

МОДЕЛЮВАННЯ ПУСКУ ВІБРАЦІЙНИХ СИСТЕМ ПІДВИЩЕНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ З РЕАКТИВНИМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ПРИВОДАМИ

ã Гурський В.М., Ланець О.С., Шпак Я.В., 2012

Змодельовано пуск тримасової вібраційної системи підвищеної ефективності з електромагнітним приводом за реактивною схемою живлення. Встановлюються умови розбігу вібраційної системи за миттєвого вмикання та плавного пуску.

Ключові слова: *вібраційна система, електромагнітний привід, рівняння Лагранжа-Максвелла, перехідний процес, пуск вібраційної системи.*

The article describes the modelling of starting of the three-mass vibratory system of enhanceable efficiency with an electromagnetic drive with the reactive chart of feed. The terms of running approach of the vibratory system at the sudden including and at the smooth starting are set.

Key words: *вібраційна система, електромагнітний привід, рівняння Лагранжа-Максвелла, перехідний процес, пуск вібраційної системи.*

Вступ

Сучасні засоби автоматизації виробництва сприяють вирішенню багатьох технічних проблем, пов'язаних із пуском та функціонуванням технологічного обладнання. Вони дозволяють реалізувати повною мірою динамічні можливості механічних систем, розширити їхній спектр технологічного застосування. Новітні системи керування вібраційним технологічним обладнанням ґрунтуються на частотних перетворювачах, що містять засоби для гнучкої зміни електромеханічних параметрів.

Постановка проблеми

Пуск вібраційних систем є однією з найважливіших проблем на практиці. Що стосується резонансних машин з електромагнітним приводом, то необхідно правильно вибрати номінальний зазор між якорем та осердям з котушкою, за якого під час перебігу перехідних процесів та зміни навантаження не виникатиме співударень між складовими приводу. Зазвичай, інтенсивність коливань під час перехідних процесів визначається співвідношенням масових параметрів коливальних мас. У цьому сенсі тримасові вібраційні системи підвищеної ефективності характеризуються малими інерційно-масовими характеристиками реактивної коливальної маси, на яку монтується якорі електромагнітного приводу. До пуску таких вібраційних систем потрібно ставитися з особливою обережністю, оскільки за інтенсивних коливань реактивної маси можуть виникати співударення, граничні значення напружень у пружних ланках, збільшення струму та перегрівання котушки в осердях.

Аналіз останніх досліджень

Серед останніх досліджень у галузі моделювання та динамічного аналізу вібраційних технологічних систем варто відзначити роботи С.Л. Цифанського [1], О.С. Божко [2], М.В. Хвінгії, в яких повною мірою розкрито особливості різноманітних схем живлення та електромеханічні процеси в резонансних двомасових вібраційних системах. Особливими за різноманітністю умов

роботи є багатомасові вібраційні системи, що можуть функціонувати у різних частотних областях та в резонансних режимах роботи зокрема.

Постановка задачі

Розглянемо задачу формування системи диференціальних рівнянь електромеханічних коливальних процесів у тримасовій вібраційній системі з електромагнітним віброзбуджувачем (ЕМВ) за реактивною схемою вмикання. За допомогою чисельного моделювання математичної моделі встановити характер розбігу системи, а також перевірити умови пуску у разі миттєвого вмикання за вибраного номінального зазору в електромагнітному приводі. Розглянути можливість зменшення величини зазору за умови плавного пуску вібраційної системи.

Виклад основного матеріалу

Узагальнену структурну схему тримасової вібраційної системи ланцюгового типу з електромагнітним приводом наведено на рис. 1. До її складу входять коливальні маси 1–3 з масовими характеристиками відповідно m_1 , m_2 , m_3 та пружні ланки 4, 5 із жорсткостями c_1 , c_2 за напрямком коливань мас. Для силового збурення механічної системи використовується електромагнітний привод, що в загальному випадку складається з n числа паралельно ввімкнених осердь 6 із котушками та якорів 7, розташованих з відносним повітряним проміжком d_0 на суміжних коливальних масах 2 і 3. На основу вібраційна система встановлюється віброізоляторами 8 із жорсткістю $c_{i3} \ll (c_1, c_2)$.

