

RESPUESTA NO LINEAL DE TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS ULTRASÓNICOS DE POTENCIA PARA RADIACION EN AIRE

PACS: 43.35.Cz

Enrique Riera¹, Andrea Cardoni², Juan A. Gallego-Juárez¹

¹ Dpto. Sensores y Sistemas Ultrasónicos (DSSU), ITEFI, CSIC, Serrano 144, E28006-Madrid, España, enrique.riera@csic.es

²PUSONICS S.L., Pico Mulhacén 34, E28500 Arganda del Rey, Madrid, España, a.cardoni@pusonics.es

ABSTRACT

In the present paper, nonlinear effects such as a resonant frequency shifts, hysteresis phenomena, amplitude saturation, and modal interactions are experimentally investigated in the tuned responses of several piezoelectric devices. To mitigate the nonlinear behaviour of such airborne ultrasonic transducers, for practical purposes, different strategies will be presented and discussed. The experimental results obtained by applying these strategies will be also illustrated and analyzed. The improvement in the dynamic response of such transducers will be shown.

RESUMEN

En este trabajo, se investigan experimentalmente los efectos no lineales en la respuesta modal de diversos dispositivos piezoeléctricos tales como desplazamientos de la frecuencia de resonancia, fenómenos de histéresis, saturación en amplitud e interacciones modales. Para mitigar el comportamiento no lineal de estos transductores ultrasónicos para radiación en aire, con propósitos prácticos, se presentarán y discutirán diferentes estrategias. Los resultados experimentales obtenidos al aplicar estas estrategias serán presentados y discutidos. Se mostrará la mejora alcanzada en la respuesta dinámica modal de estos transductores.

INTRODUCCION

Los gases y medios fluidos multifásicos presentan una baja impedancia acústica específica y una alta absorción acústica. Para propagar ondas de elevada intensidad a través de ambos medios se necesita disponer de una buena adaptación de impedancia entre la fuente acústica y el medio, grandes amplitudes de vibración, y generar haces muy directivos o focalizados para concentrar la energía. Por tanto, para aplicaciones a escala industrial los transductores de potencia con radiadores extensos para radiación en aire deben alcanzar todos estos requerimientos en un solo dispositivo. La estructura de estos transductores, conocidos como transductores de placa, consiste básicamente en un vibrador longitudinal constituido por un

conjunto de cerámicas piezoeléctricas (PZT) colocadas entre dos masas metálicas, un dispositivo acoplado mecánicamente tipo "horn" que actúa como un amplificador mecánico, y un radiador de superficie extensa que vibra en un modo flexional alto. Este tipo de radiadores ha sido desarrollado por el Grupo de Ultrasonidos de Potencia del CSIC, y es comercializado actualmente por PUSONICS SL (www.pusonics.com).

Los transductores de placa, así como la mayoría de los sistemas ultrasónicos convencionales, muestran un comportamiento no lineal cuando son excitados en sus modos propios lo cual puede dificultar su aplicabilidad en problemas industriales. Un amplio rango de fenómenos no lineales han sido detectados, tales como la presencia de brucas caídas en sus frecuencias de resonancia, respuestas multimodales, combinación de resonancias, modulaciones en frecuencia y amplitud, y respuestas histeréticas.

En este trabajo se muestran estrategias para mitigar las no linealidades presentes en el sistema ultrasónico encaminadas hacia un mejor control de los sistemas resonantes a través de una combinación del modelado por elementos finitos (FEM) y el trabajo experimental.

TRANSDUCTORES PIEZOELECTRICOS DE POTENCIA CON RADIADORES CON SUPERFICIE EXTENSA

Los transductores de placa circular escalonada utilizados tanto para radiación coherente como focalizada constan de un radiador circular sintonizado en un modo flexional axisimétrico específico excitado en su centro por un vibrador piezoeléctrico que vibra en un modo propio longitudinal, como se muestra en la Figura 1(a). El diseño de este tipo de conjunto se lleva a cabo generalmente mediante el método por elementos finitos (MEF). La Figura 1 (b) muestra el diseño 2D axisimétrico del perfil escalonado direccional (cara trasera) y del perfil acanalado focalizado (cara radiante) de un radiador circular de placa; mientras que en la Figura 1(c) se ilustra la forma modal del modo sintonizado de trabajo a 25.7 kHz. En la Figura 2 se presenta la comparación entre las distribuciones de la velocidad de vibración calculada y medida a lo largo del radio de la placa radiante. La medida de la velocidad de vibración se ha llevado a cabo usando un vibrómetro láser (Polytec CFV055).

