

УДК 621.01

В. М. ГУРСЬКИЙ, Я. В. ШПАК

Національний університет “Львівська політехніка”

СИНТЕЗ ВЛАСНИХ ЧАСТОТ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ТРИМАСОВИХ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН

Ї Гурський В.М., Шпак Я.В., 2010

Наведено результати досліджень тримасової коливальної системи, синтезу її власних частот коливань, аналізу амплітудно-фазочастотних характеристик і можливих режимів роботи під дією електромагнітного та інерційного збуджень коливань.

This article describes researches of the three-mass oscillating system, synthesis of its own frequencies of vibrations, analysis of amplitude-phase-frequency characteristics and possible modes works under the action of electromagnetic and inertia excitations of vibrations.

Вступ. Використання механічних коливальних систем (МКС) із силовим збудженням різного роду (електромагнітним, інерційним) вимагає окремого підходу щодо розрахунку параметрів системи: інерційних значень коливальних мас, жорсткостей пружних ланок, величини яких визначають, враховуючи тип та умови роботи приводу, забезпечуючи у результаті задані характеристики динамічної системи вібраційного пристрою.

Постановка проблеми. Пружно-інерційні параметри МКС визначають її амплітудно-фазочастотні характеристики (АФЧХ) та можливі режими роботи за різних умов силового збудження і мають, як правило, різний характер. Визначальні параметри системи, враховуючи задане чи доцільне співвідношення між ними, дають змогу окреслити технологічні можливості вібраційної машини та використання певних типів вібраційних приводів. Оцінювати роботу таких динамічних систем зручно на основі синтезу власних частот коливань, зокрема, на основі їх співвідношення, яке визначає взаємозв'язок між параметрами системи, режимами руху коливальних мас за різних типів силового збудження.

Аналіз останніх досліджень. Тримасові МКС широко використовуються для різного класу технологічних вібраційних машин [1, 2]. Їх виконання з електромагнітним приводом та з розрахунком на високоефективний міжрезонансний режим роботи на основі синфазних коливань окреслено в [2]. Використанням тримасових систем ефективно інтенсифікуються технологічні процеси із реалізацією полічастотних коливань [3]. Основну увагу приділяють вивченню можливих режимів роботи, тобто синтезу власних частот коливань, встановленню потрібних АФЧХ.

Постановка задачі. Задача синтезу власних частот у тримасовій МКС та їхній вплив на динамічні характеристики системи і режими руху розглядатимуться із обмеженням щодо жорсткостей пружних ланок, сили пружності яких приймаються лінійними. Отримавши вираз співвідношення частот, із якого встановлюються залежності між параметрами системи, а також динамічні можливості МКС для вібраційних машин із різноманітним силовим збудженням (електромагнітним та інерційним як найбільш поширених типів віброприводу), оцінюються можливі режими роботи цих вібромашин у межах отриманої частотної області. Як окремий випадок розглядається МКС із однаковими жорсткостями основних пружних систем. Це визначається використанням однотипних пружних елементів між різними коливальними масами, які в динамічних системах є одним із найважливіших вузлів. Отже, підналагоджувати систему можна, коригуючи інерційні параметри коливальних мас без втручання у пружні ланки системи.

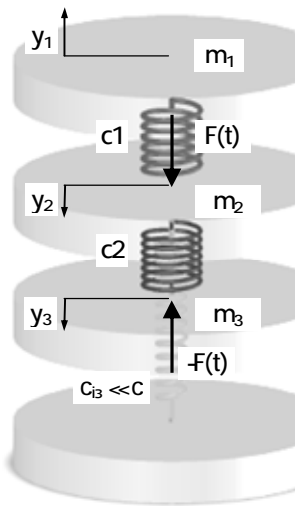


Рис. 1. Структурна схема тримасової МКС із електромагнітним збуренням

Виклад основного матеріалу. Параметри тримасової МКС ($m_1, m_2, m_3, c_1, c_2, c_{i3}$) визначають власні частоти системи ω_1 і ω_2 й амплітуди коливань мас, а режим роботи вибирається за технологічними вимогами. Серед параметрів МКС вихідним є значення m_1 (робочого органу), враховуючи технологічні і конструктивні міркування.

