтезувати такі способи формоутворення задаючого сигналу керування, які забезпечували б полігармонічне керування статично зрівноваженою або незрівноваженою ШПУ, при забезпеченні демпфування повного спектра тонів коливань в електромеханічній системі.

1. Киричок Ю.Г., Чермалых В.М. Привод шахтных подъемных установок большой мощности. – М.: Недра, 1979. – 336 с. 2. Тиристорный электропривод рудничного подъема / А.Д. Динкель, В.Е. Католиков, В.И. Петренко, Л.М. Ковалев. – М.: Недра, 1977. – 312 с. 3. Католиков В.Е., Динкель А.Д., Седунин А.М. Автоматизированный электропривод подъемных установок глубоких шахт. – М., Недра, 1983. – 270 с. 4. Довгань С. М., Самойленко А. А. Способы формирования задающих воздействий в системах управления подъемными установками, обеспечивающие отсутствие колебаний в конце периода разгона // Вісн. Кремен. держ. політехн. ун-ту: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 2(19), Т. 1. С. 68–72. 5. Довгань С.М., Самойленко А.А. Обґрунтування раціонального представлення електромеханічної системи з податливими елементами для реалізації оптимальних систем автоматичного керування // Сб. науч. тр. НГУ № 15. Т. 1. – Днепропетровск: РВК НГА України, 2002. – С. 167–176.