

УДК 621.317

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ РЕЗОНАНСНИХ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИВОДІВ-ВИПРОМІНЮВАЧІВ В СИСТЕМАХ МЕХАТРОНІКИ**Новосад А.А., аспірант***Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна***Вступ**

Одним з перспективних методів інтенсифікації технологічних процесів є введення в рідину ультразвукових механічних коливань та збудження в рідкому середовищі акустичної кавітації. Це, разом з іншими супутніми нелінійними явищами, дає змогу пришвидшити або надати нових якостей процесам розділення неоднорідних сумішей (флотажія, фільтрування, екстрагування), процесам утворення неоднорідних систем (диспергування, отримання емульсій), процесам знезараження, дії на біологічні об'єкти, активації рідинних середовищ. [1]

Для збудження ультразвукових коливань і акустичної кавітації використовуються магнітострикційні та п'єзоелектричні приводи-випромінювачі. Останні, порівняно з магнітострикційними, мають ряд суттєвих переваг. Зокрема, ширший діапазон амплітуд коливань, вищий коефіцієнт корисної дії електромеханічного перетворення, нижча вартість, технологічність, відсутність великих струмів живлення, через що спрощується конструкція електричного генератора. [2] Зазначені переваги і обумовлюють дедалі більше поширення п'єзоелектричних приводів-випромінювачів, які ще називають п'єзоприводами-випромінювачами. Живлення п'єзопривода-

випромінювача здійснюється від потужного електричного генератора змінної напруги. Оскільки п'єзоприводи-випромінювачі є резонансними системами, то для підтримання заданого рівня споживаної потужності і постійного значення резонансної частоти в електричних генераторах вводяться зворотні зв'язки за підведеннями до привода струмом і



Рис. 1. Структурна схема мехатронної ультразвукової технологічної установки

напругою (рис. 1). На даному етапі розвитку структурна схема ультразву-

кового кавітаційного технологічного обладнання складається лише з описаних вище частин, що разом складають мехатронну систему. Але з огляду на широкий спектр застосування ультразвукових кавітаційних технологій виникає необхідність контролю та регулювання щільності введеної в рідину енергії, параметрів акустичних коливань в рідині, інтенсивності кавітації і т.д. Ці та інші параметри можуть бути різними для різних технологічних процесів або змінюватись на різних етапах окремого технологічного процесу. Для здійснення керування параметрами акустичного поля та кавітацією в робочому середовищі необхідним є введення додаткової групи зворотних зв'язків, що є можливим шляхом аналізу сигналу давачів акустичного тиску в рідині (рис. 1).

Постановка задачі

По суті наведена на рис. 1 мехатронна система є багатоконтурною системою з автоматичним регулюванням. Для розробки систем автоматичного керування та регулювання необхідним є знання передаточних функцій усіх ланок системи, що дає змогу визначати параметри якості та стійкості автоматичних систем. Саме такою ланкою є п'єзоелектричний привід-випромінювач.

В літературі недостатньо чітко розглянуто п'єзопривід-випромінювач, як ланку автоматичних систем, відсутні вирази коефіцієнтів передачі, які б пов'язували вхідні електричні сигнали та вихідні реакції п'єзопривода. Вхідними його сигналами є напруга та струм живлення, а вихідними реакціями – акустичний тиск в рідинному середовищі і швидкість руху робочої поверхні.

Також метою даної статті є з'ясування питання про можливість побудови систем автоматичного керування не лише за принципом зворотного зв'язку, коли у якості сигналів керування застосовується інформація з давачів про швидкість руху робочої поверхні чи акустичний тиск у робочому середовищі, а і за принципом компенсації, коли у якості сигналів керування використовуються вхідні електричні сигнали. Тобто, з'ясувати можливість контролю та керування акустичним полем в рідині за допомогою вхідних струму і напруги.