Досліджувану тримасову МКС із силовим (електромагнітним) збуренням наведено на рис. 1, де активна коливальна маса m_1 , проміжна $m_2 = k \cdot m_1$ і реактивна $m_3 = s \cdot m_1$ з'єднані пружними ланками із жорсткостями c_1 і c_2 за напрямком коливань y . Силова дія від електромагнітного приводу передається на проміжну ($F(t)$) і реактивну масу ($-F(t)$). Рівняння руху електричної складової (приводу) та її вплив на динамічні процеси не розглядатимемо.

Матриці інерційних \mathbf{M} і жорсткісних \mathbf{C} (без врахування жорсткості віброізоляторів $c_{i3} \ll c_1, c_2$) параметрів та зовнішніх силових факторів \mathbf{P} на основі узагальненої системи диференціальних рівнянь руху тримасової МКС [2] мають вигляд:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & k \cdot m_1 & 0 \\ 0 & 0 & s \cdot m_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 \\ -F \\ F \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Коливальна маса m_2 приймається залежно від маси робочого органу m_1 за співвідношенням $m_2 = (\mathbf{IK5}) \cdot m_1$, зокрема, як для двомасових МКС, які коливаються в протифазі із амплітудами $Y_2/Y_1 = m_1/m_2$. Тобто $k = \mathbf{IK5}$.

Для визначення реактивної маси m_3 , яка бере участь у силовому електромагнітному збуренні, будемо користуватися методом синфазності [2], що дає змогу забезпечити синфазні коливання між проміжною масою m_2 та реактивною масою m_3 в околі другої власної частоти коливань. Для цього користуємося спрощеними формулами для розрахунку параметрів МКС, оскільки повна методика має на меті на досягнення високоефективних режимів за рахунок перерозподілу параметрів і зближення власних частот коливань. У цьому випадку із тримасової МКС виділяється двомасова резонансна структура $m_1 \leftrightarrow c_1 \leftrightarrow m_2$, де реактивна маса розраховується як:

$$m_3 = (1 - z^2) \cdot (m_2 + m_1) \cdot m_2 / (z^2 \cdot (m_2 + m_1) - m_2), \quad (2)$$

тоді $s = k \cdot (k + 1)(1 - z^2) / (k \cdot (z^2 - 1) + z^2)$, де z – резонансне налагодження МКС відносно другої власної частоти коливань.

Жорсткості МКС повинні бути строго визначені за формулами, які забезпечують синфазний режим роботи та кратність власних частот системи. Причому приймемо c_1 як для розрахунку спрощених синфазних МКС, тобто двомасових резонансних структур:

$$c_1 = m_1 \cdot m_2 \cdot (\omega/z)^2 / (m_1 + m_2) = k \cdot m_1 \cdot (\omega/z)^2 / (k + 1), \quad (3)$$

У такому випадку фіксується друга ω_2 власна частота коливань (робоча), а перша власна частота коливань $\omega_1 < \omega_2$ залежатиме від значення жорсткості c_2 і не впливатиме на робочу частоту коливань. Цей принцип покладено в основу роботи одночастотних синфазних машин із “нульовою жорсткістю”, коли $c_2 \ll c_1$. Для знаходження c_2 потрібно розв'язати задачу синтезу

власних частот системи, які знайдемо з використанням спеціальної функції у програмному продукті MathCAD $\lambda = \text{eigenvals}(\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{C})$, $\omega = \sqrt{\lambda}$, [рад/с].

Задамо умову кратності ненульових власних частот, прийнявши попередньо $c_{i3} = 0$, значення реактивної маси згідно з (2), а жорсткості c_1 згідно з (3):

$$n_\omega = \omega_2 / \omega_1, \tag{4}$$

з якої отримаємо вираз для знаходження жорсткості c_2 , що задовольняє умову кратності n_ω (4) і синфазності (2):

$$c_2 = \frac{m_2(m_1 + m_2)(z^2 - 1) \left(5z\sqrt{25z^2 - 16} - 25z^2 + 8 \right) \left(\frac{\omega}{z} \right)^2}{\zeta_\omega m_1}, \tag{5}$$

або

$$c_2 = \frac{k \cdot m_1 \cdot (k + 1)(z^2 - 1) \left(5z\sqrt{25z^2 - 16} - 25z^2 + 8 \right) \left(\frac{\omega}{z} \right)^2}{\zeta_\omega}, \tag{6}$$

де ω – частота збурення системи, ζ_ω – параметр, що забезпечує задане відношення частот (4).