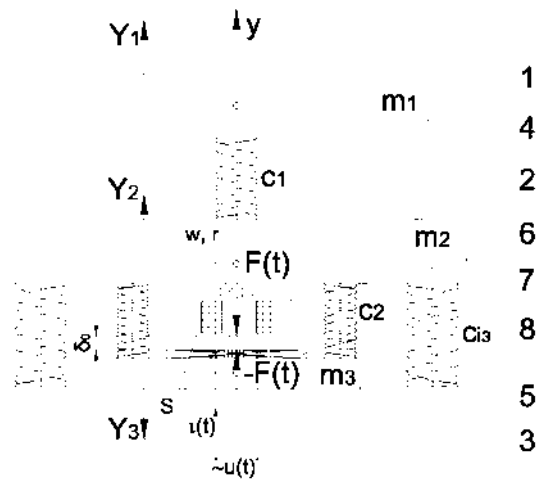


Рис. 1. Структурна схема тримасової вібраційної системи з електромагнітним приводом за реактивною схемою вмикання

В основу моделювання покладається система диференціальних рівнянь, що описує коливальні процеси в електромеханічній системі. Найуживанішим підходом, що дає змогу її отримати, є системи рівнянь Лагранжа-Максвелла [3, 4]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L^*(t)}{\partial i_k(t)} \right) + \frac{\partial D_e(t)}{\partial i_k(t)} &= u_k(t), \quad k = 1 \dots n, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L^*(t)}{\partial y_j(t)} \right) - \frac{\partial L^*(t)}{\partial y_j(t)} + \frac{\partial D_m(t)}{\partial y_j(t)} &= F_j(t), \quad j = 1, 2, 3, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $L^*(t) = T(\dot{\mathbf{y}}_j(t)) - \Pi(y_j(t)) + W(y_j(t), i_k(t))$ – функція Лагранжа; T, Π, W – кінетична, потенціальна та магнітна енергії вібраційної системи; D_e, D_m – дисипативні функції електромагнітної та механічної системи; $F_j(t)$ – узагальнені електромагнітні сили (тягове зусилля електромагніту, що діє на j -ту коливальну масу).

Вирази для кінетичної та потенціальної енергій, а також дисипативна функція Релея розглядуваної тримасової механічної системи записані в [5].

Магнітна енергія та електрична дисипативна функція електромагнітного контуру мають вигляд [3, 4]:

$$W(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n L_k(t) \cdot i_k(t)^2, \quad D_e(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n r_k(t) \cdot i_k(t)^2.$$

де $L_k(t) = G(t) \cdot w_k^2$ – індуктивність k -го електромагніту; $G(t) = m_0 \cdot S / 2d(t)$ – магнітна провідність повітряного проміжку; $m_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнітна проникливість повітря; r_k – активний опір

однієї обмотки; d_0 – номінальне (постійне) значення повітряного проміжку; S – площа поверхні полюсів магніту; w_k – кількість витків котушки ЕМВ.

Функція Лагранжа тримасової вібраційної системи запишеться як:

$$L^*(t) = \frac{1}{2} \left[m_1 \dot{x}_1(t)^2 + m_2 \dot{x}_2(t)^2 + m_3 \dot{x}_3(t)^2 - c_1 (y_1(t) - y_2(t))^2 - \right. \\ \left. c_2 (y_2(t) - y_3(t))^2 - c_{is} y_2(t)^2 + n \cdot L_k(t) \cdot i_k(t)^2 \right].$$

Тягове зусилля ЕМВ, що формується в змінному повітряному проміжку згідно з [2], залежить від закону зміни цього проміжку під час роботи механічної системи $d(t)$ і сили струму $i(t)$ в обмотці котушки та визначається за формулою:

$$F(t) = \frac{\partial W(t)}{\partial d(t)} = \frac{n \cdot k}{4} \left[\frac{i(t)}{d(t)} \right]^2, \quad (2)$$

де $k = m_0 S w^2$ – прийняте позначення.

Отже, перше рівняння системи (1) – це рівняння електричного кола для ввімкнених паралельно n ЕМВ і воно має вигляд:

$$n \cdot \left[\frac{d}{dt} (L(t) \cdot i(t)) + R \cdot i(t) \right] = u(t), \quad (3)$$

де $L(t) = 1 / \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k(t)}$ – індуктивність ЕМВ; $R = 1 / \sum_{k=1}^n \frac{1}{r_k}$ – активний опір ЕМВ; $u(t) = U_0 \sin(\omega t / 2)$ –

закони зміни напруги за реактивної схеми живлення.

