

Мовчанюк А. В.

Новосад А. А.

Омелич М. Ф.

Фесич В. П.

**Національний  
технічний  
університет  
України  
„Київський  
політехнічний  
інститут”**

УДК 62-791.2

## **МЕТОД ОЦІНКИ АМПЛІТУДИ КОЛИВАНЬ УЛЬТРАЗВУКОВИХ РЕЗОНАНСНИХ ПРИВОДІВ, НАВАНТАЖЕНИХ РІДКИМ СЕРЕДОВИЩЕМ**

*Розглянуто методику вимірювання та оцінки амплітуди механічних коливань ультразвукових резонансних приводів навантажених рідким середовищем. Наведено результати вимірювання амплітуди коливань резонансних приводів.*

*Methods of measurement and evaluation of the amplitude of mechanical vibrations of ultrasonic resonance drives loaded with liquid medium. The results of measuring the amplitude of resonant oscillations drive.*

### **Вступ.**

Ультразвукові резонансні приводи використовуються в багатьох технологічних процесах для збудження в рідкому середовищі акустичних коливань високої інтенсивності. Ці коливання спричиняють появу нелінійних ефектів в рідині, зокрема акустичної кавітації, що використовуються в процесах очищення, інтенсифікації хімічних реакцій, дегазації, диспергування, розчинення, перешкоджання кристалізації то що.

На сучасному етапі розвитку ультразвукових технологій найчастіше використовуються п'єзоелектричні вібраційні приводи. Вони мають високий електроакустичний ККД та гарні масо-габаритні характеристики. Для досягнення максимальної ефективності технологічного процесу, п'єзоелектричні приводи мають працювати на резонансній частоті. В такому випадку досягається максимальна амплітуда коливань. Частота механічного резонансу приводу, навантаженого рідким середовищем, відрізняється від частоти цього ж приводу в повітрі [1]. Це пояснюється зміною імпедансу навантаження внаслідок появи в зоні коливань робочої поверхні приводу рідинного середовища або двофазного кавітаційного середовища. Це призводить до зниження резонансної частоти приводу. Таким чином, електронні генератори, що живлять ультразвукові приводи, потребують підстроювання, яке б компенсувало зміну імпедансу. Це можна зробити контролюючи амплітуду коливань приводу та досягнувши її максимального значення. На відміну від

повітря, можливості оцінки зазначеного параметра є обмеженими через наявність рідини.

Метою даної статті є оцінка можливостей застосування в умовах систем автоматичного регулювання різних способів вимірювання амплітуди коливань робочої поверхні приводу.

Амплітуда коливань ультразвукового резонансного приводу може бути виміряна декількома способами, зокрема прямими та непрямими [2]. При прямому методі вимірюється безпосередньо амплітуда коливань. При непрямому методі вимірюється, наприклад, струм живлення п'єзоприводу, який може бути перерахований в амплітуду коливальної швидкості, а потім в амплітуду механічних коливань. Найбільш поширеними є прямі методи вимірювання.

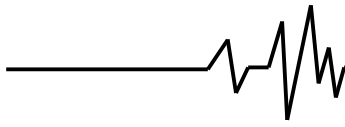
Їх поділяють на контактні та безконтактні.

При контактному методі на вібруючій поверхні закріплюється давач, наприклад, акселерометр, сигнал на якому пропорційний амплітуді швидкості або прискорення.

При безконтактному способі носієм інформації може бути оптична, електромагнітна або акустична хвиля. Шляхом вимірювання їх параметрів можна визначити амплітуду коливань поверхні приводу.

Безконтактні способи вимірювання коливань при наявності рідини мають ряд суттєвих недоліків, які перешкоджають їх застосуванню.

Так, оптичні методи підходять тільки для прозорих рідин. При розвиненій кавітації кавітаційні бульбашки екранують оптичну хвилю.



Методи, засновані на вимірюванні параметрів електромагнітного поля, не підходять для рідин внаслідок їх електропровідності.

При акустичних методах заважають кавітаційні шуми та зміни акустичних властивостей рідини. Але, завдяки простоті методів вимірювання, вони є перспективними.

Акустичний метод базується на вимірюванні параметрів акустичного поля і подальшому розрахунку амплітуди коливань самого приводу.

Акустичне поле описується хвильовим рівнянням [3], частковий розв'язок якого має вигляд

$$a = A \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c} x\right),$$

де  $a$  - зміщення частинок середовища відносно положення спокою,  $A$  - амплітуда зміщення,  $\omega$  - кутова частота,  $c$  - швидкість звуку в середовищі,  $x$  - координата.

Подвійне диференціювання по часу дає прискорення частинок середовища

$$\ddot{a} = -\omega^2 A \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c} x\right).$$

У відповідності до рівняння руху добуток маси на прискорення дорівнює силі, що діє на заданий об'єм рідини. Якщо привести рівняння до одиниці об'єму, то

$$\rho \cdot \ddot{a} = -\frac{dP}{dx},$$

де  $\rho$  - густина,  $P$  - тиск.

Звідки

$$-\rho \cdot \omega^2 \cdot A \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c} x\right) = -\frac{dP}{dx}.$$

Інтегруючи наведений вираз по  $x$ , отримаємо залежність звукового тиску від координати і часу. Тоді вираз для амплітуди звукового тиску можна записати як

$$P = A \cdot \rho \cdot c \cdot \omega.$$

Вважаючи, що амплітуда коливань частинок середовища дорівнює амплітуді коливань приводу (що виконується для плоских хвиль в пучності коливань), можна записати

$$A = \frac{P}{\rho \cdot c \cdot \omega}. \quad (1)$$

Таким чином, знаючи амплітуду звукового тиску і акустичні параметри середовища, можна оцінити амплітуду коливань приводу.