Досліджено МКС із параметрами: $m_1 = 20 \text{ кг}$, $\omega = 314.15 \text{ рад/с}$, $z = 0.98$, $k = 1.5$. Тоді, $s = 0.165$, а значення жорсткості c_1 розраховують згідно з (3) для забезпечення власної частоти коливань ω/z ($c_1 = 1.23 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$). Для відношень частот $n = 1.5; 2; 3; 4$ потрібно використовувати у рівняннях (5) і (6) відповідні значення параметра $\zeta_\omega = 4; 8; 16; 32$ (рис. 2, а), а жорсткість c_2 забезпечує задане співвідношення між частотами n (4) і залежить від параметра ζ_ω (рис. 2, б).

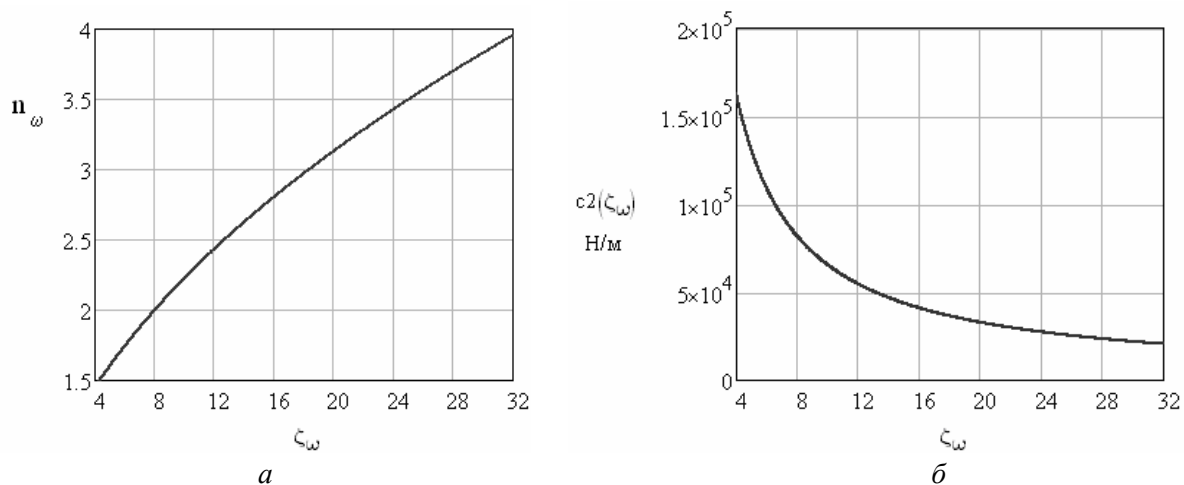


Рис. 2. Графічні залежності відношення частот n_ω (а) і жорсткості c_2 від параметра ζ_ω

Якщо для такої МКС розглянути залежність перших двох власних частот коливань від жорсткості c_2 (рис. 3, а), то встановлюємо закономірність збільшення першої власної частоти коливань ω_1 із зростанням жорсткості c_2 . Для забезпечення відповідних $n = 1.5; 2; 3; 4$ із графіка рис. 2, б видно, що фіксована друга власна частота коливань ω_2 (рис. 3, а) мало змінює своє значення, похибка (%) якого визначається як $\Delta(\xi_\omega) = (\omega/z - \omega_2) \cdot 100\% / (\omega/z)$ (рис. 3, б) і становить для $n = 1.5$ не більше 2%.