Основна частина

На основі розгляду п'єзоелектричного привода-випромінювача як чотириполюсника, використовуючи метод електромеханічних аналогій, отримано еквівалентну електричну схему заміщення п'єзопривода. [2, 3] Дана схема може бути застосована у вузькому діапазоні частот поблизу робочої резонансної частоти п'єзопривода. Також параметри схеми вважаються незалежними від вхідних струмів і напруг. В схемі (рис. 2) C_0 – статична ємність п'єзоелемента; R_e – опір електричних втрат, обумовлений діелектричними втратами і струмами стікання; C_m – ємність, що еквіва-

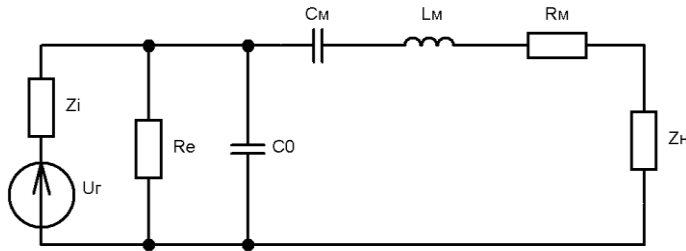


Рис. 2. Схема заміщення п'єзопривода-випромінювача

лентна механічній податливості п'єзопривода ; L_M – індуктивність, еквівалентна механічній масі п'єзопривода ; R_M – опір механічних втрат, обумовлений внутрішнім тертям, пов'язаний зокрема рухом областей спонтанної електризації [3].

Перераховані вище параметри стосуються безпосередньо п'єзопривода, а не генератора чи навантаження. Стосовно інших параметрів Z_i та Z_n , то Z_i – внутрішній опір генератора від якого відбувається живлення п'єзопривода, а Z_n – опір середовища, яким навантажено п'єзопривід. В загальному випадку ці величини комплексні. Але внутрішній опір генераторів, які використовуються для живлення п'єзоприводів-випромінювачів, переважно, має індуктивний характер, і його величина є завжди відомою. Опір середовища, за умови, що діаметр випромінюючої поверхні резонансного п'єзопривода набагато більший за довжину хвилі, має активний характер [4]: $Z_n = \rho v \pi r^2$, де ρ – густина середовища, v – швидкість звуку в середовищі, r – радіус випромінюючої поверхні п'єзопривода [4]. Якщо ж діаметр випромінюючої поверхні резонансного п'єзопривода за розміром близький до довжини хвилі, то опір середовища є комплексним: $Z_n = \rho v \pi r^2 \left[1 - \frac{2J_1(2kr)}{2kr} + j \frac{2S_1(2kr)}{2kr} \right]$, де $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – стала поширення хвилі, λ – довжина акустичної хвилі в середовищі, $J_1(2kr)$ - функція Беселя першого порядку, $S_1(2kr)$ – функція Струве першого порядку.

Таким чином, опір середовища, яким навантажено п'єзопривід-випромінювач може бути розрахований. Комплексний характер опору пояснюється тим, що частина рідини накопичує енергію, рухаючись разом з робочою поверхнею п'єзопривода у безпосередній близькості до неї. Ця частина рідини еквівалентна приєднаній масі.

У відповідності до електричної схеми заміщення (рис.2) явище резонансу буде спостерігатися на двох частотах: послідовного та паралельного резонансу або антирезонансу, які дорівнюють:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_M C_M}}, \quad f_A = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_M \frac{C_O C_M}{C_O + C_M}}} \cdot [5]$$

де f_R - частота послідовного резонансу, f_A - частота паралельного резонансу (антирезонансу).

Формули резонансних частот записані за умови, що опір середовища та

збуджуючого генератора носять активний характер. Комплексний опір сердовища та збуджуючого генератора вносять додаткову реактивність у схему п'єзопривода і цим самим змінюють значення резонансних частот п'єзопривода. При роботі на частоті послідовного резонансу вхідна електрична провідність п'єзопривода максимальна, вхідний струм досягає максимального значення при незмінному значенні вхідної напруги. Якщо ж робоча частота вхідної напруги відповідає паралельному резонансу, то вхідна електрична провідність п'єзопривода, а, отже, і вхідний струм мінімальні, спостерігається різке збільшення напруги на електричних контактах п'єзопривода. [5]

Параметри електричної схеми п'єзопривода можуть бути визначені у відповідності з методикою, викладеною в роботі. [6]

Статична ємність та опір електричних втрат вимірюються між електричними контактами п'єзопривода.

