

Análisis eléctrico del altavoz dinámico mediante modelado de anomalías mecánicas de fricción

G. Ruiz, V. Sala, J.A. Ortega, J.L. Romeral,

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Departamento de Ingeniería Electrónica.

MCIA Research Group (Motion Control & Industrial Applications).

Abstract—El presente trabajo busca caracterizar el efecto de la fricción del conjunto móvil con el polo o núcleo de la estructura magnética sobre la corriente absorbida por el altavoz, una de las más relevantes anomalías mecánicas que se dan en la fabricación de altavoces de bobina móvil: Se presenta el modelo de fallo y se añade al modelo de parámetros concentrados del altavoz. Finalmente, se caracterizan sus efectos mediante la extracción de indicadores de fallo basados en el valor eficaz de la corriente, el comportamiento del componente armónico (HD_3) y los productos de intermodulación (IMD_3) de tercer orden.

Index Terms—altavoces, QC, anomalías mecánicas, rub & buzz

I. INTRODUCCIÓN

EL control de calidad, una cuestión cada vez más relevante en la manufactura de altavoces, requiere de una técnica fiable para la detección de los dispositivos defectuosos en un período de tiempo corto (2-5s) y un entorno de fabricación con condiciones de ruido acústico elevado. La fricción y la distorsión por zumbido no son aceptables en la fabricación de altavoces y tienen que ser detectada en el control de calidad.

Una gran variedad de técnicas de detección objetivas [1 - 4] se han desarrollado a lo largo de los últimos años. La gran mayoría de estos métodos se basan en la adquisición y posterior análisis de la presión sonora mediante micrófonos. Se comparan los DUT (Device Under Test) con un ejemplar de fabricación GU (Golden Unit), monitoreando la distorsión armónica de orden elevado ($HD_{n>10th}$) y prefijando umbrales establecidos en base a la experiencia acumulada con equipos defectuosos. La obtención y detección de los síntomas es muy dependiente del estímulo del altavoz. Por otra parte sus efectos en la presión sonora se solapan con las componentes armónicas resultantes del comportamiento altamente no lineal del altavoz en régimen de gran señal [5].

Manuscrito recibido el 12 de Febrero, 2010. Este trabajo ha sido soportado en parte por el Comisionado para Universidades e Investigación del DIUE de la Generalitat de Catalunya y del Fondo Social Europeo.

G. Ruiz es estudiante de doctorado de la Universidad Politécnica de Catalunya, miembro del centro de investigación MCIA y estudiante miembro de la Audio Engineering Society (e-mail: gruiz@eel.upc.edu / german.ruiz@mcia.upc.edu).

Estas y otras causas nos llevan, a que a día de hoy, siga siendo el oído humano la herramienta preferida en la detección de defectos de fabricación y la toma de decisiones correctivas de los procesos sobre la línea de producción. El uso de personal con oído entrenado es capaz de detectar fallos de fabricación, incluso síntomas tan pequeños que son casi imperceptibles para el oído medio no entrenado. Sin embargo, la fatiga, la distracción y la pérdida de atención afectan a la toma de decisión para la detección de un dispositivo sano o defectuoso.

La relación entre los defectos irregulares, sus síntomas y las causas físicas que los provocan es mucho más compleja y difícil de modelar que los parámetros y modelos de comportamiento no lineal dependientes con el desplazamiento. Una clasificación automática de las causas (rozamiento de la bobina, falta de fijación de uniones por pegamento,...) sigue siendo un reto para un sistema experto de control de calidad automático [6].

El objetivo de este trabajo es sentar las bases del diagnóstico de los defectos de fabricación mediante el análisis de corriente, siguiendo los pasos de otros autores que usan el sensado de corriente para completar el diagnóstico [7]. En el apartado II de este documento, se presentará el comportamiento y funcionamiento del altavoz en pequeña y gran señal, junto a las anomalías de fabricación más importantes. En el apartado III, se presentará un nuevo modelo de defecto de fabricación mecánica, en el cual se trata el efecto sobre la corriente absorbida de la fricción de la bobina móvil con el núcleo magnético de la estructura del altavoz. A su vez, se presentará la característica óptima del estímulo que permita magnificar los efectos de fricción y su visibilidad en la variable de estado de interés. En el apartado IV se procederá a la muestra de resultados mediante el análisis en tiempo y frecuencia de la señal de corriente para diferentes grados de fallo mediante la simulación del modelo no lineal de parámetros concentrados del altavoz completado con el modelo del defecto de rozamiento y se verificará la posibilidad de diagnosticar ejemplares defectuosos por anomalías mecánicas de fricción mediante el análisis de señal de corriente.