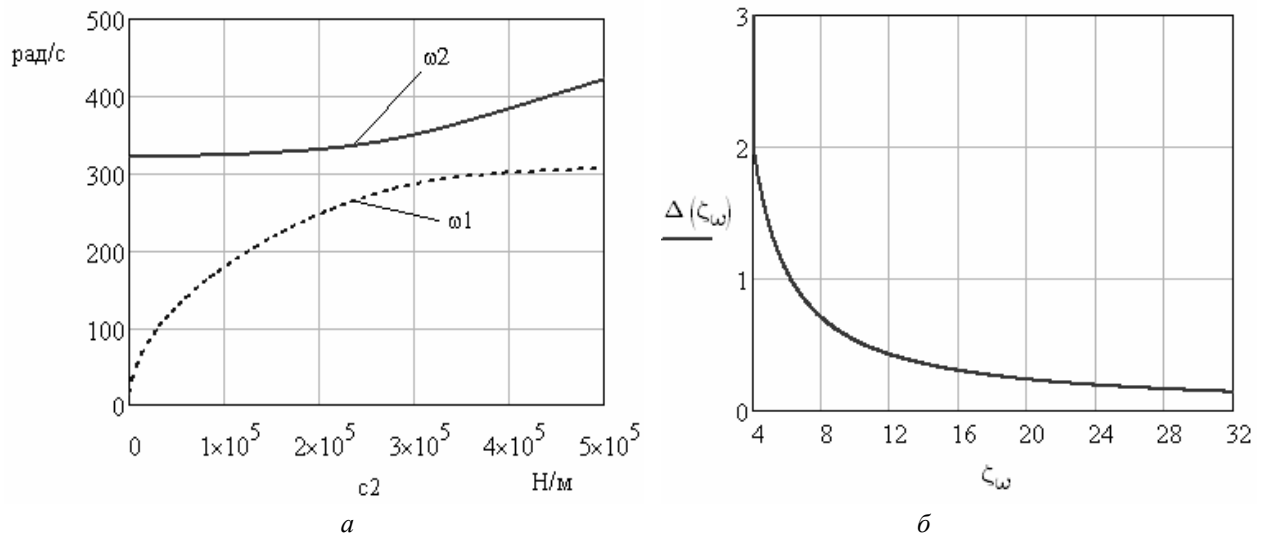


Рис. 3. Графічні залежності власних частот коливань (а) від жорсткості c_2 та відносної похибки Δ власної частоти ω_2 від параметра ζ_ω (б)

На основі рівнянь (2)–(6) в околі другої власної частоти ω_2 отримаємо синфазні коливання між проміжною масою m_2 та реактивною масою m_3 із однаковими амплітудами, які не залежать від значення співвідношення між частотами n і жорсткості c_2 , а визначаються виключно номінальним зусиллям збурення F та параметрами резонансної структури $m_1 \leftrightarrow c_1 \leftrightarrow m_2$. Амплітудно-фазовий вектор стану тримасової МКС на основі рівняння (1) має вигляд для частоти вимушених коливань $\omega = 314.15 \text{ рад/с}$ і $F = 500 \text{ Н}$:

$$\begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 2.559 \\ -1.537 \\ -1.537 \end{Bmatrix} \text{ мм}, \quad \begin{Bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 180 \\ 180 \end{Bmatrix} \text{ deg}.$$

Розглянемо тримасову МКС, у якій пружні ланки мають однакову жорсткість. Матриця коефіцієнтів жорсткості в (1) запишеться:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c & -c & 0 \\ -c & 2 \cdot c & -c \\ 0 & -c & c \end{bmatrix},$$

а частотне рівняння набуде вигляду

$$k \cdot s \cdot m_1^3 \cdot \omega^4 - (k + k \cdot s + 2 \cdot s) \cdot c^2 \cdot m_1^2 \cdot \omega^2 + c^2 \cdot m_1 \cdot (k + s + 1) = 0, \quad (7)$$

з якого визначимо значення двох власних частот коливань тримасової МКС:

$$\omega_{1,2} = \lambda \cdot \sqrt{\frac{k \cdot (s+1) + 2 \cdot s \cdot m \sqrt{k^2 \cdot (s-1)^2 + 4 \cdot s^2}}{2 \cdot k \cdot s}}, \quad (8)$$

де $\lambda = \sqrt{c/m_1}$ – парціальна частота коливань активної маси.

Співвідношення частот (4) визначаємо так:

$$n = \sqrt{\frac{2 \cdot (k \cdot (s+1) + 2 \cdot s)}{k \cdot (s+1) + 2 \cdot s - \sqrt{k^2 \cdot (s-1)^2 + 4 \cdot s^2}} - 1}, \quad (9)$$

яке є функцією $n = f(k, s)$ інерційних коефіцієнтів k, s та не залежить від парціальної частоти коливань активної маси, а отже і від жорсткості c пружних ланок.

Рис. 4 і рис. 5 отримано на основі формули (9), яка є цільовою функцією у розгляді оптимізаційних задач. Однією з них є пошук мінімального значення $n \in \min$ за фіксованого k на діапазоні $s_1 \leq s \leq s_2$. Приклад розв'язку показано на рис. 6 для $k = 0.5; 1; 1.5; 2$.