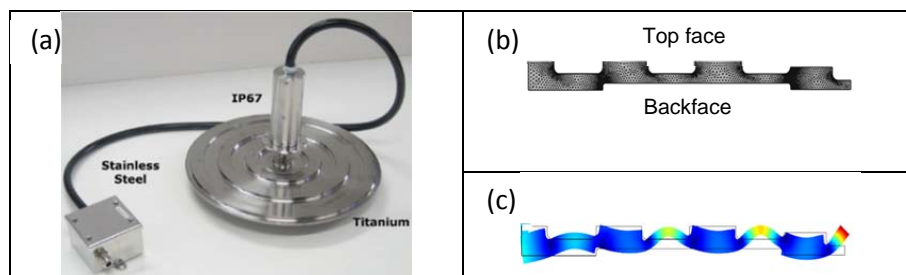


Figura 1. (a) Transductor ultrasónico de placa, (b) Modelo 2D de placa axisimétrica diseñado por MEF; (c) modo calculado esperado de placa sintonizada.

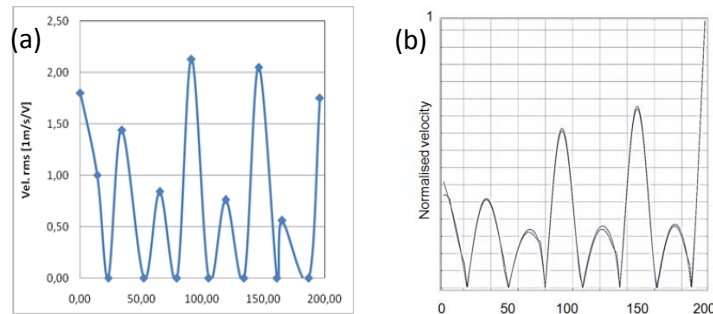


Figura 2. Distribuciones de desplazamiento (a) medidas con vibrómetro láser, (b) calculada mediante MEF

COMPORTAMIENTO VIBRATORIO NO LINEAL – IDENTIFICACIÓN DEL ORIGEN DE LOS PRINCIPALES PROBLEMAS – ¿CÓMO CONTROLAR LAS CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS NO LINEALES DE LOS TRANSDUCTORES DE POTENCIA?

En este apartado se describen dos clases de fenómenos no lineales que obstaculizan el comportamiento y el escalado de los sistemas ultrasónicos de potencia. Se comentarán y mostrará además los orígenes de las diferentes no linealidades y de las estrategias diseñadas para su eliminación o mitigación.

Las velocidades de vibración de los sistemas investigados se midieron usando un vibrómetro Polytec CFV055. Se desarrolló un programa LabView específico para controlar un generador de señal (Agilent 33220A) conectado a un amplificador de potencia (QSC Audio, RMX 4050HD) con objeto de excitar los transductores ultrasónicos bajo estudio. Se monitorizaron los parámetros eléctricos tales como la corriente, la tensión de excitación y la impedancia (I , V , Z) durante la caracterización de los sistemas en baja y alta potencia. Una descripción más detallada del dispositivo experimental utilizado para las pruebas de análisis de la vibración de los transductores puede encontrarse en dos publicaciones anteriores de los autores de este trabajo, Cardoni et al. (2010) y Riera et al. (2010).

Características de la Respuesta No Lineal de Transductores Piezoeléctricos de Potencia

La caída repentina de la frecuencia de resonancia y una respuesta histerética similar a la de un resonador tipo Duffing pueden manifestarse en los sistemas ultrasónicos de potencia. Como resultado, se han observado efectos no lineales asociados con la aparición de armónicos y subarmónicos en el espectro de la respuesta de sistemas sintonizados, junto con distorsiones de la señal, saturación en la amplitud de vibración, y dificultades en el control (inestabilidad) de los transductores. Estudios teóricos y experimentales han constatado que la respuesta característica tipo “softening” de los dispositivos ultrasónicos se debe principalmente al comportamiento no lineal de los conjuntos de cerámicas piezoeléctricas PZT en los transductores. De esta forma se ha demostrado que las pérdidas piezoeléctricas, dieléctricas y elásticas de las piezocerámicas son las responsables de los desplazamientos de la frecuencia de resonancia y de los incrementos de temperatura detectados con elevados niveles de la potencia de excitación, Mathieson et al. (2013).

