

## СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТА ЇХНІ ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ

УДК 621.3.07:681.511.4

А.П. ГУРОВ, О.О. ЧЕРНО, М.О. КУДРЯВЦЕВА

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

### МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ І СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ВІБРОСТЕНДОМ

© Гуров А.П., Черно О.О., Кудрявцева М.О., 2010

*Розроблено динамічну модель системи автоматичного керування електромагнітним вібростендом, яка враховує особливості електромагнітних та електромеханічних процесів у виконавчому пристрої, а також дискретизацію сигналу зворотного зв'язку за амплітудою.*

*Синтезовано ПІ-регулятор зі змінними параметрами, досліджено перехідні процеси.*

*Dynamic model of electromagnetic vibration test bench automatic control system has been derived. The model takes into account special features of electromagnetic and electromechanical processes in the test bench and discretisation of the amplitude feedback signal. PI-regulator with variable parameters has been synthesized. The dynamical processes in the system have been investigated.*

**Постановка проблеми.** Вібраційні стенди застосовуються у різних галузях промисловості для випробування виробів на вібраційну міцність та вібраційну стійкість, а також для науково-дослідних робіт, пов'язаних із вібрацією [1]. Найпоширеніші електродинамічні універсальні вібростенди, які характеризуються широким діапазоном частот ( $0 - 10^4$  Гц) та великими зусиллями (понад  $10^4$  Н). Вони також забезпечують випробування на вплив полігармонійної вібрації, випадкової вібрації, різних видів ударів та інших діянь [2]. Але існує багато виробів, які не потребують таких складних вібраційних випробувань. Наприклад, випробування сервоприводів проводиться на частотах від 0 до 70 Гц із прискоренням 1,2 g [3]. Випробування утеплювача "Пеноізол" проводяться методом фіксованих частот в діапазоні 15 – 100 Гц із амплітудою вібропереміщення 1,5 мм до частоти 20 Гц і амплітудою віброприскорення 1 g після 20 Гц [4]. У таких випадках немає необхідності у використанні універсальних електродинамічних вібростендів зі складною та дорогою системою керування. Набагато вигідніше використовувати більш прості та дешеві відцентрові та електромагнітні вібраційні стенди. Слід також зазначити, що електромагнітний вібраційний привод має значні переваги порівняно з відцентровим: простота регулювання амплітуди вібрації, менші енергозатрати (при роботі у білярезонансній зоні), відсутність проблеми переходу через резонанс [5].

До систем керування електромагнітними вібростендами висуваються такі вимоги: точність відтворення необхідних амплітуд вібрації в діапазоні робочих частот, обмежене перерегулювання за амплітудою при переході з однієї частоти на іншу. Величина максимального перерегулювання залежить від типу виробу, що випробовується. Якість проведення випробувань повністю залежить від динамічних властивостей системи керування вібростендом. Тому підвищення якості керування електромагнітними вібростендами є актуальною задачею.

Однією з основних проблем, що виникають при аналізі та синтезі систем автоматичного керування вібраційними установками з електромагнітним приводом, є складність побудови математичної моделі. Це насамперед пов'язано з істотною нелінійністю електромагнітного виконавчого пристрою [6], яка значно впливає на стійкість системи керування, особливо якщо остання побудована за принципом відхилення керованої величини [7]. Крім того, як буде показано нижче, на динаміку цифрової системи керування електромагнітним вібраційним приводом істотно впливає дискретизація сигналу зворотного зв'язку за амплітудою (незважаючи на високу тактову частоту сучасних мікропроцесорів), що також повинно бути враховано у математичній моделі.

**Аналіз останніх досліджень.** У роботі [8] досліджено динаміку замкненої неперервної системи автоматичного керування амплітудою електромагнітного вібраційного приводу і запропоновано методику визначення параметрів системи з пропорційним регулятором, що задовольняє умови стійкості та точності. При цьому використовувалась спрощена математична модель, яка не враховує магнітного опору сталі. У роботі [6] запропоновано динамічні моделі одноктного і двотактного електромагнітних віброзбуджувачів з урахуванням магнітного опору сталі, нелінійності кривої намагнічування і нерівномірності розподілу магнітного поля в зазорі. Але у цій роботі не розглянуті питання синтезу замкненої цифрової системи автоматичного керування амплітудою вібрації. В інших відомих роботах з цієї тематики це питання також не розглядається.

**Метою роботи** є створення математичної моделі та синтез регулятора цифрової системи автоматичного керування електромагнітним вібростендом із зворотним зв'язком за амплітудою.

**Основна частина.** Динамічну схему електромагнітного вібростенду наведено на рис. 1.

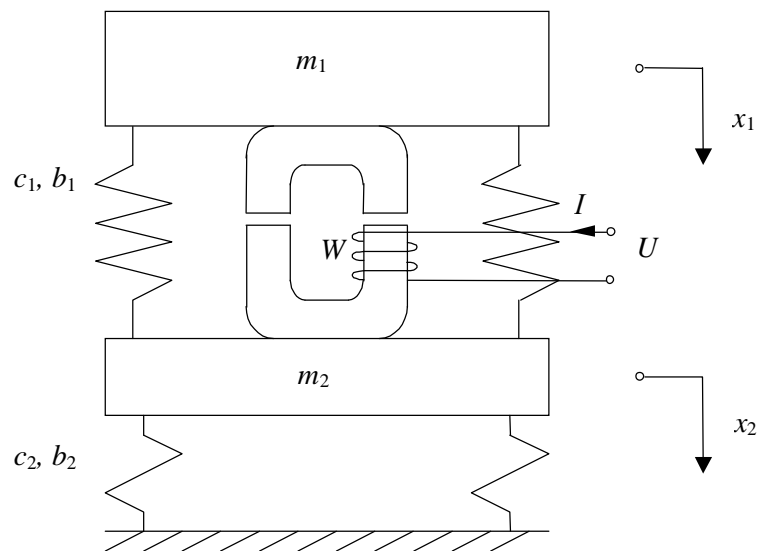


Рис. 1. Динамічна схема електромагнітного вібростенду:  
 $m_1$  – маса рухомої частини вібростенду з випробувальним виробом;  
 $m_2$  – маса проміжної платформи;  $I, U$  – струм і напруга;  
 $c_1, b_1$  – пружність та коефіцієнт в'язкого тертя підвісу робочого органу;  
 $c_2, b_2$  – пружність та коефіцієнт в'язкого тертя між  $m_2$  та фундаментом;  
 $W$  – число витків обмотки;  $x_1, x_2$  – координати переміщення робочого органу і проміжної платформи

Для схеми (рис. 1) складемо рівняння динаміки і перетворемо їх за Лапласом:

$$\begin{cases} x_1(p)(m_1 p^2 + b_1 p + c_1) - x_2(p)(b_1 p + c_1) = F(p); \\ -x_1(p)(b_1 p + c_1) + x_2(p)(m_2 p^2 + (b_1 + b_2)p + c_1 + c_2) = -F(p), \end{cases} \quad (1)$$