Ємність, що еквівалентна механічній податливості п'єзопривода та індуктивність, еквівалентна механічній масі п'єзопривода, визначаються залежностями:

$$C_M = C_O \left(\frac{f_A^2}{f_R^2} - 1 \right), \quad L_M = \frac{1}{(2\pi f_R)^2 C_O \left(\frac{f_A^2}{f_R^2} - 1 \right)}$$

Опір механічних втрат

$$R_M = \frac{P_{0,707}}{f_R} \sqrt{\frac{L_M}{C_M}},$$

де $P_{0,707}$ - ширина смуги частот, виміряна по рівню 0,707 в околі послідовного резонансу [6].

Для отримання коефіцієнта передачі, що є коефіцієнтом пропорційності між прикладеною до п'єзопривода напругою та тиском на робочій поверхні, еквівалентом якого є напруга на Z_n , для схеми (рис. 2) у матричній формі записується система рівнянь за методом контурних струмів [5]

$$Z \cdot I = U. \tag{1}$$

Матриці опорів, струмів та напруг:

$$Z = \begin{vmatrix} \dot{Z}_i + R_e & -R_e & 0 \\ -R_e & R_e + \frac{1}{pC_0} & -\frac{1}{pC_0} \\ 0 & -\frac{1}{pC_0} & \frac{1}{pC_0} + \frac{1}{pC_m} + pL_m + R_m + \dot{Z}_n \end{vmatrix}, \quad I = \begin{vmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{vmatrix}, \quad U = \begin{vmatrix} \dot{U}_2 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix},$$

де U_2 - напруга генератора, від якого живиться п'єзопривід .

Отже при підстановці матриць опорів, струмів і напруг в (1) система рівнянь набуває вигляду

$$\begin{vmatrix} \dot{Z}_i + R_e & -R_e & 0 \\ -R_e & R_e + \frac{1}{pC_0} & -\frac{1}{pC_0} \\ 0 & -\frac{1}{pC_0} & \frac{1}{pC_0} + \frac{1}{pC_m} + pL_m + R_m + \dot{Z}_n \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{U}_2 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Система рівнянь розв'язується відносно контурних струмів \dot{I}_1 та \dot{I}_3 , причому \dot{I}_1 є струмом живлення п'єзопривода (вхідним струмом), а \dot{I}_3 (струм через навантаження) є еквівалентом швидкості руху робочої поверхні:

$$Z^{-1} U = I; \quad \frac{1}{\Delta_Z} \cdot \begin{vmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{21} & \Delta_{31} \\ \Delta_{12} & \Delta_{22} & \Delta_{32} \\ \Delta_{13} & \Delta_{23} & \Delta_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{U}_2 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{vmatrix},$$

де Δ_Z – визначник матриці опорів Z , $\Delta_{n,m}$ – алгебраїчні доповнення до відповідних елементів матриці Z .

Отже, коефіцієнт передачі, який пов'язує швидкість руху робочої поверхні з вхідним струмом живлення, має вигляд

$$\dot{K}_I(p) = \frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_1} = \frac{\Delta_{13} \dot{U}_2}{\Delta_Z} \cdot \frac{\Delta_{11} \dot{U}_2}{\Delta_Z} = \frac{\Delta_{13}}{\Delta_{11}}$$