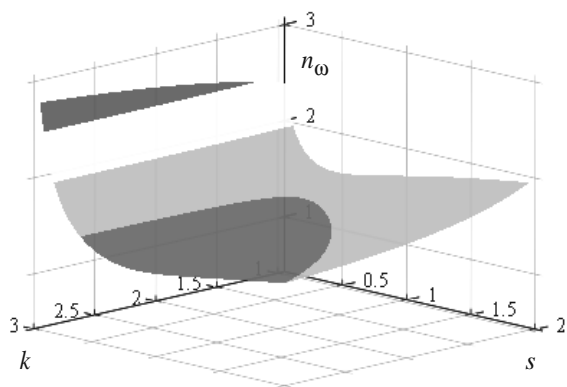


Рис. 4. Графічний вигляд цільової функції у межах $k = 0.1..3, s = 0.1..2$

Задача пошуку значення s_{\min} , яке задовольняє потрібне значення цільової функції $n = n^*$, розв'язується в околі k_{\min} за умови $(k + s) \in \min$. Такі задачі використовують у випадку забезпечення наперед заданого співвідношення частот у МКС з можливістю зменшення ваги конструкції. Так, для $n^* = 1.5$ (рис. 5, б) отримаємо $k_{\min} = 1.4$ і $s_{\min} = 0.6$ ($k + s = 2$). Проте за цих інерційних коефіцієнтів не отримаємо бажаного синфазного руху в околі другої власної частоти. Їхні значення взаємопов'язані рівнянням (2).

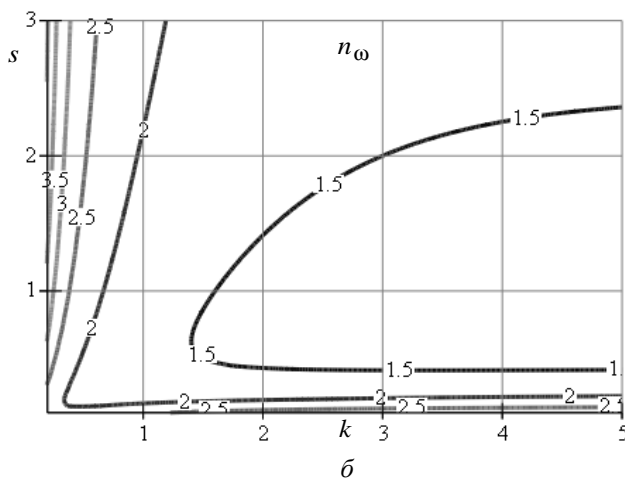
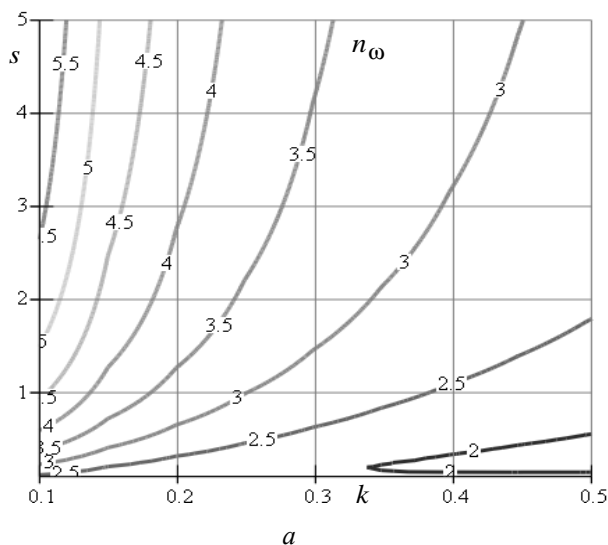


Рис. 5. Лінії рівня цільової функції $n_{\omega} = f(k, s)$ для $k = 0.1..0.5, s = 0.1..0.5$ (а) і $k = 0.1..0.5, s = 0.1..0.3$ (б)

Дослідимо можливі режими роботи розглянутої МКС для оптимізованих значень $k_{\min} = 1.4$ і $s_{\min} = 0.6$, що забезпечують співвідношення частот $n_{\omega}^* = 1.5$. Наявність двох власних частот (8) дає змогу стверджувати про можливі наступні одночастотні режими роботи із частотою вимушених коливань ω : дорезонансний щодо ω_1 , резонансний на 1-й власній частоті $\omega \approx \omega_1$, резонансний на 2-й власній частоті $\omega \approx \omega_2$, міжрезонансний $\omega_1 < \omega < \omega_2$ та зарезонансний відносно 2-ї власної частоти $\omega_2 < \omega$. Ці режими для відомого значення $m_1 = 20 \text{ кг}$ забезпечуються жорсткістю c пружних ланок за формулою (8). Причому розраховувати можна як від ω_1 , так і від ω_2 , вважаючи останню заданою.