де  $F$  – сила, створювана вібробудувником;  $p$  – оператор Лапласа. Після нескладних перетворень отримаємо передавальні функції, що описують зв'язок між координатами  $x_1$  і  $x_2$  та силою  $F$ :

$$W_{x_1}(p) = \frac{x_1(p)}{F(p)} = \frac{1}{c_1} \frac{\frac{m_2}{c_2} p^2 + \frac{b_2}{c_2} p + 1}{\frac{m_1 m_2}{c_1 c_2} p^4 + \frac{b_1 m_2 + m_1 (b_1 + b_2)}{c_1 c_2} p^3 + (\frac{c_1 + c_2}{c_1 c_2} m_1 + \frac{b_1 b_2}{c_1 c_2} + \frac{m_2}{c_2}) p^2 + (\frac{b_1}{c_1} + \frac{b_2}{c_2}) p + 1}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} W_{x_2}(p) = \frac{x_2(p)}{F(p)} = & \frac{p^2}{c_1 \left( \frac{b_1}{c_1} p + 1 \right)} \times \\ & \times \frac{-\frac{m_1}{c_1} \left( \frac{b_1}{c_2} p + 1 \right)}{\frac{m_1 m_2}{c_1 c_2} p^4 + \frac{m_1 (b_2 + b_1) + m_2 b_1}{c_1 c_2} p^3 + \frac{m_1 (c_1 + c_2) + b_1 b_2 + m_2 c_1}{c_1 c_2} p^2 + \left( \frac{b_1}{c_1} + \frac{b_2}{c_2} \right) p + 1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Запишемо рівняння електромагнітних та електромеханічних процесів у виконавчому пристрої вібростенда. Створювана вібробудувачем електромагнітна сила пропорційна квадрата магнітної індукції в зазорі:

$$F(t) = \frac{B_{\delta}^2(t) S_c}{\mu_0}, \quad (4)$$

де  $B_{\delta}$  – магнітна індукція в зазорі;  $S_c$  – площа перерізу магнітопроводу;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна проникність повітря.

Магнітна індукція в сталі визначається залежно від напруженості поля за кривою намагнічування:

$$B(t) = f(H(t)), \quad (5)$$

де  $H(t)$  – напруженість магнітного поля.

Робоча ділянка кривої намагнічування електротехнічної сталі може бути апроксимована за допомогою поліноміальної функції, що має вигляд:

$$f(x) = A_1 x + A_2 x^3 + A_3 x^{15}, \quad (6)$$

де  $A_1, A_2, A_3$  – коефіцієнти, величини яких залежать від марки сталі.

Магніторухійна сила (МРС):

$$IW(t) = B_{\delta}(t) \frac{2\delta(t)}{\mu_0} + l_{cm} H(t), \quad (7)$$

де  $B_{\delta}(t)$  – магнітна індукція в зазорі;  $\delta(t)$  – повітряний зазор у часі;  $l_{cm}$  – сумарна довжина феромагнітних ділянок кола.

Повітряний зазор:

$$\delta(t) = \delta_0 + x_2(t) - x_1(t), \quad (8)$$

де  $\delta_0$  – повітряний зазор у стані рівноваги.

Струм в обмотці:

$$I(t) = \frac{IW(t)}{W} \tag{9}$$

Напруга:

$$U(t) = RI(t) + WS_c \frac{dB}{dt}, \tag{10}$$

де  $R$  – активний опір обмотки.

Магнітну провідність повітряного зазору визначимо за методом найвірогідніших шляхів замикання магнітного потоку [9]:

$$\Lambda_{\delta}(t) = \frac{\mu_0 S}{\delta(t)} + 2\mu_0 \left( 0,26 \cdot (a + b) + \frac{0,64(a + b)}{\delta(t)} + 2 \cdot (0,77\delta(t) + 0,25 \cdot 0,5b_0) \right), \tag{11}$$

$$\frac{\delta(t)}{0,5b_0} + 1$$

де  $a$  і  $b$  – ширина і товщина магнітопроводу;  $b_0$  – ширина обмоточного вікна.

На підставі рівнянь (1) – (11) формуємо динамічну структурну схему системи керування (рис. 2).

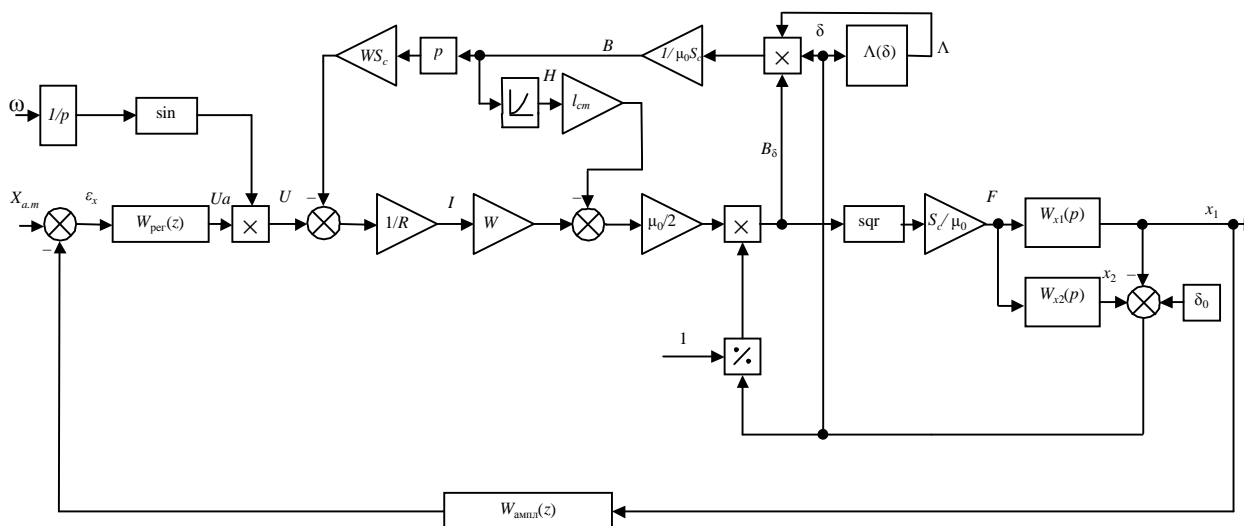


Рис. 2. Динамічна структурна схема системи керування

До дискретної частини системи входить блок визначення амплітуди коливань робочого органу з передавальною функцією  $W_{ампл}(z)$  і цифровий регулятор з передавальною функцією  $W_{пер}(z)$ .

Амплітуда коливань робочого органу визначається як половина різниці між максимальним і мінімальним значеннями координати переміщення  $x_1$ , які визначаються у моменти переходу через 0 похідної  $dx_1/dt$ . Отже, значення вихідної величини блоку визначення амплітуди оновлюється двічі за період коливань робочого органу вібростенда, тобто частота дискретизації дорівнює подвійній частоті коливань і є змінною.

Динамічну модель (рис. 2) було реалізовано у програмі "Simulink", за допомогою якої проведені дослідження динаміки системи керування. У результаті було встановлено, що для корекції системи найдоцільніше використовувати цифровий ПІ-регулятор зі змінними параметрами. Оскільки індуктивний опір обмоток збільшується пропорційно частоті, то доцільно так само збільшувати значення коефіцієнтів регулятора. Для параметрів вібростенда, наведених у таблиці, найбільш раціональні закони зміни коефіцієнтів регулятора:  $K_{п}(\omega) = D_1\omega$ ;  $K_{і}(\omega) = D_2\omega$ , де  $D_1 = 12$  с;  $D_2 = 3500$ .