Para superar estos problemas, se ha investigado en primer lugar el efecto del posicionamiento de las cerámicas piezoeléctricas incorporadas en los transductores ultrasónicos tipo sándwich con objeto de reducir la contribución de las pérdidas elásticas en la medida de la respuesta no lineal. Para ello se diseñaron y montaron cuatro prototipos de transductores piezoeléctricos de media longitud de onda (ver Figura 3). Dos transductores fueron construidos con dos anillos piezocerámicos PZT-802 (MTC Electroceramics) y cilindros de acero inoxidable como masas terminales, mientras que los otros dos transductores incorporaron cuatro anillos piezocerámicos entre tres masas de acero inoxidable. Todos los transductores se sintonizaron para vibrar en su primer modo longitudinal a una frecuencia comprendida entre 22 kHz y 27 kHz, dependiendo de su configuración.

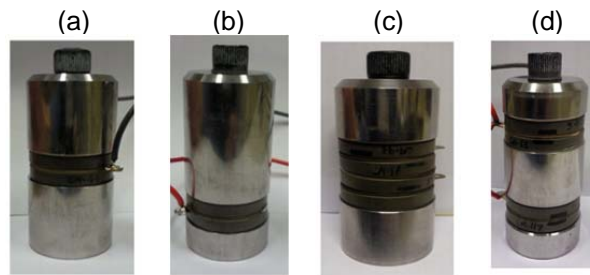


Figura 3. Transductores piezoeléctricos investigados

Todos los prototipos de transductores se excitaron con señales tipo burst en un rango de frecuencia de 700 Hz aplicando barridos bidireccionales (ascendentes y descendentes) con tensiones de excitación crecientes entre 1 y 50 V, e incrementos de 10 V. Se seleccionaron cinco niveles de voltaje iguales a 1 V, 10 V, 20 V, 30V, 40 V y 50 V. Se aplicaron tiempos de retardo de 0.5 segundos entre burst sucesivos para evitar incrementos térmicos en las PZT. Las respuestas modales se midieron alrededor de la frecuencia de resonancia apuntando el vibrómetro láser sobre la cara radiante del transductor.

En las configuraciones con dos anillos piezocerámicos (Figura 3(a)) se observó que al mover las PZT hacia el extremo del transductor (Figura 3(b)) se alcanza una reducción del 25% en el desplazamiento de la frecuencia al excitar con 50 V (ver Figura 4(a) y Figura 4(b)). En las configuraciones con cuatro anillos piezocerámicos (Figura 3(c)) se midió una reducción en el desplazamiento de la frecuencia del 10% (Figuras 4(c) y 4(d)). En este caso las PZT se desplazaron dos hacia cada uno de los extremos del transductor en forma simétrica con respecto al centro del dispositivo como se aprecia en la Figura 3(d). Estos resultados demuestran que al desplazar los elementos PZT desde la región central de los transductores (sección sometida a mayor tensión mecánica) que vibran longitudinalmente, es posible mitigar su respuesta no lineal.

Además, las gráficas en la Figura 4 revelan que para una misma tensión de excitación las velocidades de vibración más altas se obtuvieron en las configuraciones del transductor con los conjuntos PZT situados a un lado de la sección central comparados con aquellos con las PZT situadas en el centro. Ello implicó que para un valor fijo de la velocidad de vibración se alcanzaron disminuciones en el desplazamiento de la frecuencia del 75% y del 45% en las configuraciones con dos y cuatro PZT, respectivamente.