II. FUNCIONAMIENTO DEL ALTAVOZ

La fig.1 ilustra la estructura física del altavoz electrodinámico.

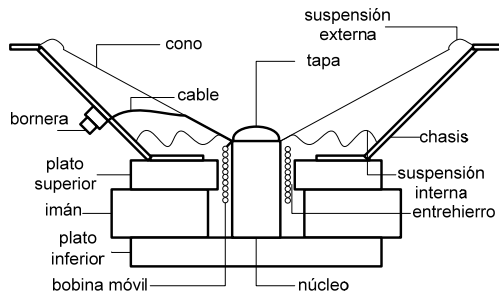


fig. 1 Estructura del altavoz electrodinámico

El comportamiento del altavoz depende del desplazamiento de su conjunto móvil y se puede distinguir claramente tres zonas de funcionamiento:

A. Dominio en pequeña señal

En el dominio de pequeña señal y a bajas frecuencias, la distorsión que produce el altavoz se representa con una función de transferencia lineal y por un circuito electromecánico equivalente [8], utilizando parámetros agrupados (R_e , L_e , M_{ms} , K_{ms} , R_{ms}) tal y como se muestra en la fig. 2. Los parámetros de una GU se utilizan como valores de referencia. Si un parámetro del DUT se aparta significativamente del GU se clasifica como defectuoso. Por ejemplo, el aumento de la R_e disminuye la sensibilidad y la eficiencia del altavoz, y es fácil su medida mediante un estímulo de tensión continua, la adquisición de la corriente y la aplicación de la Ley de Ohm.

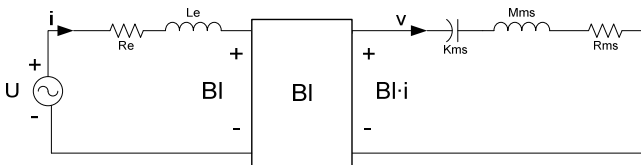


fig. 2 Modelo electromecánico en pequeña señal del altavoz

B. Dominio en gran señal. Parámetros no lineales

Se corresponde con el comportamiento del altavoz sometido a grandes desplazamientos, donde aparecen distorsiones a la salida del altavoz debidas a las no linealidades de los parámetros electromecánicos y donde la radiación y el entorno acústico no tienen influencia directa en el proceso de esta generación. Las no linealidades más relevantes en altavoces electrodinámicos son el factor de fuerza $BI(x)$, ver fig.3, el factor de rigidez $K_{ms}(x)$ de la suspensión mecánica, ver fig.4, y la inductancia $L_e(x)$ de la bobina móvil, ver fig.5, todas dependientes del desplazamiento axial instantáneo (x), y por tanto solo significativas en el dominio en gran señal. Las componentes fundamentales de la distorsión no lineal son causa de la gran asimetría de los parámetros no lineales. Estos provocan importantes componentes de distorsión de segundo

orden, que en la mayoría de los casos son consecuencia de un mal diseño o fabricación, siendo su solución de bajo coste. Las componentes de distorsión de tercer orden corresponden con la característica simétrica de los parámetros, que se deben principalmente a los criterios de optimización de diseño como el tamaño, peso o coste del altavoz.