Запишемо закон зміни повітряного проміжку, врахувавши відносно переміщення коливальних мас в силовому збуренні $\Delta y(t) = y_2(t) - y_3(t)$: $d(t) = d_0 - \Delta y(t)$. В остаточному вигляді з (3) отримаємо нелінійне диференціальне рівняння першого порядку, яке набуде остаточного вигляду:

$$\frac{k}{2(d_0 - \Delta y(t))} \cdot \frac{d}{dt} i(t) + \left[r + \frac{k \cdot \frac{d}{dt} \Delta y(t)}{2(d_0 - \Delta y(t))^2} \right] \cdot i(t) = u(t), \quad (4)$$

Рівняння (4) не може бути розв'язане, оскільки його розв'язок визначається параметрами та умовами роботи механічної системи. До рівняння (4) потрібно долучити в систему диференціальні рівняння руху механічної складової системи (1), закон зміни силового збурення якої визначається виразом (2). Узагальнена математична модель електромеханічної тримасової вібраційної системи, отримана на основі функції Лагранжа $L^*(t)$ із системи рівнянь (1) набуде вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k}{2(d_0 - (y_2(t) - y_3(t)))} \cdot \dot{x}_1(t) + \left[r + \frac{k \cdot (y_2(t) - y_3(t))}{2(d_0 - (y_2(t) - y_3(t)))^2} \right] \cdot i(t) = u(t); \\ m_1 \ddot{x}_1(t) + c_1 \cdot (y_1(t) - y_2(t)) + b_1 \cdot (\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)) = 0; \\ m_2 \ddot{x}_2(t) - c_1 \cdot (y_1(t) - y_2(t)) - b_1 \cdot (\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)) + c_2 \cdot (y_2(t) - y_3(t)) + b_2 \cdot (\dot{x}_2(t) - \dot{x}_3(t)) + \\ + c_{is} \cdot y_2(t) + b_{is} \cdot \dot{x}_2(t) = \frac{n \cdot k}{4} \left[\frac{i(t)}{d_0 - (y_2(t) - y_3(t))} \right]^2; \\ m_3 \ddot{x}_3(t) - c_2 \cdot (y_2(t) - y_3(t)) - b_2 \cdot (\dot{x}_2(t) - \dot{x}_3(t)) = -\frac{n \cdot k}{4} \left[\frac{i(t)}{d_0 - (y_2(t) - y_3(t))} \right]^2. \end{array} \right. \quad (5)$$

Система нелінійних диференціальних рівнянь (5) описує динамічні характеристики механічної системи і часові залежності силових параметрів електромагнітного кола. На її основі можна отримати АЧХ коливальних мас, параметрів електромагнітного кола, часову зміну повітряного проміжку під час роботи механічної системи.

Розглянемо умови роботи вібраційної системи підвищеної ефективності з частотою коливань 50 Гц із реактивним електромагнітним приводом, яка визначена такими параметрами:

- механічної системи: $m_1 = 18,7 \text{ кг}$, $m_2 = 60 \text{ кг}$, $m_3 = 3,55 \text{ кг}$, $c_1 = 1,425 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$, $c_2 = 3,02 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$, $c_{is} = 2 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$, $w = 314 \text{ рад/с}$, $b_i = g \cdot c_i / w$, $g = 0,04$ – коефіцієнт внутрішнього непружного опору пружних ланок;
- електромагнітної системи: $d_0 = 0,004 \text{ м}$, $w = 1320$, $S = 2,784 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $r = 20 \text{ Ом}$, кількість ЕМВ $n = 1$.

Моделювання здійснюємо відомим числовим методом розв'язку систем диференціальних рівнянь (*Implicit Rosenbrock third-fourth order Runge-Kutta method*) в програмі Maple. Отримаємо часові характеристики руху коливальних мас і силових параметрів ЕМВ (рис. 2) в усталеному та перехідному режимах. З часових залежностей силових параметрів електромагніту під час пуску вібраційної системи видно, що частота тягового зусилля є вдвічі більшою за частоту напруги живлення і силу струму, а частота коливань вібраційної системи є у два рази більшою за частоту напруги живлення (що і є характерним для реактивних схем вмикання). Зсув фаз між напругою та силою струму становить близько $\pi/2$. Номінальне значення тягового зусилля ЕМВ становить в усталеному режимі близько 300 Н .

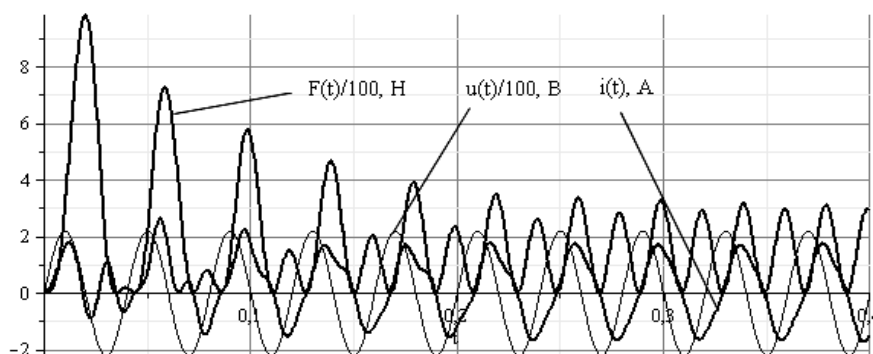


Рис. 2. Часові залежності силових параметрів електромагніту під час миттєвого пуску вібраційної системи

