

УДК 621.37

С.І. Випанасенко, д-р техн. наук, Є.В. Кошеленко

(Україна, м. Дніпропетровськ, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»)

ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ МАГНІТОСТРИКЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ З ІМПУЛЬСНИМ СТРУМОМ

Вступ. Технологія ультразвукового очищення широко застосовується у сучасній промисловості. За її допомогою з виробів знімають забруднення після консервації, транспортування, експлуатації та механічної обробки перед нанесенням на них захисних, зміцнювальних та інших покриттів. Ця технологія застосовується як для мініатюрних виробів (деталей годинників, ювелірних прикрас), так і для великих об'єктів, таких як котли та теплообмінне обладнання. Швидко розвивається процес очищення деталей та вузлів дизельних та карбюраторних двигунів, де застосування ультразвуку зумовлене не тільки високою якістю очищення, але й неможливістю використання інших способів усунення забруднень з поверхонь складної форми.

Аналіз досліджень та публікацій. Інтенсивність та якість очищення поверхонь залежить від декількох чинників, таких як рід забруднення, тип поверхні деталі, вид мийного розчину, що застосовується в установці, його температури тощо. Однією з головних вимог, що висуваються до технологічного процесу, є його відтворюваність та забезпечення стабільності результату. З цією метою для кожного виду забруднення вибирають відповідну мийну рідину та робочу температуру. Значна увага приділяється стабілізації амплітуди коливань стриктора[1]. Проте стабілізація цього параметра при зміні навантаження вимагає відповідної зміни потужності джерела ультразвуку. Оскільки зміна таких параметрів, як рід забруднення, маса деталей, температура обробки потребує не тільки зміни інтенсивності збудження кавітації у мийному розчині, але й зміни робочої частоти установки, то відповідно зростають вимоги до робочого діапазону частот та потужностей ультразвукового генератора. Так як ці зміни відбуваються безпосередньо у процесі очищення деталей, то вони також викликають необхідність створення досить складних схем регулювання режиму роботи ультразвукового генератора та установки в цілому.

Очищення в ультразвукових мийних ваннах, як вже зазначалося вище, відбувається за рахунок поверхневої дії кавітаційних бульбашок, що з'являються у мийному розчині при його озвучуванні. Інтенсивність процесу кавітації залежить від потужності та частоти озвучування[2]. Оскільки зі збільшенням частоти збудження рідини зростає кількість бульбашок, то використання імпульсів несинусоїдальної форми, що являють собою суму основної та вищих гармонійних частот, призведе до інтенсифікації кавітаційного процесу порівняно з живленням збуджуючого стриктора від джерела синусоїдальної напруги ультразвукової частоти. Проте сам стриктор по-різному передає потужність на різних частотах.

Мета роботи – проаналізувати потужності стрижневого магнітостриктора з урахуванням вищих гармонійних складових струму та з'ясування необхідності включення у схему заміщення ультразвукової магнітострикційної установки гілок, що враховують дію цих гармонік.

Основна частина. В ультразвукових мийних ваннах для обробки металевих та неметалевих поверхонь як джерело механічних коливань найчастіше використовують стрижневі п'єзоелектричні та магні-

тострикійні перетворювачі. Розглянемо коливання вільного стрижня, що являє собою прямокутний паралелепіпед з розмірами $l \times b \times e$, у змінному магнітному полі, паралельному ребру стрижня з довжиною l . Усі хвилі стиснення та розтягування майже цілком відбиваються від межі стрижня-повітря. Тому коливання бруска можна подати сумою значної кількості прямих та відбитих хвиль. З певною мірою наближення допустимо розглядати коливання стрижня під дією стоячих хвиль. Оскільки півхвилі напруженості магнітного поля з протилежними знаками викликають протилежні за знаком деформації, то їх дія на стрижня компенсується з високим ступенем точності і не викликає видовження магніостриктора. Тому умовою максимуму амплітуди коливань кінця стрижня є непарна кількість стоячих півхвиль напруженості поля по довжині стрижня.