Для вимірювання акустичного тиску можуть бути використані п'єзокерамічні гідрофони (рис.1). Принцип їх роботи базується на прямому п'єзоєфекті. Основу конструкції

складає п'єзокерамічний елемент з двома металевими обкладинками. Під дією тиску на обкладинках з'являється різниця потенціалів, пропорційна прикладеному тиску. Для того, щоб поставити у відповідність виміряній напрузі значення тиску, необхідно знати чутливість гідрофону за напругою в режимі прийому, яка є відношенням напруги на виході гідрофону до акустичного тиску в тому місці, де проводяться вимірювання. Чутливість може бути визначена стандартним методом взаємності [4].

При визначенні чутливості гідрофону треба враховувати те, що чутливість змінюється зі зміною частоти. Тому калібрування треба проводити або в широкій смузі частот та вводити поправку на частоту або на частотах, наближених до робочої частоти приводу.

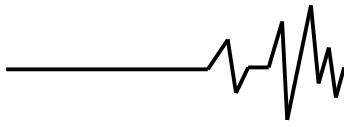


Рис. 1. Зразки вимірювальних гідрофонів з циліндричним та дисковим п'єзоелементами

Приклади виміряної чутливості гідрофонів у вигляді циліндрів та дисків наведені в таблиці 1. Вимірювання проводилися на частоті 50 кГц. При цьому залежність чутливості від частоти була лінійна. Як бачимо, навіть в однотипних зразках є розкид чутливості, що пов'язано з розкидом параметрів п'єзоелементів.

Таблиця 1

Номер зразку	Тип п'єзоелемента	Чутливість, В/Па
1	циліндр	$9 \cdot 10^{-5}$
2	циліндр	$9,3 \cdot 10^{-5}$
3	циліндр	$7,9 \cdot 10^{-5}$
4	диск	$4,1 \cdot 10^{-5}$
5	диск	$3,9 \cdot 10^{-5}$



У найпростішому вигляді вимірювання амплітуди можна здійснити з використанням осцилографа. Амплітуди напруги, пропорційні амплітуді звукового тиску, перераховуються за виразом (1) в амплітуду механічних коливань ультразвукового вібраційного приводу. Частота коливань, необхідна для розрахунку, вимірюється за допомогою того ж самого осцилографа.

Також може бути реалізована схема вимірювань на основі пікового детектора, за допомогою якого вимірюється амплітуда звукового тиску. При цьому перед піковим детектором потрібно встановлювати смуговий фільтр для зменшення дії акустичних кавітаційних шумів.

Інший варіант реалізації базується на використанні сигнального процесора, який забезпечує аналіз, дискретизованого за допомогою АЦП, сигналу з гідрофону. На індикатор виводиться значення розрахованої амплітуди.

З метою перевірки запропонованого методу оцінки амплітуди п'єзоприводу, навантаженого рідким середовищем, були проведені вимірювання. В ультразвукову ванну з приклеєним до днища п'єзорезонансним приводом (рис.2), заповнену водою, занурювався гідрофон і за допомогою цифрового осцилографа UNI-T UT2042B вимірювалися амплітуда і частота сигналу гідрофону.



Рис. 2. Ультразвуковий п'єзопривід

Вимірювання проводилось для чотирьох режимів роботи п'єзоприводу, що відповідали зміні напруги живлення приводу, а значить амплітуди його механічних коливань. Згідно з результатами вимірювань та розрахунку (рис.3), при лінійній зміні напруги на приводі його амплітуда коливань змінюється теж майже лінійно. Незначна нелінійність пояснюється

режимом роботи при розвиненій акустичній кавітації.

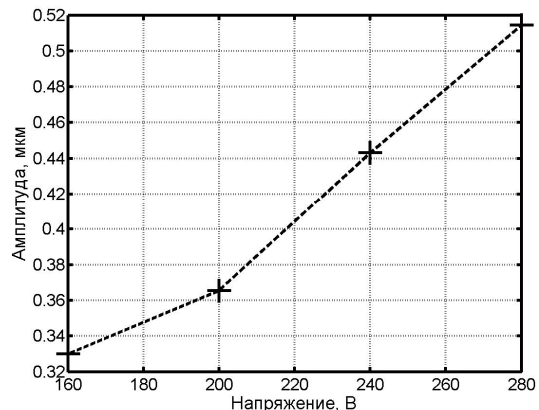


Рис. 3. Залежність амплітуди коливань приводу від прикладеної напруги

Крім того, в зв'язку з тим, що в ванні наявні стоячі хвилі, найбільш точний результат вимірювання отримано при розташуванні гідрофону у пучності акустичного поля.

#### Висновки

Описаний метод оцінки амплітуди механічних коливань п'єзорезонансного приводу, навантаженого рідким середовищем, є перспективним. Він дозволяє порівняти між собою різні зразки ультразвукового обладнання та підтримувати амплітуду коливань ультразвукових установок на заданому рівні.

Базуючись на даному методі, можуть бути побудовані індикатори амплітуди коливань. Однак, ці прилади мають велику похибку вимірювань внаслідок наявності акустичної кавітації та відмінності фронту акустичної хвилі від плоскої.

#### Література

1. Мовчанюк А.В. Методика расчета стержневого преобразователя, нагруженного жидкой средой. В кн.: Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Серия машиностроение. - Київ, Вип.38, Том 2, 2002, с.72-74.
2. Агранат Б. А., Башкиров В. И., Китайгородский Ю. И., Хавский Н. Н.. Ультразвуковая технология. - М.: Металлургия, 1974, -504 с..
3. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав. ред. И. П. Голямина.— М."«Советская энциклопедия», 1979, - 400 с.
4. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. - 2-е изд., перераб. и доп.-М.: Изд-во стандартов, 1982,-248 с.