Розглянемо перехідний процес у змінному повітряному проміжку $d(t)$ відносно його номінального значення $d_0 = 0,004 \text{ м}$ та коливальний рух $y_2(t)$ і $y_3(t)$ мас m_2 і m_3 , що зазнають силового електромагнітного збурення (рис. 3, а). З огляду на те, що масові характеристики реактивної маси m_3 є значно меншими за масові параметри проміжної маси m_2 (для систем підвищеної ефективності [5]), то під час пуску виникають співударяння між якорем та осердям ЕМВ. Таке явище є негативним, оскільки виникає сумнів щодо можливого пуску та роботи вібраційної системи. З іншого боку, якщо припустити, що відбудеться пуск системи на усталений режим роботи, то з аналізу графіка (рис. 3, а) видно, що номінальне значення повітряного проміжку є надто великим. Це приводить до збільшення величини сили струму, а відповідно до збільшення споживаної потужності ЕМВ.

Для запобігання співударянь між якорем та осердям ЕМВ під час розбігу вібраційних систем на практиці використовують системи плавного пуску. Проаналізуємо розбіг вібраційної системи під час плавного пуску, користуючись такою умовою зміни напруги живлення за лінійним законом:

$$u(t) = \begin{cases} U_0 \cdot \sin(\omega t/2) \cdot t/t_n, & \text{if } t < t_n, \\ U_0 \cdot \sin(\omega t/2), & \text{if } t \geq t_n, \end{cases} \quad (6)$$

де t_n – тривалість пуску.

Найбільш раціонально тривалість t_n пуску вибрати більшою за час перехідного режиму вібраційної системи. У цьому випадку на основі комп'ютерного моделювання вибрано $t_n = 2\text{ с}$. Позитивною ознакою плавного пуску є також те, що можна зменшити значення номінального повітряного проміжку. Встановлено, що критичним (мінімально допустимим) значенням повітряного за умови плавного пуску (б) є $d_0 = 0,002\text{ м}$. Результати моделювання розбігу коливальних мас з силовим електромагнітним збуренням наведено на рис. 3, б.

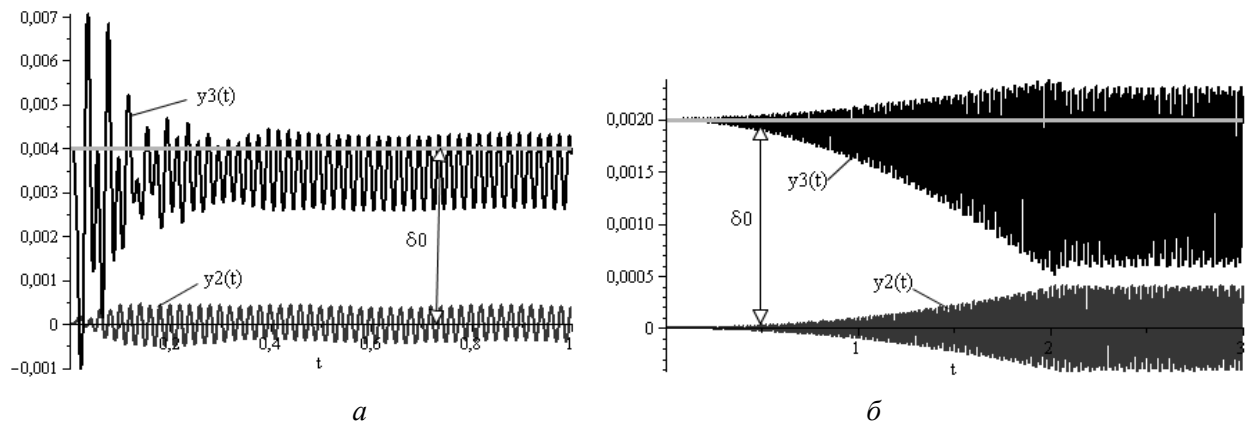


Рис. 3. Перехідний процес розбігу вібраційної системи за миттєвого (а) та плавного пусків (б)

Зменшення номінального повітряного проміжку істотно впливає на енергетичні показники електромагніту. Зокрема зменшенням у два рази номінального значення повітряного проміжку у два рази зменшується сила струму (рис. 4). Причому така їхня зміна не впливає на тягове зусилля ЕМВ (2), яке є дорівнює близько 300 Н за обох умов пуску за різних величин номінальних повітряних проміжків. Отже, зберігаються динамічні характеристики роботи механічної складової вібраційної системи (рис. 5), забезпечуються її раціональні енергетичні показники та уможливується пуск в усталений режим роботи.