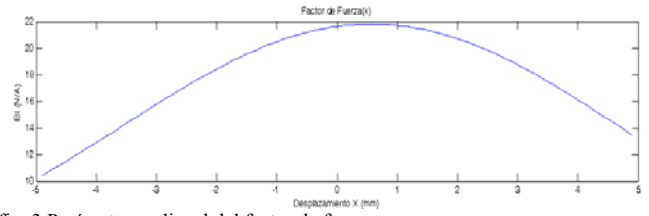


fig. 3 Parámetro no lineal del factor de fuerza

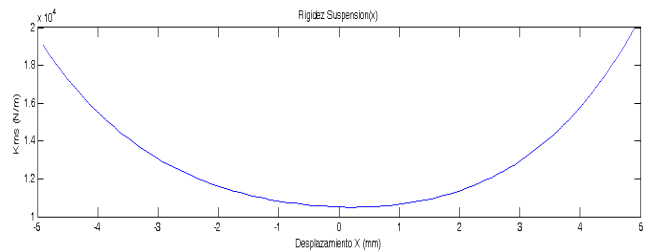


fig. 4 Parámetro no lineal de la rigidez de la suspensión

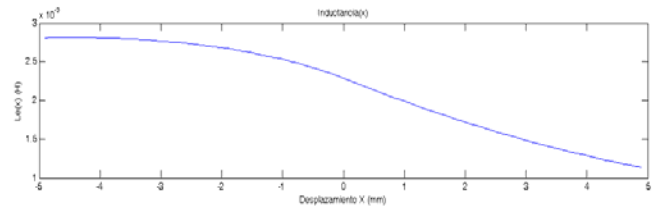


fig. 5 Parámetro no lineal de la inductancia

El modelo matemático (1) que describe el comportamiento del altavoz en gran señal es el siguiente:

$$\begin{cases} u(t) = i(t)R_e + L_e(x) \frac{di(t)}{dt} + BI(x)v(t) \\ BI(x)i(t) = M_{ms} \cdot \frac{d^2x(t)}{dt^2} + R_{ms} \cdot \frac{dx(t)}{dt} + K_{ms}(x)x(t) \end{cases} \quad (1)$$

Donde M_{ms} , $K_{ms}(x)$ y R_{ms} son respectivamente la masa del altavoz, el parámetro de rigidez de las suspensiones y la constante de pérdidas mecánicas por amortiguación, $BI(x)$, R_e y $L_e(x)$ son respectivamente los parámetros de factor de fuerza, resistencia eléctrica e inductancia eléctrica de la bobina móvil.

C. Anomalías de fabricación

Los principales defectos irregulares que se encuentran en la fabricación de altavoces se clasifican [9] en dos grandes bloques:

Rozamiento o fricción

La bobina no se mueve libremente en el entrehierro y en consecuencia recibe fuertes golpes y raspaduras con el contacto con la estructura magnética al moverse adelante y atrás. Las razones para que exista fricción pueden ser varias:

- 1) Las dimensiones físicas de la bobina no se corresponden con el entrehierro (la bobina es demasiado grande o pequeña; montaje magnético incorrecto que resulta en un entrehierro no concéntrico con el núcleo magnético).
- 2) Alineación incorrecta de la bobina respecto la estructura magnética.
- 3) Suspensiones fuera de especificación.
- 4) La aparición de partículas magnéticas sueltas en el entrehierro que rozan con el conjunto móvil

Zumbido

Se refiere a todos aquellos fenómenos de resonancia que aparecen en la parte mecánica del altavoz, extremadamente dependientes de la frecuencia y la magnitud del estímulo de entrada. Se pueden encontrar fenómenos de resonancia relevantes si el estímulo permite la acumulación de energía necesaria para hacer notoria la resonancia. Las razones para la aparición de zumbidos se pueden resumir como:

- 5) Mal encolado entre las partes móviles destinadas a ser fijadas correctamente juntas (bobina-cono, tapa-cono, suspensión-cono).
- 6) Rejillas, cesta o tornillería mal fijada.
- 7) El golpeo de los terminales de los cables de la bobina con el diafragma.

Los efectos de las anomalías son fuertemente dependientes del estímulo y en algunos casos la naturaleza del proceso puede ser inclusive aleatoria. La dependencia de la amplitud de la señal estímulo con la aparición de los defectos revela un fuerte mecanismo no lineal que transforma la energía de la señal en componentes de frecuencia no existentes en la señal de entrada.