## Параметри вібростенда

Діапазон частот, Гц	20–70
Частота переходу, Гц	50
Резонансна частота, Гц	37
Амплітуда переміщення до частоти переходу, мм	2
Амплітуда прискорення після частоти переходу, g	5
Максимальна амплітуда напруги, В	510
Максимальна амплітуда струму, А	42
Переріз магнітопроводу $a \times b$ , м	0,1×0,045
Повітряний зазор у стані рівноваги $\delta_0$ , м	$12 \cdot 10^{-3}$
Розміри обмоточного вікна $a_0 \times b_0$ , м	0,08×0,1
Сумарна довжина феромагнітних ділянок кола $l_{ст}$ , м	0,495
Число витків обмотки $W$	390
Активний опір обмотки $R$ , Ом	0,363
Маса рухомої частини вібростенду з випробувальним виробом $m_1$ , кг	20
Маса проміжної платформи $m_2$ , кг	20
Пружність між $m_1$ та $m_2$ $c_1$ , Н/м	$5,2 \cdot 10^5$
Пружність між $m_2$ та фундаментом $c_2$ , Н/м	$0,8 \cdot 10^5$
Коефіцієнт в'язкого тертя між $m_1$ та $m_2$ $b_1$ , Н·с/м	9,936
Коефіцієнт в'язкого тертя між $m_2$ та фундаментом $b_2$ , Н·с/м	505,964

Дослідимо перехідні процеси при вмиканні системи на частотах 20 Гц (рис. 3), 37 Гц (рис. 4), 50 Гц (рис. 5) і 70 Гц (рис. 6).

Промодельовавши перехідні процеси на граничних частотах, резонансній частоті і частоті переходу, можемо зробити висновок, що біля резонансної частоти перехідний процес вмикання вібростенда відбувається з неприпустимо великим перерегулюванням (41 %). Щоб уникнути цього явища, при вмиканні системи задану амплітуду необхідно збільшувати з обмеженою швидкістю.