Після підстановки параметрів п'єзопривода, зведення до спільного знаменника та спрощення даний вираз набуває вигляду

$$\dot{K}_I(p) = \frac{p}{p^3 L_m C_0 + p^2 \left(C_0 R_m + C_0 \dot{Z}_n + \frac{L_m}{R_e} \right) + p \left(1 + \frac{R_m}{R_e} + \frac{\dot{Z}_n}{R_e} + R_m + \frac{C_0}{C_m} \right) + \frac{1}{C_m R_e}}$$

Коефіцієнт передачі, що пов'язує напругу на вході п'єзопривода \dot{U}_2 та напругу на навантаженні, еквівалентну тиску на виході п'єзопривода, можна записати як

$$\dot{K}_U(p) = \frac{\dot{U}_n}{\dot{U}_2} = \frac{\dot{I}_3 \cdot \dot{Z}_n}{\dot{U}_2} = \frac{\Delta_{13} \cdot \dot{U}_2 \cdot \dot{Z}_n}{\Delta_Z \cdot \dot{U}_2} = \frac{\Delta_{13} \cdot \dot{Z}_n}{\Delta_Z}$$

Після підстановки параметрів п'єзопривода, зведення до спільного знаменника та спрощення даний вираз набуває вигляду

$$\dot{K}_U(p) = \frac{p \dot{Z}_n}{p^3 L_m C_0 \dot{Z}_i + p^2 \left(C_0 R_m \dot{Z}_i + C_0 \dot{Z}_i \dot{Z}_n + \frac{L_m \dot{Z}_i}{R_e} + L_m \right) + p \left(\dot{Z}_i + \frac{R_m \dot{Z}_i}{R_e} + \dot{Z}_n + R_m + \frac{\dot{Z}_n \dot{Z}_i}{R_e} + \frac{C_0 \dot{Z}_i}{C_m} \right) + \frac{R_e + \dot{Z}_i}{C_m R_e}}$$

Таким чином тиск на виході п'єзопривода у робочому середовищі та швидкість руху робочої поверхні можна представити як

$$\begin{cases} \dot{P} = \dot{K}_U(p) \cdot \dot{U}_z \\ \dot{v} = \dot{K}_I(p) \cdot \dot{I}_1 \end{cases} \quad (2)$$

Виходячи з системи (2) коефіцієнти передачі мають розмірності:

$$\dot{K}_U(p) = \left[\frac{\text{Па}}{\text{В}} \right], \quad \dot{K}_I(p) = \left[\frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \text{А}} \right]$$

Найчастіше в інженерній практиці виникає необхідність пов'язати напругу на вході резонансного п'єзопривода \dot{U}_z із вихідними характеристиками п'єзопривода, оскільки для потужних застосувань використовуються генератори напруги, які працюють на частоті послідовного резонансу. Це дає змогу уникнути екстремально-високих напруг на вході п'єзопривода при роботі на частоті паралельного резонансу.

Скориставшись електромеханічними аналогіями та законом Ома з системи (2) отримаємо

$$\begin{cases} \dot{P} = \dot{K}_U(p) \dot{U}_z \\ \dot{v} = \frac{\dot{K}_U(p) \dot{U}_z}{\dot{Z}_n} \end{cases}$$

Для типового резонансного п'єзопривода-випромінювача з параметрами, наведеними в табл. 1, на рис. 3 побудовано залежності модулів і фаз коефіцієнтів передачі та вхідної провідності від частоти. Вираз для вхідної провідності можна отримати з системи (2) поділивши друге рівняння на перше.

$$\dot{Y}_{\text{вх}}(p) = \frac{\dot{K}_U(p)}{\dot{K}_I(p) \dot{Z}_n}$$

Таблиця 1. Значення резонансних частот і параметрів електричної схеми

f_A , Гц	f_R , Гц	C_0 , нФ	R_e , Ом	C_M , нФ	L_M , мГн	R_M , Ом	Z_i , Ом	Z_n , Ом
26333	22955	10	10^6	0,295	162,9	5,3	10	$71+j98$

Крива модуля вхідної провідності (рис. 3) має на частотах резонансу описані вище максимум та мінімум.