III. MODELO DE ANOMALÍA MECÁNICA DE FRICCIÓN DEL ALTAVOZ ELECTRODINAMICO

El principal objetivo al final de la línea de producción es descubrir las unidades defectuosas y la relación entre el defecto y su causa física de origen para la toma de medidas correctivas. Cuanto más se conoce de la naturaleza física del defecto, más se puede ajustar el proceso de extracción de fallo para su correcta detección. Así pues, la creación de un modelo físico es la mejor manera de resumir los conocimientos disponibles sobre el comportamiento del altavoz.

El sistema de fuerzas que se presenta en la fig.6 corresponde al defecto de fabricación de rozamiento del soporte de la bobina con el núcleo magnético,

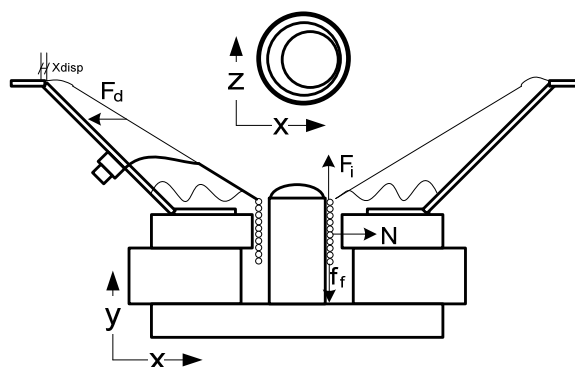


fig. 6 Diagrama de fuerzas del defecto de fricción entre soporte de bobina y núcleo magnético

De acuerdo con el modelo de fricción estático presentado y tratado en [10-13], la fricción $f_f(v)$ consiste en

$$f_f(v) = \begin{cases} \min(f_{res}, f_{stick}), & v = 0 \\ -\mu \cdot N \cdot \frac{|v|}{v}, & |v| > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$N = -F_d = X_{disp} \cdot K_y$$

Donde f_{res} es la fuerza de Lorentz resultante del producto $Bl(x) \cdot i$, f_{stick} es la fuerza de fricción anterior al momento de puesta en movimiento de la bobina, v es la velocidad de desplazamiento, F_d es la fuerza que realiza el conjunto móvil sobre el polo del núcleo magnético debido al producto del desplazamiento $X_{disp} \cdot K_y$ donde X_{disp} corresponde al desplazamiento horizontal de la bobina sobre su posición de origen y diseño, y K_y se aproxima al valor del parámetro de rigidez de la suspensión en posición de reposo. N es la normal, por lo tanto de igual magnitud y signo contrario a F_d .

De este modo la ecuación que define el sumatorio de fuerzas resultante en la parte mecánica del altavoz (1) queda modificada de la siguiente manera

$$\begin{cases} u(t) = i(t) \cdot R_e + L_e(x) \frac{di(t)}{dt} + Bl(x) \cdot v(t) \\ Bl(x) \cdot i(t) = M_{ms} \cdot \frac{d^2x(t)}{dt^2} + R_{ms} \cdot \frac{dx(t)}{dt} + K_{ms}(x) \cdot x(t) + f_f(v) \end{cases} \quad (3)$$

dónde $f_f(v)$ es la fuerza de fricción dependiente de la velocidad de desplazamiento del conjunto móvil del altavoz.

En la fig.7 se muestra el modelo de fricción creado con bloques Matlab Simulink®. En la fig.8a se muestra el circuito electromecánico equivalente del modelo en gran señal del altavoz y en la fig.8b el diagrama de bloques completo de simulación.