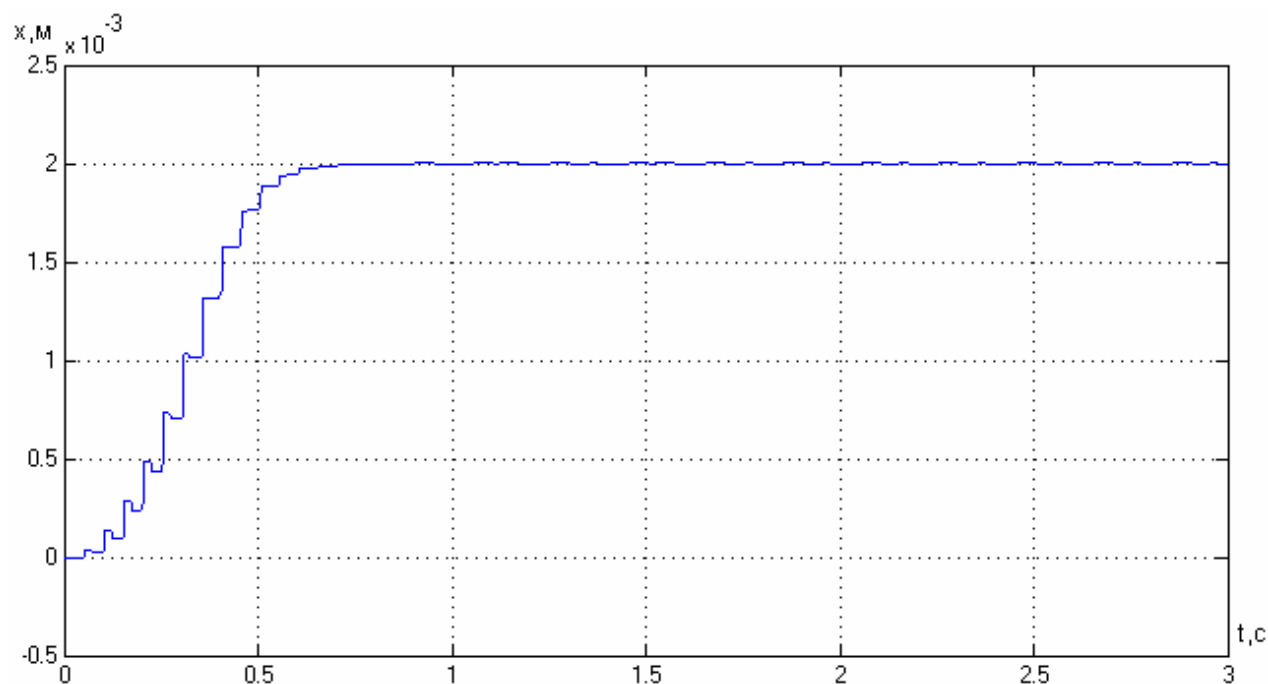


Рис. 3. Перехідний процес вмикання вібростенда на частоті 20 Гц

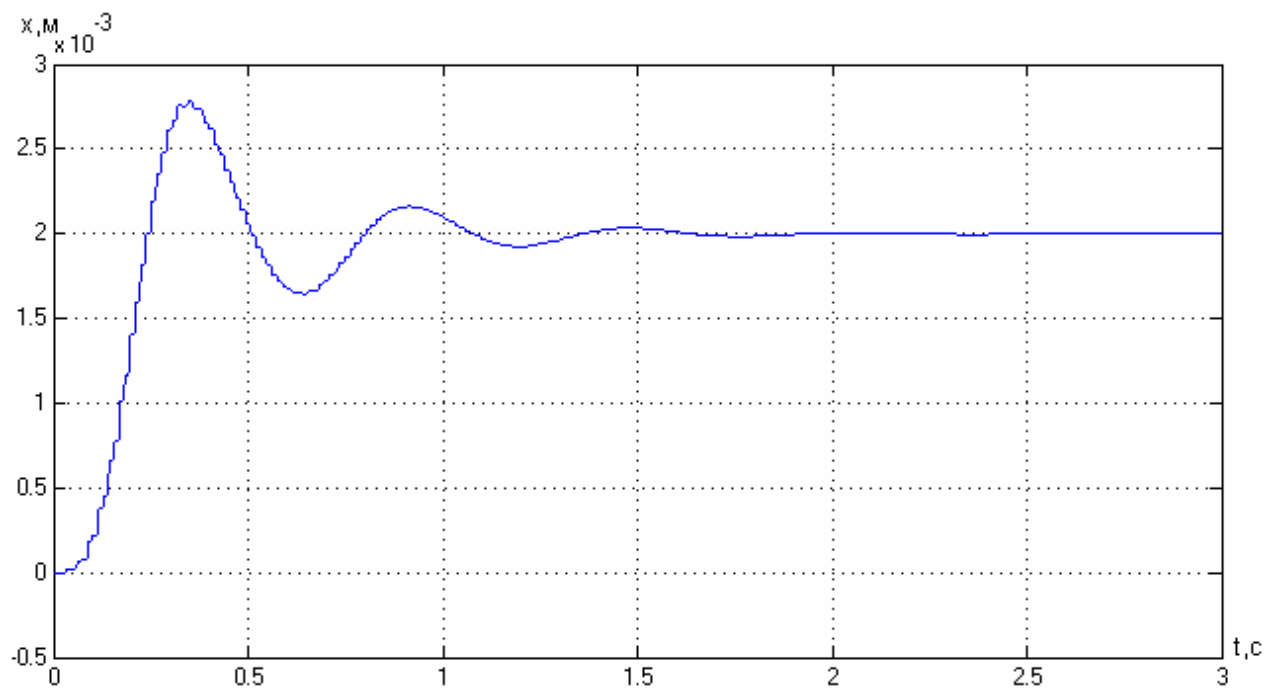


Рис. 4. Перехідний процес вмикання вібростенда на частоті 37 Гц

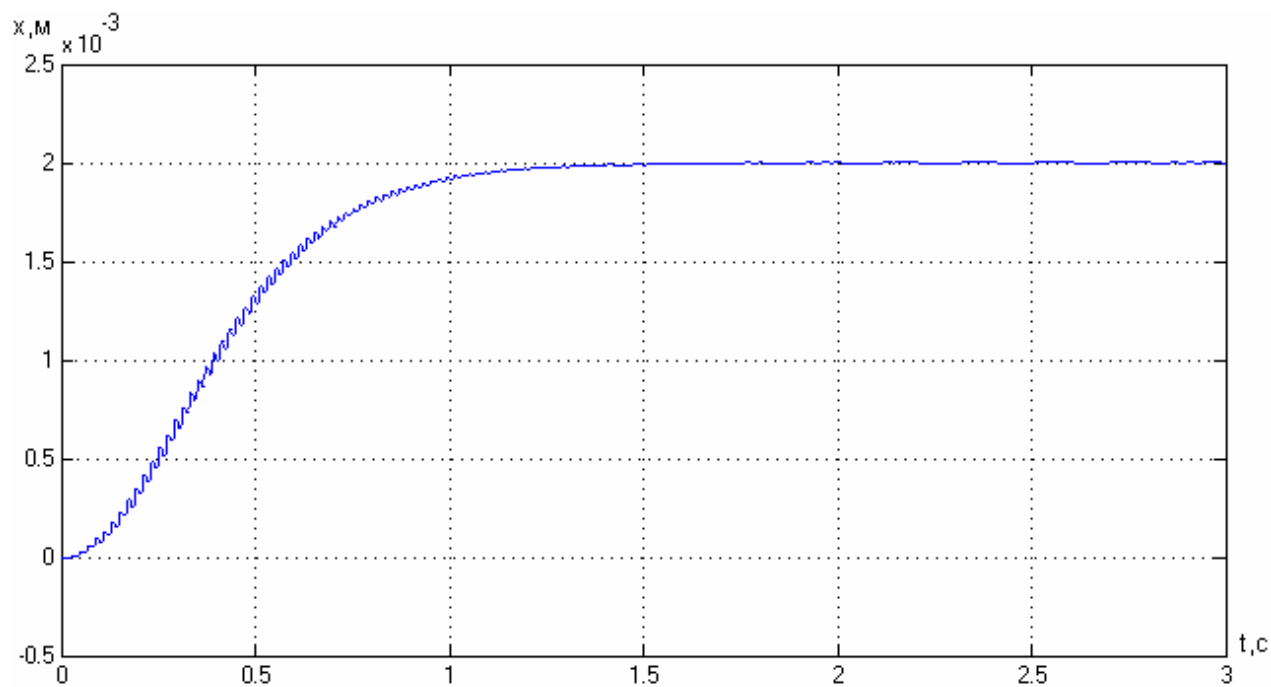


Рис. 5. Перехідний процес вмикання вібростенда на частоті 50 Гц

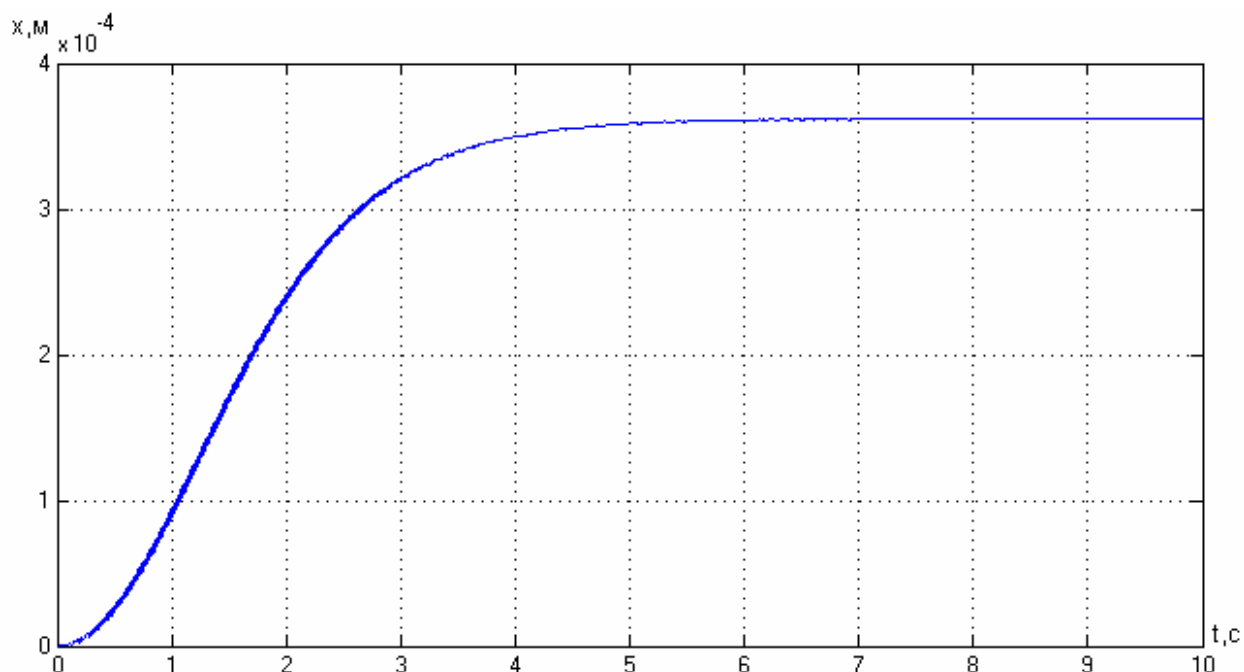


Рис. 6. Перехідний процес вмикання вібростенда на частоті 70 Гц

Промодельюємо перехідний процес в системі на резонансній частоті при плавній зміні приписаного значення амплітуди  $X_{a.m.}$  від 0 до 0,002 м з постійною швидкістю 0,002 м/с. За графіком перехідного процесу (рис. 7) видно, що перерегулювання зменшилося до 5 % при тому самому значенні часу перехідного процесу.