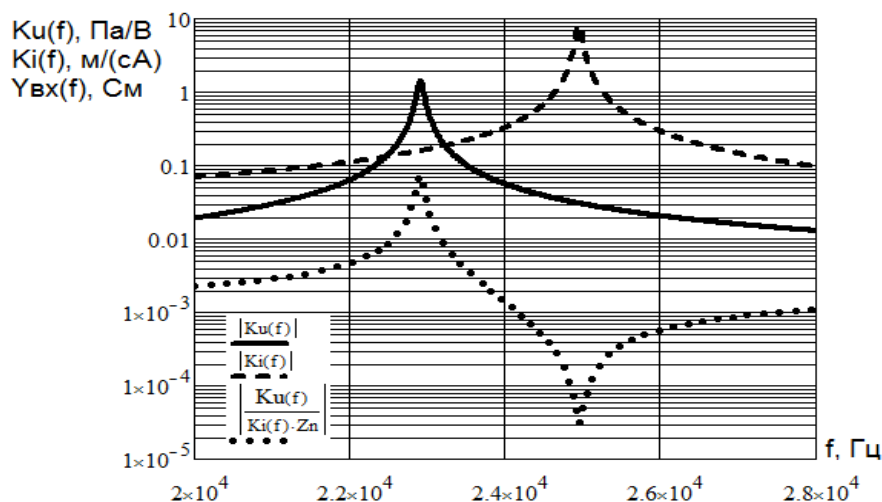


Рис. 3. Залежність модулів вхідної провідності та передаточних функцій п'єзопривода-випромінювача від частоти

В цих точках зсув фаз між вхідним струмом і напругою дорівнює нулю (рис. 4), а, отже, вхідна провідність є активною. Коефіцієнти передачі за струмом і напругою мають максимуми на відповідних частотах, що обумовлює наявність двох максимумів коефіцієнта передачі за потужністю.

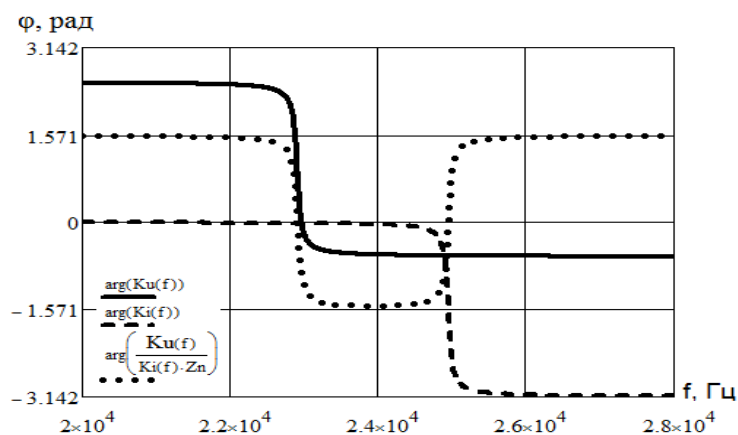


Рис. 4. Залежність фаз вхідної провідності та передаточних функцій п'єзопривода-випромінювача від частоти

Розглядаючи залежності зсуву фаз від частоти (рис. 4) можна зробити висновок, що на робочій частоті послідовного резонансу швидкість руху робочої поверхні синфазна з вхідним струмом, а отже і з вхідною напругою, тиск в робочому середовищі має зсув фази по відношенню до швидкості руху робочої поверхні, обумовлений комплексним характером акустичного опору навантаження. Цей зсув фаз можна визначити, використо-

вуючи залежність $\varphi = \arctg \left(\frac{Im(\dot{Z}_H)}{Re(\dot{Z}_H)} \right)$

Висновки

Виведені вирази коефіцієнтів передачі $K_U(p)$, $K_I(p)$ можуть бути використані при проектуванні та аналізі мехатронних систем з резонансними п'єзоприводами-випромінювачами.