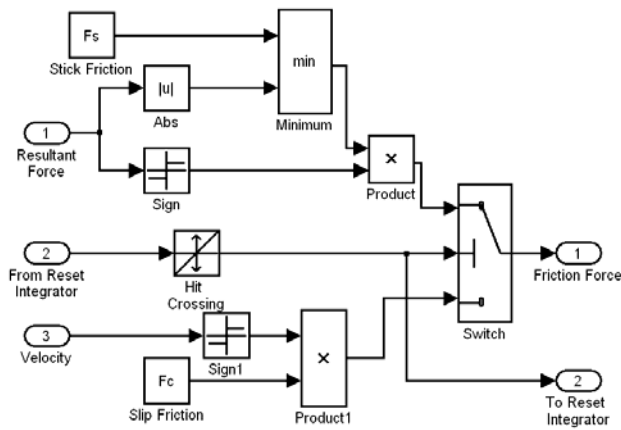
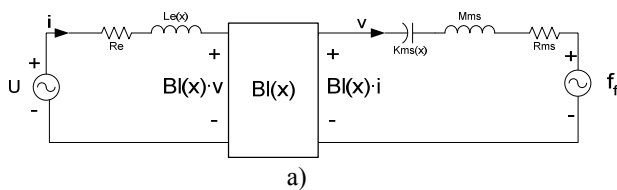
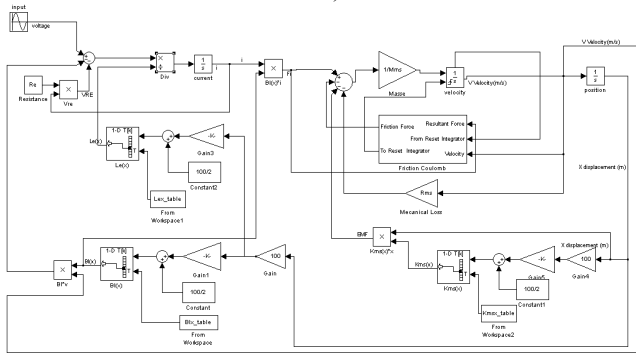


fig. 7 Modelo de fricción estática

Para la excitación del DUT se ha seleccionado una señal sinusoidal con amplitud variable V_p y frecuencia igual a la de resonancia del altavoz. El estímulo atiende a las premisas de magnificar los efectos de la fricción mediante la obtención de la máxima velocidad, gran desplazamiento y mínima corriente por impedancia correspondiente al circuito eléctrico equivalente de la bobina. Además, la impedancia móvil [14] debida a la tensión inducida en la bobina será máxima ya que trabajamos en condiciones de máxima movilidad, obteniendo de esta forma la máxima visibilidad de los defectos de fricción en corriente.



a)



b)

fig. 8 a) Diagrama de bloques del modelo en gran señal del altavoz con modelo de defecto de fricción incluido. b) Detalle de los bloques de Matlab Simulink® del modelo completo

IV. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Para la simulación del modelo del altavoz no lineal de gran señal completado con el modelo del defecto de fricción se han utilizado los datos de un altavoz Beyma 10MI100 [15], véase tabla 1. Además se ha utilizado el coeficiente de fricción del contacto ferro magnético-poliamida obtenido experimentalmente [16] con un valor de $\mu = 0.06$.

Se han obtenido como indicadores de fallo el valor eficaz

(4) de la corriente absorbida por el altavoz y la relación del altavoz sano versus diferentes simulaciones de altavoces con un creciente nivel de defecto mediante componentes armónicos (5) y productos de intermodulación (6a y 6b) de tercer orden mediante simulaciones con diferentes fuerzas de fricción y tensiones de entrada. En la fig. 9a se puede observar la representación gráfica de las señales temporales de corriente en función de X_{disp} a una tensión de entrada de 2.83 V_p (1W a 8Ω). En la fig. 10 se representa la comparativa del espectro normalizado del altavoz sano con el de mayor fallo. A continuación, en la fig.11 se muestra la relación entre la fuerza de fricción y tensión aplicada con los valores de la distorsión armónica de tercer orden, donde se visualiza que en régimen de gran señal la aportación a la componente del tercer armónico correspondiente a la fuerza de fricción es muy pequeña en comparación a la aportación de la componente de no linealidad. Finalmente, en la fig. 12 se muestra el resultado

TABLA I
PARÁMETROS DEL ALTAVOZ

Parámetro	Valor
R_e	6.2 Ω
$L_e(0)$	2.3e-3 H
$Bl(0)$	21.6 N/A
$K_{ms}(0)$	1/95e-6 N/m
M_{ms}	34e-3 Kg
R_{ms}	2.6 Kg/s
Rango frecuencias	70-4000 Hz
Frecuencia de resonancia	89 Hz
Diámetro exterior del Entrehierro	81e-3m
Diámetro de la bobina	77e-3m
Material soporte bobina	Poliamida
Material polo núcleo	Ferro magnético

Tabla 1 Parámetros del altavoz 10MI100 de Beyma de la generación de productos de intermodulación de tercer orden.