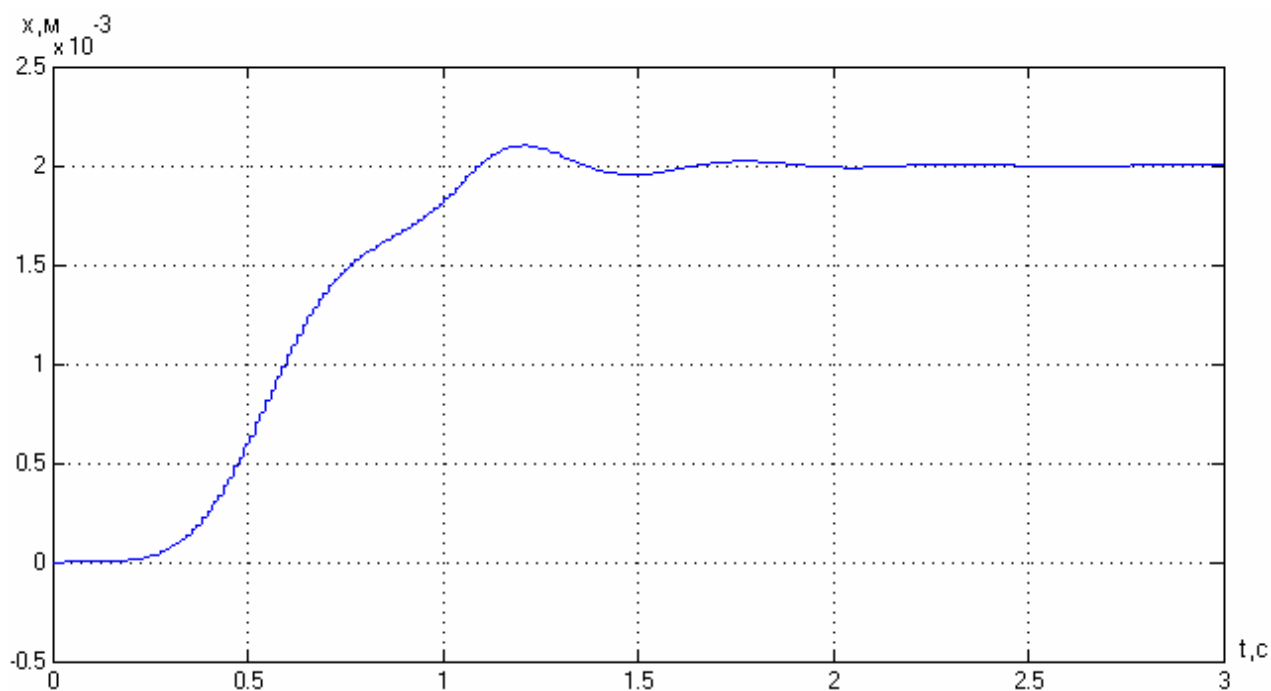


Рис. 7. Перехідний процес вмикання вібростенда на частоті 37 Гц при плавній зміні приписаного значення амплітуди  $X_{a.m.}$

Дослідимо перехід системи з однієї частоти на іншу. Для прикладу візьмемо переходи: з частоти 20 Гц на частоту 25 Гц, з 32 Гц на резонансну частоту 37 Гц, з 50 Гц на 55 Гц і з 65 Гц на 70 Гц. Графіки перехідних процесів при сходянковій зміні приписаного значення частоти у момент часу 4 с наведено на рис. 8 – 11.

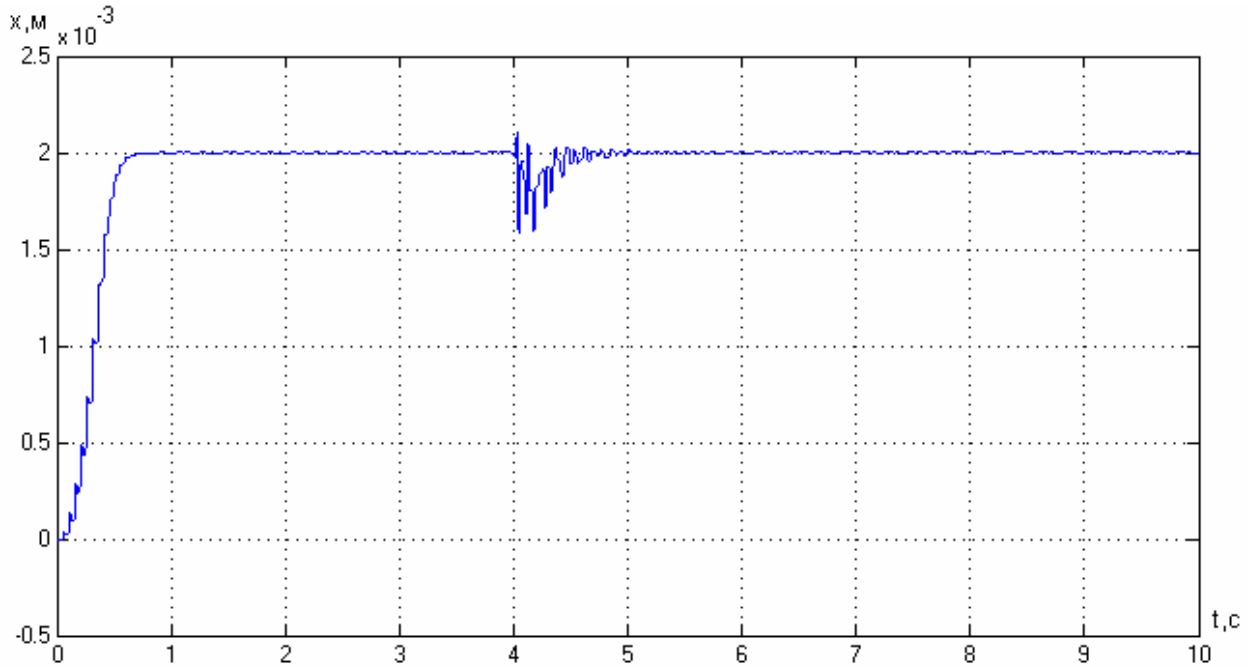


Рис. 8. Перехідний процес роботи системи при сходянковій зміні приписаного значення частоти з 20 Гц на 25 Гц