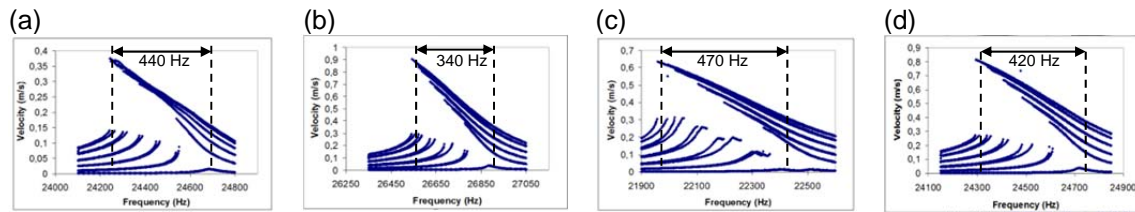


Figura 4. Medida de la respuesta mecánica no lineal de los prototipos. (a) dos anillos PZT en el centro del transductor; (b) dos anillos PZT separados y colocados simétricamente con respecto al centro del transductor; (c) un conjunto de cuatro anillos PZT en el centro del transductor; (d) dos conjuntos de dos PZT posicionados simétricamente respecto al centro del transductor.

INTERACCIONES MODALES EN LOS TRANSDUCTORES DE PLACA

Con objeto de estudiar la dinámica del transductor de placa mostrado en la Figura 1(a) con potencia se llevó a cabo un estudio experimental aplicando voltajes de excitación crecientes al dispositivo ultrasónico alrededor de su frecuencia de resonancia. En este caso se realizaron barridos bidireccionales alrededor de la frecuencia de resonancia nominal con tensiones de excitación crecientes entre 1 V y 50 V e incrementos de 10 V.

Para detectar, caracterizar y clasificar el comportamiento dinámico del dispositivo, se identificaron sus frecuencias modales a lo largo de un amplio rango de frecuencia a baja potencia. En este estudio se almacenaron los datos modales del transductor de placa diseñado para resonar en un modo compuesto longitudinal-flexional de 25.6 kHz a lo largo de un rango de frecuencia de 1 – 80 kHz. Se llevaron a cabo medidas con láser que permitieron identificar un gran número de modos del sistema con objeto de detectar las posibles resonancias responsables de interacciones modales no deseadas al trabajar con potencia.

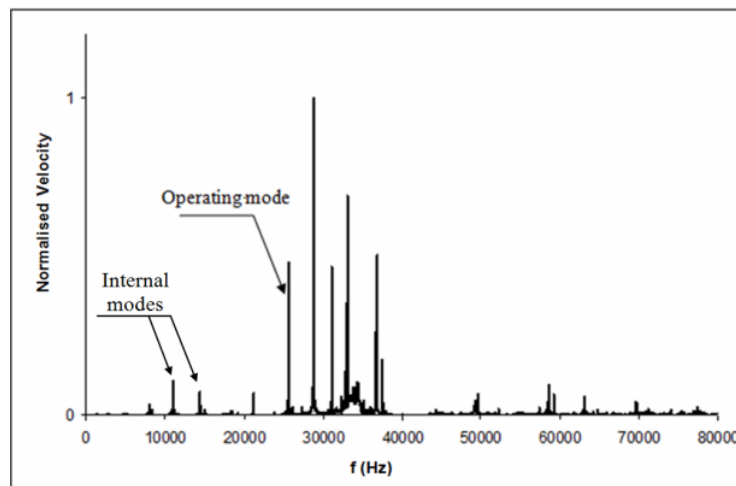


Figura 5. Velocidad de vibración medida en el rango de frecuencia comprendido entre 1 – 80 kHz con una excitación de 10 V.

La Figura 5 muestra el espectro de la velocidad de vibración obtenida al aplicar una excitación sinusoidal de 10 V al transductor. Fuera del plano, las velocidades de vibración se midieron en un punto del borde de la placa. Posteriormente, se investigó la respuesta de la velocidad de

vibración de la placa del transductor con tensiones de excitación crecientes. Las velocidades de vibración en el modo de trabajo se obtuvieron mediante barridos bidireccionales alrededor de la frecuencia nominal en un intervalo de 40 Hz. La Figura 6 muestra la respuesta de velocidad medida con incrementos de 0.5 Hz de la señal de excitación. Las curvas dibujadas en la Figura 6(a) corresponden a la respuesta de velocidad obtenida con una excitación de 10 V, mientras que la mostrada en la Figura 6(b) está relacionada con la respuesta medida con un señal de excitación de 300 V. Comparando las Figuras 6(a) y 6(b) puede observarse que al aumentar la potencia, las curvas obtenidas de la velocidad de vibración mediante barridos ascendente y descendente, son diferentes.