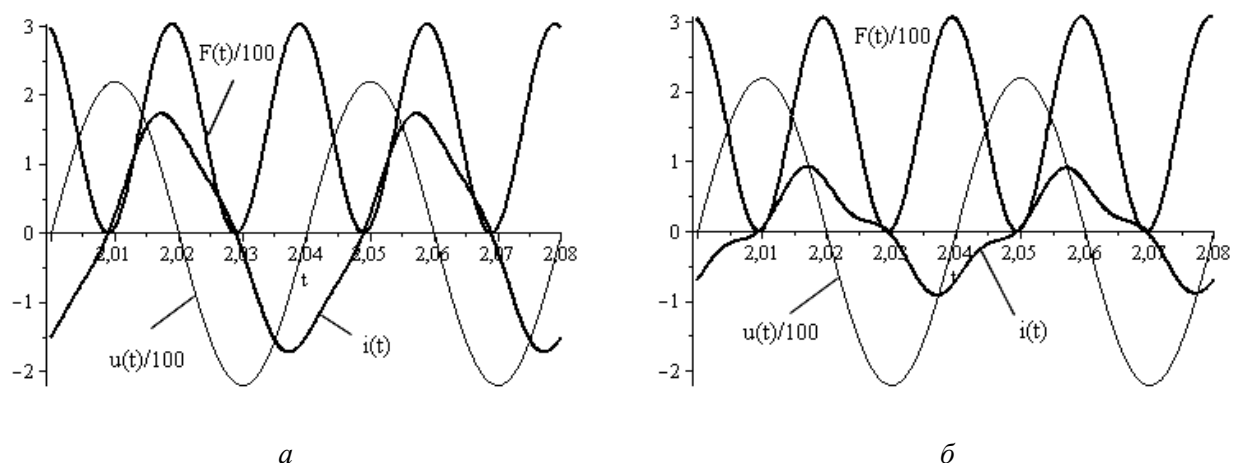


Рис. 4. Часові залежності силових параметрів електромагніту під час пуску вібраційної системи за миттєвого (а) та плавного пусків (б)

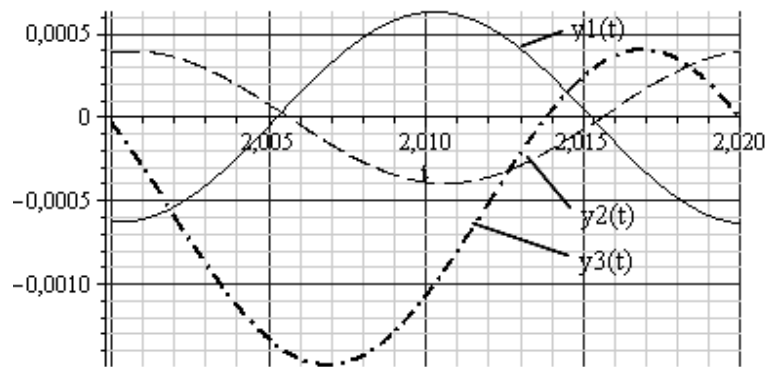


Рис. 5. Усталені коливання мас вібраційної системи

Висновки

Встановлено, що пуск тримасової вібраційної системи підвищеної ефективності з електромагнітним приводом за реактивною схемою вмикання можливий тільки за лінійного зростання напруги живлення. Окрім того, його використання дає змогу зменшувати величину номінального повітряного проміжку між якорем та осердям ЕМВ і тим самим зменшувати енергоспоживання вібраційної системи.

1. Цыфанский С.Л. *Нелинейные и параметрические колебания вибрационных машин технологического назначения* / С. Л. Цыфанский, В. И. Бересневич, А. Б.Окс. – Рига.: Зинатне, 1991. – 230 с. 2. Божко А.Е. *О сингулярной формуле тягового усилия двухтактного электромагнитного вибровозбудителя* // Доп. НАН України. – 2009. – № 9. – С. 92–96. 3. Мартыненко Ю.Г. *Аналитическая динамика электромеханических систем* / Под ред. И.В. Новожилова. – М.: МЭИ, 1984. – 64 с. 4. Карман Т., Био М. *Математические методы в инженерном деле*. – Москва, Ленинград, 1946. – 423 с. 5. Ланець О. С. *Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): Монографія*. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2008. – 324 с.