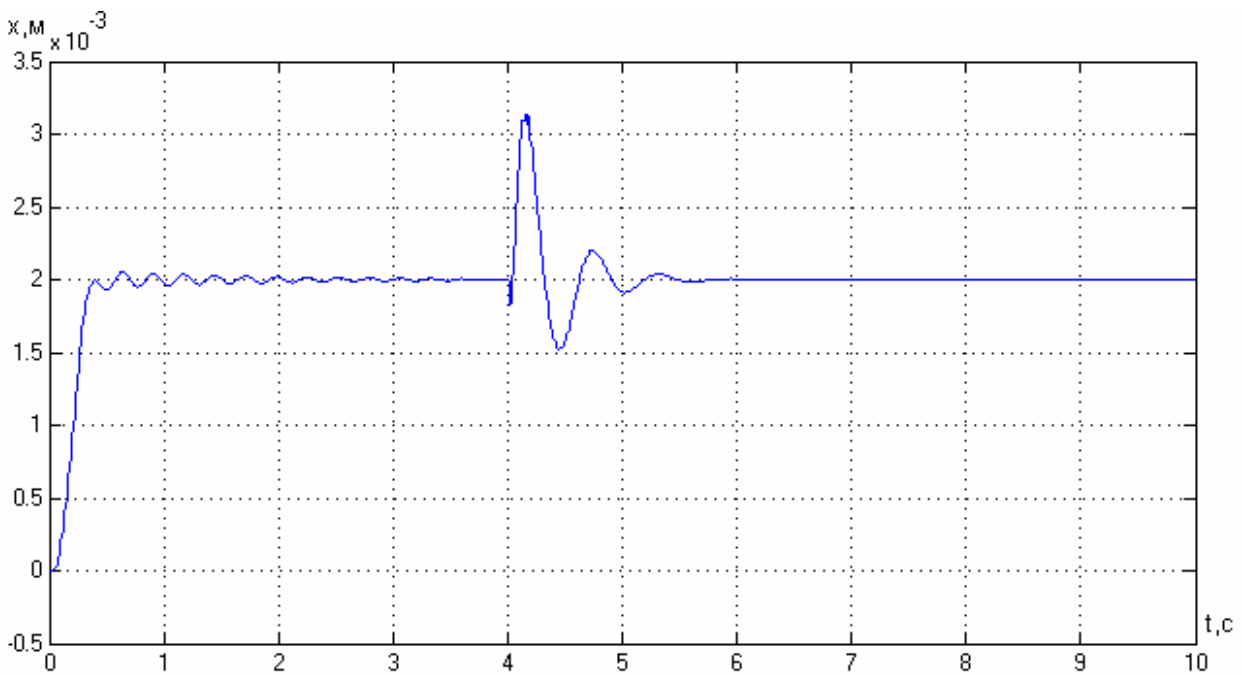


Рис. 9. Перехідний процес роботи системи при сходянковій зміні приписаного значення частоти з 32 Гц на 37 Гц



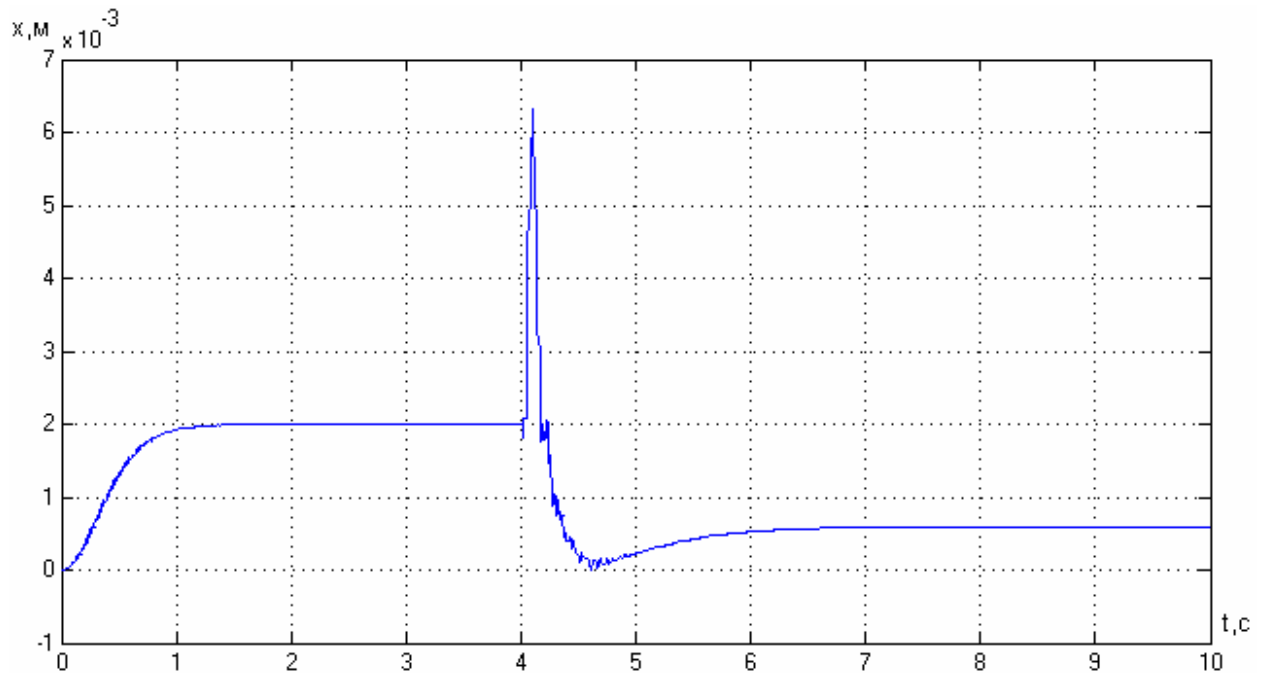


Рис. 10. Перехідний процес роботи системи при сходиноквій зміні приписаного значення частоти з 50 Гц на 55 Гц

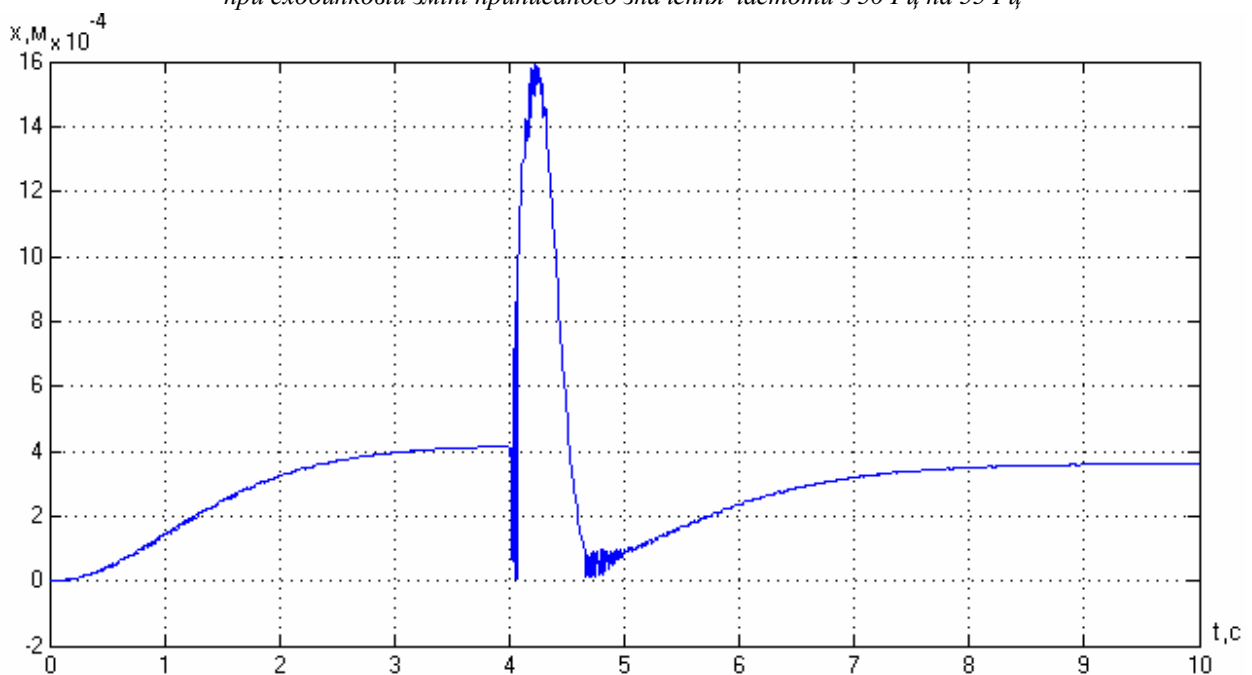


Рис. 11. Перехідний процес роботи системи при сходиноквій зміні приписаного значення частоти з 65 Гц на 70 Гц

За результатами моделювання бачимо, що при переходах з 32 Гц на 37 Гц, з 50 Гц на 55 Гц та з 65 Гц на 70 Гц спостерігаються великі сплески амплітуди. Зменшимо їх за допомогою обмеження швидкості зміни частоти. На рис. 12 – 14 наведено графіки перехідних процесів при плавному переході з однієї частоти на іншу з постійною швидкістю 5 Гц/с. Аналіз графіків показує, що сплески амплітуди зменшились до припустимих значень, час перехідних процесів при цьому не збільшився.