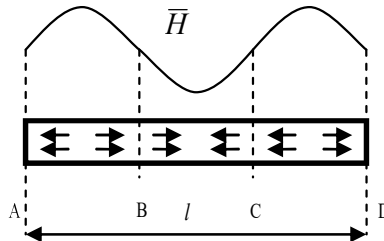


Рис. 1. Розподіл деформацій по довжині магніостриктора

З рис. 1 видно, що на ділянках АВ та CD стрижня зазнає розтягнення, у той час як на ділянці BC він стискається і компенсує тим самим розтягнення ділянки АВ, тому результуючі коливання кінця D стрижня будуть такими, якби поле було прикладене тільки до ділянки CD. Виходячи з цього, за основну (базову) робочу частоту магніострикторів приймаємо таку, яка відповідає довжині хвилі $\lambda_0 = 2l$ або $l = \frac{\lambda_0}{2}$, при цьому розтягується або стискається увесь стрижень, створюючи максимальну амплітуду коливань. Механічний резонанс на цій частоті є найбільш вираженим.

Вибір робочої частоти стрижня, обумовленої його довжиною, створює передумови до використання однієї робочої частоти, що відповідає максимуму амплітуди коливань самого стрижня. Для цього часто здійснюють збудження стрижня джерелом синусоїдальної напруги наперед заданої ультразвукової частоти з невеликим діапазоном регулювання. Такий режим роботи ультразвукової магніострикційної установки може бути оптимальним, якщо амплітуда коливань має велике значення, наприклад, при ультразвуковому різанні. Проте, в установках ультразвукової очистки, де магніостриктор контактує з ванною, мийним розчином та оброблюваними деталями, вирішальну роль відіграє не амплітуда коливань стрижня, а інтенсивність кавітаційних процесів, яка залежить не тільки від частоти, але й від температури та густини мийного середовища, наявності перешкод поширенню ультразвуку тощо.

Таким чином, однозначно стверджувати, що режим збудження, при якому спостерігається максимальна амплітуда стрижня є оптимальним для роботи ультразвукової мийної установки, не можна. Інтенсифікація кавітаційних процесів на вищих гармонійних частотах створює ймовірність більш ефективного очищення деталей на частотах, вищих за базову частоту $f_0 = \frac{c}{\lambda_0}$, якій відповідає довжина хвилі $\lambda_0 = 2l$.

Для дослідження ефективності очищення деталей ультразвуком на частотах, вищих за базову f_0 , проаналізуємо, яку потужність може віддавати стрижня на цих частотах. Оскільки у даній роботі розглядаються поздовжні коливання магніостриктора у полі, яке паралельне його довшій грані, то коливаннями стрижня по ширині та висоті можна знехтувати. Тоді для аналізу можна застосувати механічну еквівалентну систему з одним ступенем вільності. Найбільші коливання будуть спостерігатися у стрижні, вільному з обох кінців, тому зручно застосувати модель вільного стрижня, наведену на рис. 2.

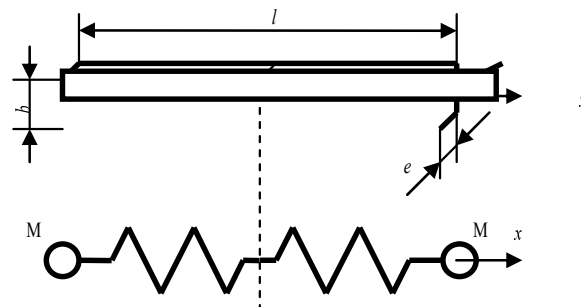


Рис. 2. Еквівалентна механічна модель магніостриктора

Оскільки поле, прикладене до магнітостриктора, вважаємо однорідним, а стрижень симетричним відносно площини, що проходить через середини довших ребер, то коливання стрижня відносно неї можна вважати симетричними. Точки, що знаходяться у площині симетрії, можна вважати нерухомими. Тоді еквівалентна маса, яка здійснює ті самі коливання, що й точка на кінці стрижня, буде дорівнювати половині маси стрижня. Диференційне рівняння коливань такої системи має такий вигляд [2]:

$$M\ddot{x} + W\dot{x} + Gx = F \cos \omega t,$$

де $M = \frac{1}{2} \rho l b e$ – маса половини стрижня, ρ – густина матеріалу стрижня; $W = \frac{4\pi^2 \mu M}{\rho \lambda^2}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості, μ – коефіцієнт внутрішнього тертя, λ – довжина хвилі коливань; $G = \frac{\pi^2 b e q}{2l}$ – еквівалентна жорсткість, q – модуль Юнга.

Розв'язком цього диференційного рівняння буде закон коливань кінця стрижня:

$$x = A \sin(\omega t - \psi),$$

де A – амплітуда коливань; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота; ψ – кут запізнення коливань магнітостриктора відносно прикладеної сили, тобто відносно коливань магнітного поля.