Міжрезонансний режим можна забезпечити відносно другої частоти $\omega_2 = 314.15 \text{ рад/с}$, використавши для неї резонансне налагодження z . У такому випадку отримаємо кінцевий вираз для жорсткості, що і визначатиме потрібний режим роботи:

$$c = \frac{2 \cdot m_1 \cdot k \cdot s}{k \cdot (s+1) + 2 \cdot s + \sqrt{k^2 \cdot (s-1)^2 + 4 \cdot s^2}} \cdot \left(\frac{2}{z} \right)^2. \quad (10)$$

Для частоти вимушених коливань $\omega = 314.15 \text{ рад/с}$ (f_b) при $z > 1$ отримаємо зарезонансний режим роботи (зона 3), $z = 1$ – резонансний на ω_2 (f_2), $z = 1/n_\omega$ – резонансний на ω_1 (f_1), $1/n_\omega < z < 1$ – міжрезонансний (зона 2), $z < 1/n_\omega$ – дорезонансний (зона 1) щодо ω_1 на графіку режимів роботи (рис. 7). Остаточню вибрати (уточнити) резонансне налагодження можна, аналізуючи АЧХ і ФЧХ.

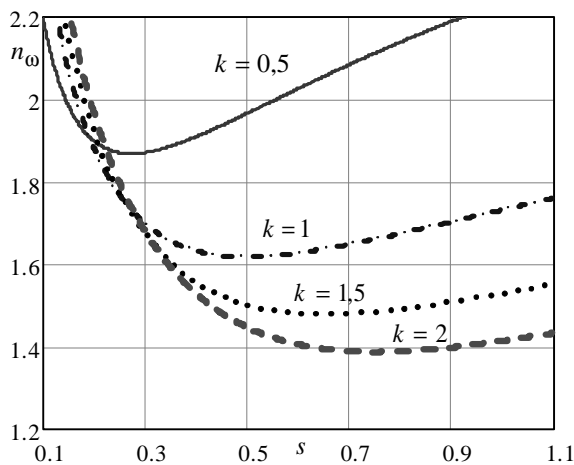


Рис. 6. Залежність співвідношення частот у межах $s = 0.1..1.1$ для фіксованих k

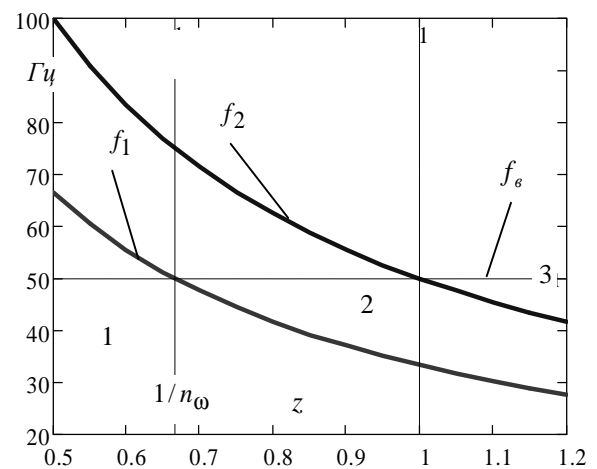


Рис. 7. Графік режимів роботи системи

Наявність двох власних частот коливань у тримасовій механічній системі дає змогу також отримати результуючі двочастотні коливання, використовуючи двочастотне збурення. Для електромагнітного збурення можна використовувати систему керування [4], яка дає змогу отримати проміжні частоти, які не дорівнюють 25, 50 і 100 Гц.

На основі оптимізації щодо $n^* = 1.5$, отримаємо інерційно-жорсткісні параметри системи: $m_1 = 20 \text{ кг}$, $m_2 = 28 \text{ кг}$, $m_3 = 12.5 \text{ кг}$, $\omega_2 = 314.15 \text{ рад/с}$, $c = 7.085 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$ для побудови АЧХ і ФЧХ, що показані на рис. 8, а для силового електромагнітного збурення при $F = 500 \text{ Н}$ і $z = 1$. Критерієм вибору раціонального режиму роботи системи (вибору z , або частоти збурення) є рух проміжної і реактивної мас, близький до синфазного ($\varphi_2 \approx \varphi_3$), що можливо в околі першої власної частоти коливань 33.3 Гц при $z = 1/n$. Це сприяє зменшенню енерговитрат віброзбудувача під час забезпечення потрібних амплітуд коливань робочого органу (наприклад, для Y_1). Синфазний рух за однакових амплітуд коливань мас ($Y_2 = Y_3$) наявний у міжрезонансній області за першою власною частотою коливань. Методику уточненого розрахунку на синфазний рух у білярезонансному режимі на ω_2 та можливості забезпечення додаткових динамічних підсилень коливань (високоєфективних режимів) детально викладено у [2]. Для досягнення цього використовуються пружні ланки із різною жорсткістю та відповідно перераховуються інерційні параметри системи.