При розробці мехатронних систем з п'єзоприводами-випромінювачами в якості сигналів керування можуть бути використані як вхідні струм і напруга, так і сигнали пропорційні швидкості робочої поверхні та акустичного тиску в робочому середовищі, отримані з відповідних давачів. Стосовно використання сигналів з давачів акустичного тиску, то слід наголосити, що має бути врахований зсув фази по відношенню до вхідних сигналів, а також те, що давачем буде прийнято не лише сигнал від п'єзопривода, а і акустичні сигнали кавітаційного шуму.

В подальших дослідженнях необхідно з'ясувати як залежить форма кавітаційної області та картина акустичного поля від параметрів руху п'єзопривода, а також розширити знання про зв'язок компонентів спектру акустичного сигналу, що поширюється в рідині, з гідродинамічними явищами.

Література

1. Агранат Б.А. Основы физики и техники ультразвука: Учеб. пособие для вузов / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский и др. – М.: Высш. шк., 1987.-352 с.: ил.
2. Ермолов Е.И. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И.Е. Ермолова. – М. Машиностроение, 1986. – 280 с., ил.
3. Агранат Б.А. Ультразвуковая технология. Под. ред. Б.А. Аграната. – М.: Металургия. 1974 г.
4. Лепендин Л.Ф. Акустика: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с., ил
5. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник / За ред. Ю.Л. Мазора, Є.А. Мачуського, В.І. Правди. – К.: Вища шк., 1999. – 838 с.: іл.
6. Мовчанюк А.В. Інженерна методика визначення параметрів схеми заміщення п'єзоперетворювача / А.В Мовчанюк, В.П. Фесіч, І.М. Кирпатенко, О.Ф. Луговський // Вісник НУТУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – К. – 2006. – № 33. – с . 58 - 56
7. Донской А.В. Ультразвуковые электротехнологические установки // А.В. Донской, О.К. Келлер , Г.С. Кратыш. Л.: Энергоиздат, 1982. 208 с. с ил.

Новосад А.А. Особливості застосування ультразвукових резонансних п'єзоелектричних приводів-випромінювачів в системах мехатроніки. В роботі розглянуто структурну схему ультразвукової мехатронної системи, обґрунтовано необхідність керування акустичним полем у даній системі. Таке керування може бути здійснене шляхом зміни параметрів коливань робочої поверхні п'єзоелектричного привода випромінювача. Тому п'єзопривід розглянуто як ланку системи автоматичного керування, виведено вирази його передаточних функцій, експериментально підтверджено можливість їх використання. Зроблено висновки, стосовно введення в систему зворотних зв'язків за параметрами акустичного поля.

Ключові слова: кавітація, мехатронна система, п'єзопривід-випромінювач.

Новосад А.А. Особенности применения ультразвуковых резонансных пьезоэлектрических приводов-излучателей в системах мехатроники. В работе рассмотрена структурная схема ультразвуковой мехатронной системы, обоснована необходимость управления акустическим полем в данной системе. Такое управление может быть осуществлено путем изменения параметров колебаний рабочей поверхности пьезоэлектрического привода-излучателя. Поэтому пьезопривод рассмотрен как звено системы автоматического управления, выведены выражения его передаточных функций, экспериментально подтверждена возможность их использования. Сделаны выводы, относительно введения в систему обратных связей по параметрами акустического поля.

Ключевые слова: кавитация, мехатронная система, пьезопривод-излучатель.

A. Novosad. Specifics of ultrasonic piezoelectric actuators resonant emitters application in mechatronics systems. This research gives a description of an ultrasonic mechatronic system block diagram and justifies the necessity to control the acoustic field in the system. Such a control can be exercised by changing the vibration parameters of the piezoelectric emitter working surface. Therefore the piezoelectric emitter is considered as a link in the system of the automatic control. Possibility to use their transitions functions was experimentally proved. Conclusions were made regarding the introduction to a feedback system considering the parameters of the acoustic field.

Keywords: cavitation, mechatronic system, piezoelectric emitter