Величина амплітуди коливань магнітостриктора

$$A = \frac{F}{\omega \sqrt{W^2 + \left(\omega M - \frac{G}{\omega}\right)^2}} = \frac{F}{\omega W} \cos \psi, \text{ де } \operatorname{tg} \psi = \frac{\omega M - \frac{G}{\omega}}{W}.$$

Знаючи закон коливань магнітостриктора на базовій частоті, можемо знайти і закон коливань на частотах, які у ціле число разів більші за базову. Інтерес виявляють лише частоти, які більше базової у непарну кількість разів, тобто враховуються непарні гармоніки струму, тому що на парних гармоніках відбувається гасіння амплітуди коливань. Використаємо співвідношення для визначення еквівалентної маси, динамічної в'язкості та жорсткості на зазначених гармонійних частотах. Індексом 0 позначимо величини, що відповідають основній резонансній частоті магнітостриктора, а індексом h – величину, яка відповідає непарній гармоніці порядку h .

Співвідношення для маси стрижня, що коливається, $M_h = M_0$; для динамічної в'язкості $W_h = h^2 W_0$; для еквівалентної жорсткості $G_h = h^2 G_0$ [2]. З урахуванням того, що $f_h = h f_0$ та $\omega_h = 2\pi f_h = 2\pi h f_0 = h \omega_0$, одержимо закон коливань кінця магнітостриктора на частоті f_h ($h = 2m + 1, m \in N$):

$$x_h = A_h \sin(h\omega_0 t - \psi_h).$$

Амплітуди коливань на основній резонансній частоті та на частоті h відповідно

$$A_0 = \frac{F_0}{\omega_0 \sqrt{W_0^2 + \left(\omega_0 M_0 - \frac{G_0}{\omega_0}\right)^2}}, \quad A_h = \frac{F_h}{\omega_h \sqrt{W_h^2 + \left(\omega_h M_h - \frac{G_h}{\omega_h}\right)^2}}.$$

Покажемо зв'язок між A_h та A_0 .

$$A_h = \frac{F_h}{h\omega_0 \sqrt{h^4 W_0^2 + \left(h\omega_0 M_0 - \frac{h^2 G_0}{h\omega_0} \right)^2}} = \frac{F_h}{h^2 \omega_0 W_0 \sqrt{h^2 + \left(\frac{\omega_0 M_0 - G_0/\omega_0}{W_0} \right)^2}} = \frac{F_h}{h^2 \omega_0 W_0 \sqrt{h^2 + \operatorname{tg}^2 \psi_0}}$$

$$\text{або } A_h = \frac{F_h}{h^2 \omega_0 W_0 \sqrt{h^2 - 1 + \frac{1}{\cos^2 \psi_0}}} = \frac{F_h \cos \psi_0}{h^2 \omega_0 W_0 \sqrt{(h^2 - 1) \cos^2 \psi_0 + 1}}$$

Оскільки розглядаємо вільний з обох кінців магнітостриктор, то кут запізнення ψ_0 буде близьким до нуля, тобто коливання стриктора близькі за фазою до коливань збуджувального магнітного поля. Тому можна вважати, що $\cos \psi_0 \approx 1$, і

$$A_h \approx \frac{F_h \cos \psi_0}{h^3 \omega_0 W_0} = \frac{A_0}{h^3} \cdot \frac{F_h}{F_0}$$

Знаючи співвідношення для визначення амплітуд коливань на частотах f_0 та f_h , можемо розрахувати потужність коливань кінця стрижня на цих частотах.

Як відомо, активну потужність можна подати як добуток сили на швидкість, тобто

$$P = F \mathcal{G} = F A \omega$$

Застосовуючи дану формулу до розглянутих випадків, запишемо:

$$P_0 = F_0 A_0 \omega_0;$$

$$P_h = F_h A_h \omega_h = F_h \cdot \frac{A_0}{h^3} \cdot \frac{F_h}{F_0} \cdot h \omega_0 = \frac{F_h^2}{h^2 F_0} A_0 \omega_0$$