Дослідимо систему (1) в умовах інерційного збурення на реактивній коливальній масі – тоді матриця збурення має вигляд $\mathbf{P} = [0 \ 0 \ F]^T$. Критерієм вибору раціонального режиму роботи системи з інерційним збуренням на реактивній масі доцільно вважати міжрезонансну область (рис. 8, б), а саме точку, в якій ця маса має мінімальну амплітуду коливань ($Y_3 = 0$, а $\phi_1 = 0$). За таких умов вибір резонансного налагодження у цій точці дасть змогу на практиці встановлювати дебалансні віброзбуджувачі на ділянці з мінімальними коливаннями, тим самим збільшуючи довговічність вузлів приводу. Стосовно руху активної і проміжної маси у цій точці, то вони однакові за амплітудами та протилежні за фазами ($Y_1 = -Y_2$), що створює передумови для використання обох мас як робочих органів.

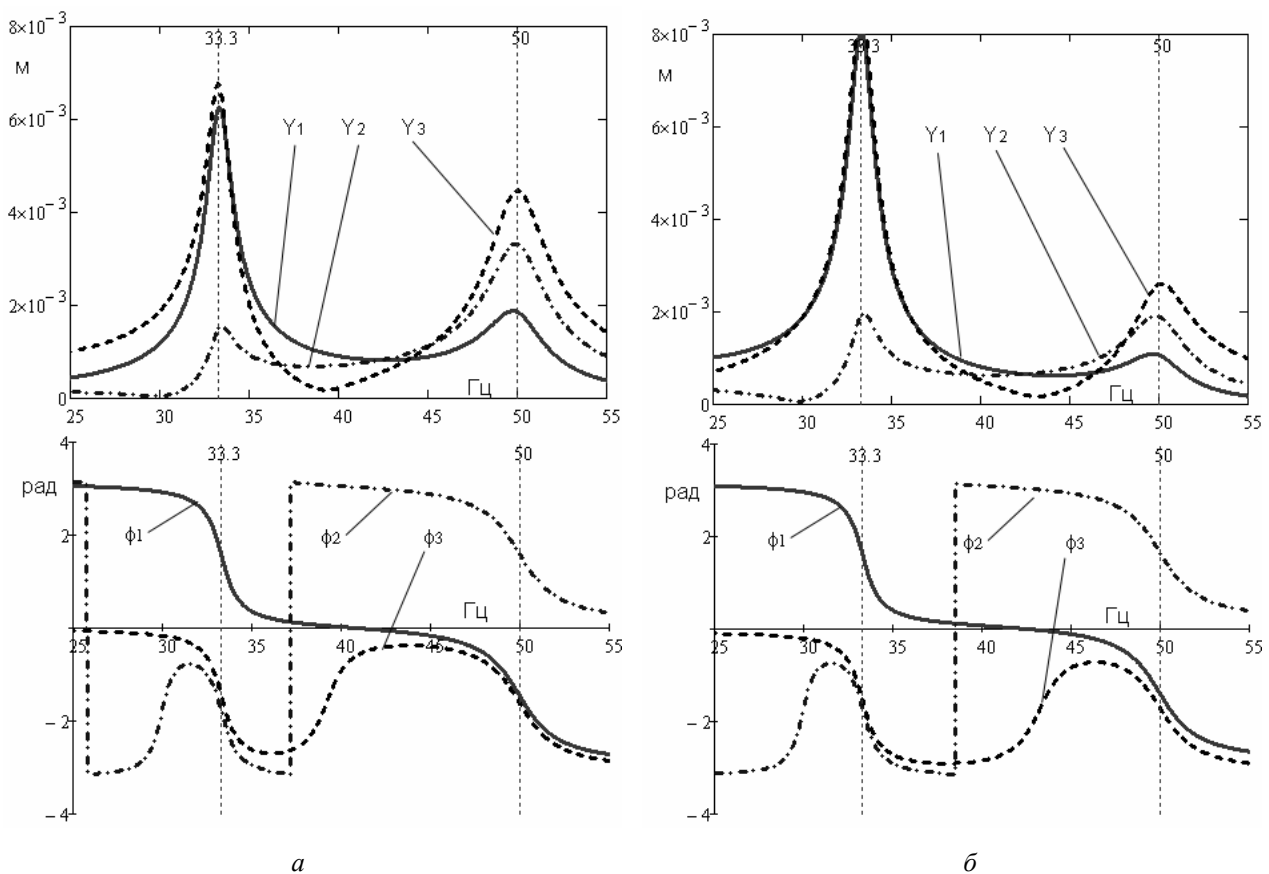


Рис. 8. АЧХ і ФЧХ системи для електромагнітного (а) та інерційного (б) збурення

Порівнюючи отримані АЧХ і ФЧХ системи за різних типів силового збурення, доходимо висновку, що система з інерційним збуренням на першій власній частоті має вищий динамічний потенціал, на другій – нижчий, ніж система з електромагнітним збуренням. Характер зміни ФЧХ є практично однаковим – активна і проміжна коливальні маси змінюють знак фази коливань на протилежний у міжрезонансній області. Причому, активна маса для обох збурень на одній і тій самій частоті, а проміжна і реактивна маси при інерційному збуренні мають дещо більший діапазон зміни фаз коливань.

Висновок. Проведено синтез власних частот коливань тримасової МКС, на основі якого:

1) отримано аналітичний вираз для розрахунку жорсткості пружної ланки у силовому збуренні мас, що дає змогу забезпечити синфазні коливання цих мас на другій власній частоті за заданого співвідношення між основними частотами системи;

2) обгрунтовано, що на отримані синфазні коливання не впливає значення жорсткості пружної ланки у силовому збуренні, розрахованої із забезпеченням співвідношень між частотами $n = 1.5; 2; 3; 4$;

3) встановлено особливості АФЧХ та режими роботи тримасової МКС із пружними ланками однакової жорсткості за силового електромагнітного та інерційного (на одній реактивній масі) збурень, за яких система має різні коефіцієнти динамічності на резонансних частотах (вищі на першій частоті для інерційного збурення і на другій частоті для електромагнітного збурення) та практично однакові динамічні характеристики у міжрезонансній області.