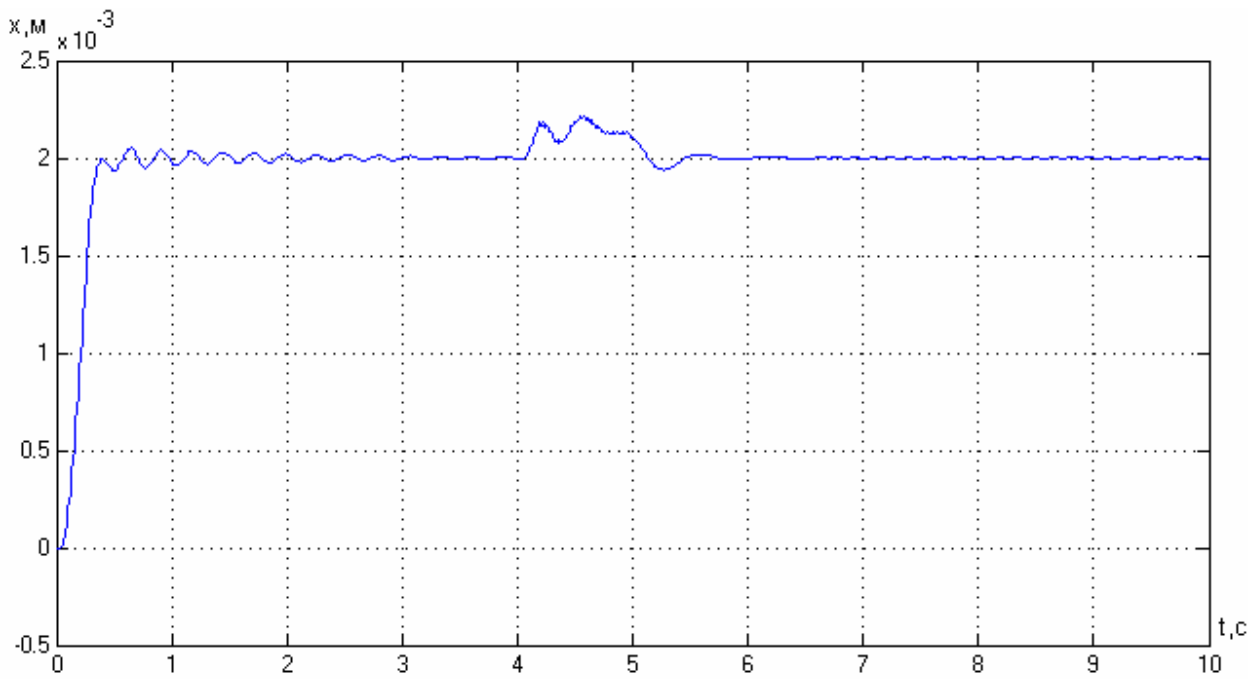


Рис. 12. Перехідний процес роботи системи при плавній зміні приписаного значення частоти з 32 Гц на 37 Гц з постійною швидкістю 5 Гц/с

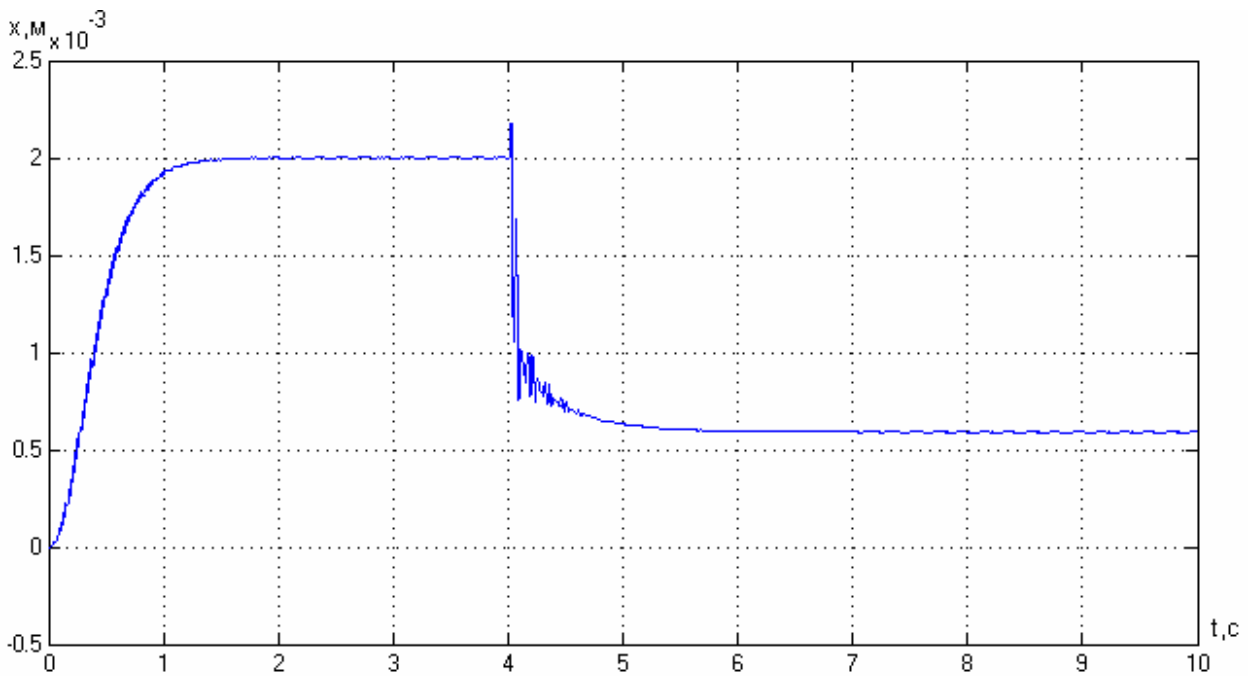


Рис. 13. Перехідний процес роботи системи при плавній зміні приписаного значення частоти з 50 Гц на 55 Гц з постійною швидкістю 5 Гц/с