Знайдемо також відношення потужностей, що відповідають частотам f_0 та f_h :

$$\frac{P_h}{P_0} = \frac{1}{h^2} \cdot \frac{F_h^2}{F_0^2}$$

При імпульсному збудженні магнітостриктора можна задавати різні значення амплітуд вищих гармонік збуджувальної напруги та, як наслідок, струму через обмотку збудження стриктора, який прямо пов'язаний з амплітудою напруженості магнітного поля. Практичний інтерес являють гармоніки, на яких потужність складає не менше 5% від потужності на основній резонансній частоті, для яких виконується умова $P_h \geq 0,05 P_0$. З'ясуємо, яким має бути відношення амплітуд вищих гармонік струму через обмотку збудження магнітостриктора до амплітуди першої гармоніки, щоб ця нерівність виконувалася, враховуючи пропорційність $F_0 \sim I^{(1)}$, $F_h \sim I^{(h)}$. Отримані відношення подамо у вигляді таблиці.

Відношення амплітуд вищих непарних гармонік струму в обмотці збудження магнітостриктора до амплітуди першої гармоніки

h	3	5	7	9
$\frac{I^{(h)}}{I^{(1)}}$	0,67	1,12	1,57	2,01

Розклавши у ряд Фур'є стандартні криві струму, бачимо, що при підведенні періодичної напруги до обмотки збудження магнітостриктора і протіканні в ній періодичних несинусоїдальних струмів, потужність, що передається стриктором у навантаження на вищих гармоніках, не перевищує 5% потужності, що віддається на першій гармоніці. Таким чином, можна дійти висновку, із аналізу роботи ультразвуко-

вих магнітострикційних установок впливає, що можна використовувати стандартну схему заміщення [3], яка враховує лише основну частоту струму, який протікає в обмотці збудження стриктора (рис. 3).

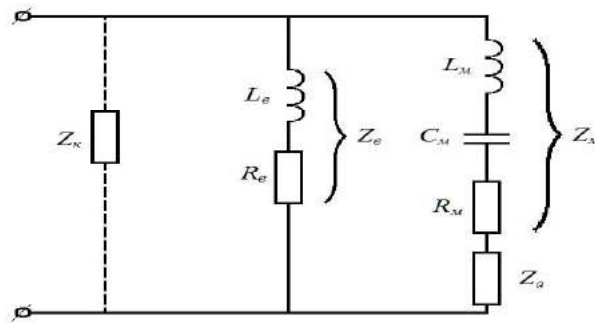


Рис. 3. Еквівалентна схема заміщення магнітостриктора, що враховує лише дію струму основної частоти. На схемі Z_k - еквівалентний комплексний опір, що відповідає механічній частині магнітострикційного перетворювача, Z_a - еквівалентний комплексний опір акустичного навантаження, Z_e - комплексний опір електричної частини магнітострикційного перетворювача, Z_M - комплексний опір електричного кола живлення перетворювача.

В окремих випадках, коли в обмотці збудження протікає струм, у якого відношення амплітуд вищих гармонік до амплітуди основної частоти перевищує значення, наведені в таблиці, у схему заміщення такої установки з метою підвищення точності розрахунків варто додати відповідні гілки, що враховують дію гармонік зазначеної частоти.

Висновок. У даній роботі досліджена залежність потужності магнітострикційного перетворювача від частоти струму. Визначені співвідношення між гармоніками імпульсного струму, при яких потужностями вищих гармонійних складових можна знехтувати. Це дозволяє застосувати схему заміщення, що враховує дію в магнітострикторі основної гармоніки, і на цій основі спростити аналіз.

Список літератури

1. Петушко І.В. Автоматизація технологічних процесів ультразвукової обробки рідких та твердих середовищ: дис. На здобуття наук. Ступеня д-ра техн. наук / І.В. Петушко. – С.Пб., 2005. – 329 с.
2. Кеді У. Пьезоелектричество и его практические применения: пер. 3 англ. Б.Н. Достовалова та В.П. Костянтинової під ред. А.В. Шубнікова / У. Кеді. – М.: Вид-во іноземної літератури, 1949. – 720 с.
3. Про деякі особливості узгодження системи тиристорний перетворювач частоти – навантаження при роботі інвертора на ультразвукову мийну ванну: тез. Доп. Всесоюз. Наук.-техн. конф. “Застосування у технологічних процесах машинобудівного виробництва напівпровідникових перетворювачів частоти”, Уфа, 1980 р. – Уфа: Уфим. Авіац. Ун-т, 1980. – 186с.

Рекомендовано до друку доц. Хацкевич Ю.В.