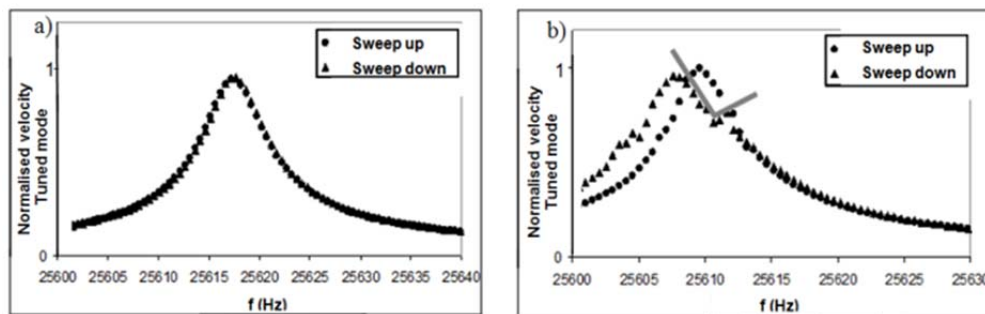


Figura 6. Curvas normalizadas de la velocidad de vibración del transductor en el modo de trabajo obtenidas alrededor de la frecuencia nominal mediante barridos ascendente y descendente: (a) tensión de excitación, 10 V; (b) tensión de excitación 300 V.

La Figura 7(a) revela que la respuesta de velocidad del dispositivo ultrasónico muestra una línea espectral cerca de la frecuencia de resonancia cuando se excita el sistema a frecuencias fuera de la región con forma de V mostrada en la Figura 6(b). Para una frecuencia de excitación dentro del mismo intervalo aparecen además dos líneas situadas en 11 kHz y 14.5 kHz, lo que enriquece el espectro de velocidad de la Figura 7(b). La suma de estas dos frecuencias es casi igual a la frecuencia de resonancia satisfaciendo así la relación ($\omega_1 + \omega_2 \approx \omega_0$). La Figura 5 revela que el dispositivo ultrasónico investigado tiene dos modos de vibración a frecuencias próximas a ω_1 y a ω_2 , llamados modos internos. La Figura 8 muestra una respuesta normalizada de la velocidad de uno de los modos detectados mientras se excita el transductor de placa en el rango 25.6 – 25.65 kHz con una señal de 300 V.

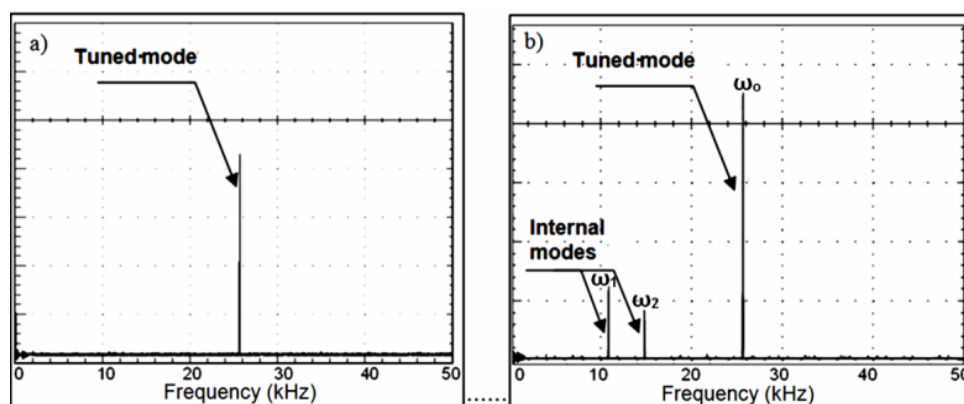


Figura 7. Medida espectral de la velocidad de vibración en el borde de la placa del transductor al excitar el conjunto con 300 V: (a) respuesta monomodal - frecuencia de excitación fuera de la región con forma de V, (b) respuesta multimodal - frecuencia de excitación dentro de la región con forma de V

La región con forma de V resaltada en la Figura 6(b) es un indicio de una posible transferencia de energía típica de sistemas autoparamétricos. Para probar este hecho, se midió el espectro de velocidad del transductor de placa excitado a frecuencias dentro y fuera de la región en forma de V utilizando un osciloscopio (Tektronix DPO 7054).