1. Вайсберг Л. А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. – М.: Недра, 1986. – 144 с. 2. Ланець О. С. Високоефективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): Монографія. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2008. – 324 с. 3. Бигармонический электромагнитный вибровозбудитель: А.с. 645910. СССР. МКИ В 65 G 27/24 / А. А. Борщевский, О. Л. Санько (СССР) – № 2101174/29-03; Заявлено 03.02.75; Опубл. 05.02.79, Бюл. № 5. – 2 с.: ил. 4. Патент на корисну модель 42468 Україна, МПК(2009) G05D 19/00. Мультичастотна система керування однотактного електромагнітного вібробудника / О. В. Гаврильченко, І. М. Мельничук, С. А. Таянов, В. М. Гурський, В. С. Шенбор; заявник і патентовласник Нац. ун-т “Львівська політехніка” – № и 2009 00132; заявл. 08.01.2009; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 31.

УДК 621.9.048.6

В.В. ИВАНОВ

Азовский технологический институт,
филиал Донского государственного технического университета

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО ВИБРАЦИОННОГО МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ

Ї Иванов В.В., 2010

Розглянуто технологічні можливості під час комбінування методів обробки поверхонь деталей на базі вібраційного. Суміщення процесів дає змогу покращити якість поверхневого шару, підвищити декоративний вигляд і корозійну стійкість деталей.

In the article technological possibilities are examined during combining of methods of treatment of surfaces of details on the base of oscillation. Combination of processes allows to improve quality of superficial layer, promote a decorative kind and corrosive firmness of details.

Технологические возможности процесса виброобработки определяются особенностями взаимодействия частиц рабочей среды с поверхностью обрабатываемых деталей, видом рабочей среды и режимами работы виброустановки.

Изучение возможности разработки процесса вибрационной обработки и окисления деталей из алюминия и его сплавов показывает, что совмещение процессов позволяет улучшить качество поверхностного слоя, повысить декоративный вид и коррозионную стойкость деталей.

В процессе вибрационной обработки поверхностный слой металла под действием нормальной и тангенциальной сил в момент удара деформируется. Пластическая деформация вызывает