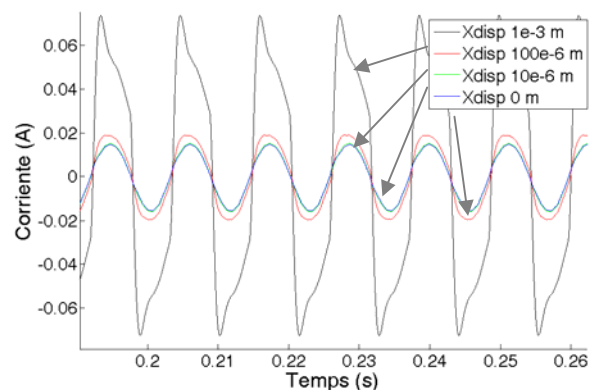


fig. 9 Representación gráfica de las señales temporales del modelo con las diferentes fuerzas de fricción $X_{disp} = \{1e-3, 100e-6, 10e-6, 0\} m$

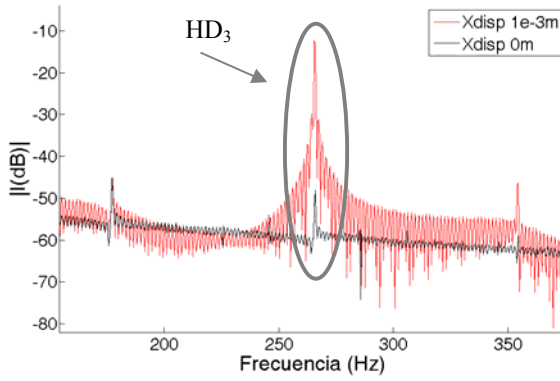


fig. 10 Representación en dB de las componentes armónicas de tercer orden en un altavoz sano $X_{disp}=\{0m\}$ y otro con fallo $X_{disp}=\{1e-3m\}$.

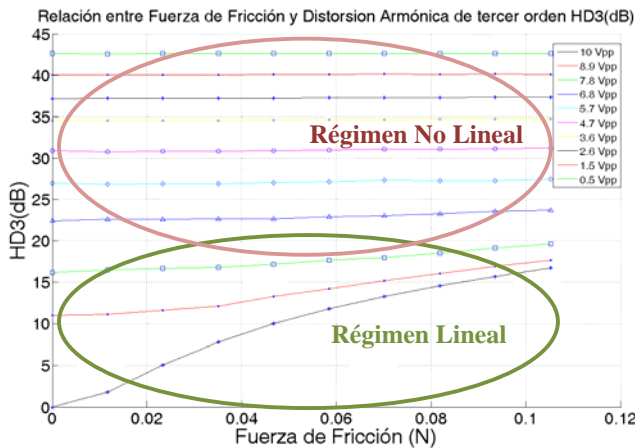


fig. 11 Relación de las Corrientes RMS vs Fuerza de Fricción $\{0N,0.12N\}$ aplicada y tensiones de entrada $\{0.5V,10V\}$

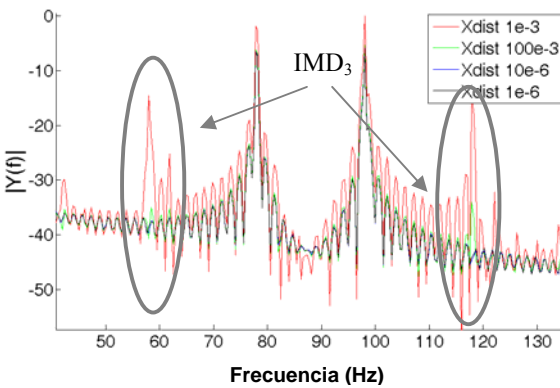


fig. 12 Detalle de la señal de intermodulación resultante de la excitación del altavoz con dos tonos a 78 y 98 Hz. Se observa la aparición de componentes en frecuencia en 58 y 118 Hz correspondientes a los productos de intermodulación de tercer orden y con amplitud creciente con el nivel de fallo.