Para frecuencias de excitación dentro de la región con forma de V de la Figura 6(b), la respuesta del modo interno sigue curvas con forma de U como las mostradas en la Figura 8(a) y 8(b). Para frecuencias de excitación fuera de la región con forma de V la respuesta del modo interno fue nula. La medida de las frecuencias características es cualitativamente similar a la de los modelos analíticos de sistemas autoparamétricos, Carmell (1990).

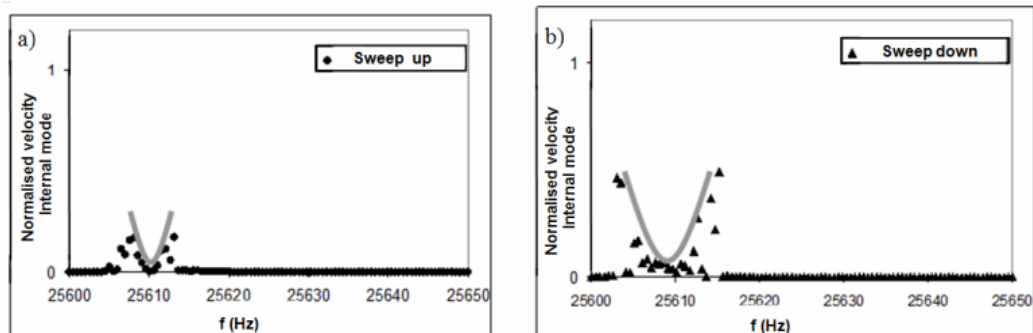


Figura 8. Respuesta secundaria normalizada de la velocidad de un modo interno del transductor de placa excitado con barridos en frecuencia alrededor de la frecuencia de resonancia con 300 V: (a) ascendente; (b) descendente.

Para evitar que tenga lugar la interacción modal no deseada se llevó a cabo una modificación en la geometría del sistema ultrasónico capaz de romper la relación $\omega_1 + \omega_2 \approx \omega_o$. Para ello, se decidió reducir el diámetro de la placa radiante en 0.5 mm. Esta modificación produjo un incremento de la frecuencia de resonancia del conjunto de 200 Hz. Pruebas experimentales posteriores del sistema modificado excitado con hasta 300 V no mostraron evidencia alguna de interacción modal.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado dos estrategias para controlar el comportamiento no lineal de transductores tipo placa al trabajar con potencia. En la primera, se ha investigado el efecto de la posición de los elementos piezocerámicos en el transductor de potencia tipo Langevin confirmando que es posible mitigar su respuesta no lineal en alta potencia al colocarlos lejos de las regiones de máxima tensión mecánica. En la segunda, se llevó a cabo una modificación geométrica en el radiador de placa circular del transductor para radiación en aire que evitó las interacciones modales de tipo auto paramétrico entre la frecuencia modal del transductor y modos no sintonizados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación económica de los ministerios MICIN y MINECO para la realización de este trabajo a través de los Proyectos DPI2009-14549-C04-01; DPI2012-37466-C03-01 y PTQ-09-02-017691.

BIBLIOGRAFIA

- Cardoni, A., Mathieson, A., Cerisola, N. (2010). "Reducing the nonlinear behaviour of power ultrasonic transducers for bone surgery", *Proceedings 39th International Congress on Noise Control Engineering, Inter noise 2010*, 13-16 June Lisbon, Portugal
- Cartmell, M.P., (1990). *Introduction to Linear, Parametric and Non-Linear Vibrations*, Chapman and Hall (London and New York)
- Riera, E., Cardoni, A., Blanco, A., Acosta, V., Gallego-Juárez, J.A. (2010). "Characterising the nonlinear dynamics of power ultrasonic systems", *Proceedings 39th International Congress on Noise Control Engineering, Inter noise 2010*, 13-16 June Lisbon, Portugal
- Mathieson, A., Cardoni, A., Cerisola, N., Lucas, M. (2013) "The influence of piezoelectric stack location of nonlinear behavior of Langevin transducers", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control* 60 (6) 1126-1133.