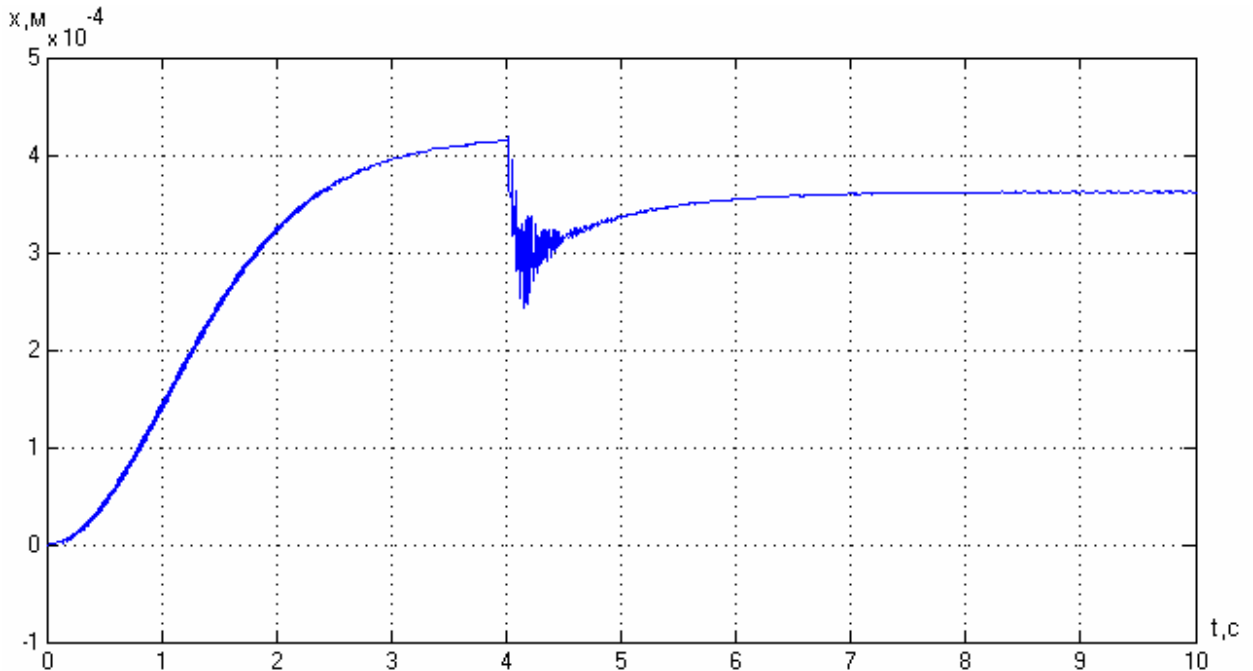


Рис. 14. Перехідний процес роботи системи при плавній зміні приписаного значення частоти з 65 Гц на 70 Гц з постійною швидкістю 5 Гц/с

**Висновки і перспективи подальшого розвитку.** Розроблена динамічна модель системи автоматичного керування електромагнітним вібростендом враховує особливості електромагнітних та електромеханічних процесів у виконавчому пристрої, а також дискретизацію сигналу зворотного зв'язку за амплітудою. Цю модель можна застосувати для аналізу та синтезу замкнених систем керування електромагнітними вібраційними приводами.

Для корекції системи керування доцільно використовувати пропорційно-інтегральний регулятор зі змінними коефіцієнтами.

Сходінкова зміна приписаних значень частоти і амплітуди при вмиканні вібростенда та при переході з однієї частоти на іншу призводить до неприпустимо великих сплесків амплітуди коливань. Плавна зміна приписаного значення амплітуди при вмиканні і приписаного значення частоти при переході з однієї частоти на іншу дає змогу зменшити сплески амплітуди до припустимих значень без втрати швидкодії системи.

1. *Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4. Вибрационные процессы и машины. Под ред. Э.Э. Лавендела. 1981. – 509 с.* 2. *Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование: Учеб. пособие для вузов/ О.П. Глудкин, А. Н. Енгальчев, А.И. Коробов, Ю.В. Трегубов; Под ред. А. И. Коробова. – М.: Радио и связь, 1987. – 272 с.* 3. *Интегрированный сервопривод СПШ10 // [www.servotechnica.ru/info/spsh10](http://www.servotechnica.ru/info/spsh10).* 4. *Испытания на прочность утеплителя "Пеноизол" // <http://izol.at.ua/news/2009-03-18-9>.* 5. *Ланець О.С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): Монографія. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2008. – 324 с.* 6. *Божко А. Е. Пермяков В. И. Пушня В. А. Методы проектирования электромеханических вибровозбудителей. – К.: Наукова думка, 1989.* 7. *Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. Изд. 4-е перераб и доп. – СПб.: Изд-во "Профессия", 2003. – 272 с.* 8. *Гасымов Рафаил Аслан Оглы. Управляемый электромагнитный*

вибровозбудитель низкочастотных механических колебаний для систем управления много-режимными установками: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.05 / Азербайджанский индустриальный университет им. М. Азизбекова. – Баку, 1992. – 16 с. 9. Гордон А. В., Сливинская А. С. Электромагниты постоянного тока. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.

УДК 621.142;621.376.571

І.Д. ЗЕЛІНСЬКИЙ

Національний університет “Львівська політехніка”

## СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ВІБРОЗБУДНИКАМИ З РЕГУЛЮВАННЯМ АМПЛІТУДИ ТА ЧАСТОТИ КОЛИВАНЬ НА ОСНОВІ ШІМ

Ї Зелінський І.Д., 2010

*Розглянуто особливості реалізації системи керування електромагнітними віброзбудниками на основі широтно-імпульсної модуляції.*

*In the article the features of realization of control the system by electromagnetic vibroexciters are considered on the basis of latitudinal impulsive modulation.*

**Вступ.** При виготовленні, налагодженні та експлуатації вібраційних пристроїв з електромагнітними віброзбудниками актуальним завданням є регулювання як амплітуди, так і частоти коливань. Це завдання можна вирішити, створивши систему керування, що формує сигнали керування віброзбудниками з заданими параметрами. Використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) дає змогу формувати сигнали з необхідними параметрами та забезпечувати плавний старт та зупинку вібраційних пристроїв. Тому розроблення системи керування електромагнітними віброзбудниками на основі ШІМ є актуальною задачею.

**Метою** даної статті є аналіз особливостей керування електромагнітним віброзбудником та реалізація системи керування, що забезпечує плавне регулювання як амплітуди так і частоти коливань.

**Аналіз схем вмикання електромагнітних віброзбудників.** Відповідно до класифікації [1], електромагнітні віброзбудники, що живляться безпосередньо від мережі, поділяються на однокітні та двокітні . На рис. 1 наведено схеми вмикання та робочу частоту таких віброзбудників. Частоту вказано, враховуючи частоту мережі 50 Гц. На рис. 1 L1 та L2 – котушки електромагнітних віброзбудників.

Однокітний віброзбудник (рис. 1, а), ввімкнений безпосередньо в мережу, забезпечує робочу частоту, вдвічі більшу за частоту мережі. однокітний віброзбудник (рис. 1, б), ввімкнений через діод в мережу, дає змогу отримати частоту коливань, що відповідає частоті мережі. Використання однополярної напруги на котушці призводить до ефекту підмагнічування. Схема рис 1.в поєднує два однокітні електромагнітні віброзбудники аналогічній схемі рис.1, б, що працюють в протифазі. Розглянуті вище схеми забезпечують фіксовану частоту та амплітуду коливань, як залежать від параметрів мережі живлення. Використовуючи тиристорне регулювання [2], можна плавно змінювати амплітуду коливань та дискретно – частоту .