$$I_{RMS} (A) = \sqrt{\left(\frac{1}{T_2 - T_1}\right) \int_{T_1}^{T_2} i^2(t) dt} \quad (4)$$

$$HD_n (dB) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_f(nf)}{V_h(nf)} \right) \quad (5)$$

$$IMD_{31} (dB) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_f(2f_2 - f_1)}{V_h(2f_2 - f_1)} \right) \quad (6a)$$

$$IMD_{32} (dB) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_f(2f_1 - f_2)}{V_h(2f_1 - f_2)} \right) \quad (6b)$$

V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han sentado las bases para el diagnóstico de defectos de fabricación en altavoces mediante el análisis de corrientes. Se ha presentado un modelo de defecto de fricción integrado al modelo del altavoz en gran señal. Se han analizado y caracterizado los síntomas que surgen del modelo de fricción, proponiendo como factores de fallo la relación entre componentes armónicos de tercer orden y el valor RMS de la corriente con resultados satisfactorios y óptimos cuando se estimula en régimen lineal ($V_{in} < 2.8V$) con un tono sinusoidal a la frecuencia de resonancia del altavoz. También se ha visualizado y demostrado cualitativamente la aparición de productos de intermodulación con relación al nivel de fallo.

REFERENCIAS

- [1] S. Temme, "Are You Shipping Defective Loudspeakers to Your Customers?" Application Note of Listen, Inc., www.listeninc.com
- [2] W. Klippel, "Measurement of Impulsive Distortion, Rub and Buzz and other Disturbances," Presented at the 114th Convention of the Aud. Eng. Soc., Paper 5734 (2003 Mar.).
- [3] F. Leonhard, "Method and System for Detecting and Generating Transient Conditions in Auditory Signals", United States Patent # 5,884,260, March 16, 1999.
- [4] Groepner, G., et. al. ", A Reliable Method for Rub and Buzz Testing Using Automated FFT Response and Distortion Technique," presented at the 91st Convention of the Audio Engineering Society, 1991 October, preprint 3161.
- [5] W. Klippel, "Diagnosis and Remedy of Nonlinearities in Electro-dynamical Transducers" presented at the 109th Convention of the Audio Engineering Society, J. Audio Eng. Soc. (Abstracts), vol. 48, p. 1115 (2000 Nov.), preprint 5161.
- [6] W. Klippel, S. Irrgang, U.Seidel, "Loudspeaker Testing at the Production Line" presented at the 120th Convention of the Audio Engineering Society, Paris, France, 2006 May 20-23, Paris.
- [7] Yang, Yi; Wei, Junfeng; Feng, Haihong; Wen, Zhoubin "A Novel Technique for Detecting and Locating Loudspeaker Defects" presented at the 127th Convention of the Audio Engineering Society, New York, USA, 2009 October 9-12, New York.
- [8] R. H. Small, "Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis," J. Audio Eng. Soc., vol. 20, pp. 383 - 395 (1972 June).
- [9] Tang, Flemming J.; Skytte, Per, "Determination of Production-Related Defects in the Manufacture of Acoustic Transducers" presented at the 73th Convention of the Audio Engineering Society, Eindhoven, The Netherlands, 1983 March 15-18, Eindhoven.
- [10] B. Armstron-Hélovry, "Control of Machines with Friction". Boston: Kluwer Academic Press, 1991.
- [11] C. Canudas, H. Olsson, K. J. Aström, and P. Lischinsky, "Dynamic friction models and control design," in Proc. Amer. Contr. Conf., June 1993, pp. 10-12.
- [12] B. Armstron-Hélovry. "Stick slip and control in low-speed motion," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 38, Oct. 1993.
- [13] Bonnie S. Heck, "Analysis of Stick-Slip Motion in Coulomb Damped Systems", Proceedings of the American Control Conference. Albuquerque, New Mexico June 1997
- [14] King, John, "A Loudspeaker Voice Coils" JAES Volume 18 Issue 1 pp. 34-43; February 1970
- [15] <http://profesional.beyma.com/pdf/10MI100E.pdf>
- [16] M. I. Bessonov, et al. "Polymides as antifriccion materials", Mekhanika Polimerov, Vol. 3, No. 4, pp. 740-742, 1967.