

تبیین و تحلیل جنبه های عملکردی سنسورهای سرامیکی پیزو الکتریک ، در اندازه گیری نیرو (بار)

جهانگیر باقری

moghaddas74@yahoo.com

استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مهدی مقدس

moghaddas74@yahoo.com

کارشناس ارشد - شرکت صنایع هواپیماسازی ایران (هسا)

چکیده:

یک دیسک PZT (متشکل از سرب ، زیرکونیوم و تیتانیوم) با سیستم دو الکترودی میتواند به عنوان یک سنسور (عضو حسگر) در ترانسدیوسر های اندازه گیری نیرو (Load Cell) از نوع پیزو الکتریک مورد استفاده و بهره برداری واقع شود . در این مقاله ضمن اینکه تغییرات ولتاژ خروجی در یک فرکانس تحریک ثابت بررسی گردیده است ، شیف (تغییر و جابجایی) در فرکانس تشدید با لحاظ کردن تغییرات (بارگذاری) نیز مورد سنجش و اندازه گیری قرار گرفته است . نشان داده میشود که بیشترین حساسیت و بهترین عملکرد ، هنگامی حاصل میشود که دیسک در وضعیت (مود) شعاعی (Radial) و در فرکانسی پایین تر از فرکانس تشدید (در حالت دیسک بدون بارگذاری) به ارتعاش درآید . همچنین در این مقاله اثرات پارامترهای گوناگون بر روی عملکرد ترانسدیوسر نیز با لحاظ کردن مقوله هایی نظیر دما ، خطی بودن عملکرد ، پایداری و تکرار پذیری مورد بررسی و تدقیق قرار میگیرند .

واژگان کلیدی : سنسور پیزوالکتریک ، فرکانس تشدید ، دیسک سرامیکی ، مود شعاعی ، Load Cell

۱-مقدمه

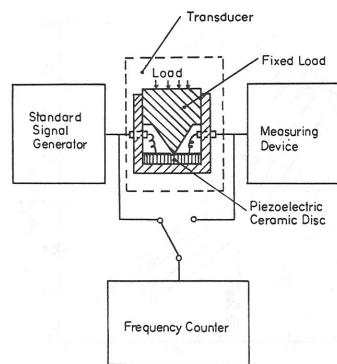
ترانسدیوسرهای پیزو الکتریک عموماً برای اندازه گیری نیروها یا فشارهای گذرا و دینامیکی مورد استفاده قرار میگیرند. برخی از موارد استفاده این نوع ترانسدیوسرها عبارتند از : مقوله های ژئوفیزیکی و انفجارهای زیر آب ، موتورهای احتراقی درون سوز ، توربینها ، تونلهای باد و ماشینهای جوشکاری نقطه ای و فشاری و ... [1].
Langenecker(1962) یک ابزار پیزو الکتریک از نوع تیتانیوم - باریوم مبتنی بر تغییرات فاکتور کوپلاژ الکترومکانیکی را برای اندازه گیری بارهای استاتیکی مورد استفاده قرار داد . مع الوصف روش مذکور از حساسیت پایینی برخوردار بود. [2]
Minaev(1975) و همکارانش ابزار تک الکترودی یاد شده فوق را با بهره گیری از دو الکترود ، توسعه و ارتقا دادند . آنها ضمن تحریک ترانسدیوسر سرامیکی مورد نظر در شرایط فرکانس تشدید ، تغییرات در ولتاژ خروجی را در حالت بارگذاری اندلزه گیری کردند . سپس در خصوص ارتقا و توسعه میزان خطی بودن آنها توصیه و پیشنهاد کردند که ولتاژ خروجی ثابت نگه داشته شود (ثبیت فرکانس خروجی) و تغییرات در ولتاژ ورودی مورد سنجش و اندازه گیری واقع گردد . با این حال این روش در بسیاری از موارد مطلوب و ایده آل نمیشد . [3]

این مقاله به تبیین بررسی ها و تحقیقات بیشتر در خصوص توسعه ترانسدیوسر (مبدل) پیزو الکتریک ، بمنظور اندازه گیری بار و نیروهای استاتیکی می پردازد . تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب مشخصه های بار مورد مطالعه ، در فرکانسهای مختلف ، بمنظور انتخاب وضعیت و حالت ارتعاشی و همچنین بهره مندی از بیشترین حساسیت برای انتخاب مناسبترین فرکانس، مورد بررسی و مطالعه قرار می گیرد . یک تئوری و نظریه ساده نشان می دهد که چگونه حساسیت به ولتاژ ورودی و نیز به نوع ماده پیزوالکتریک و اندازه آن بستگی دارد . [4]

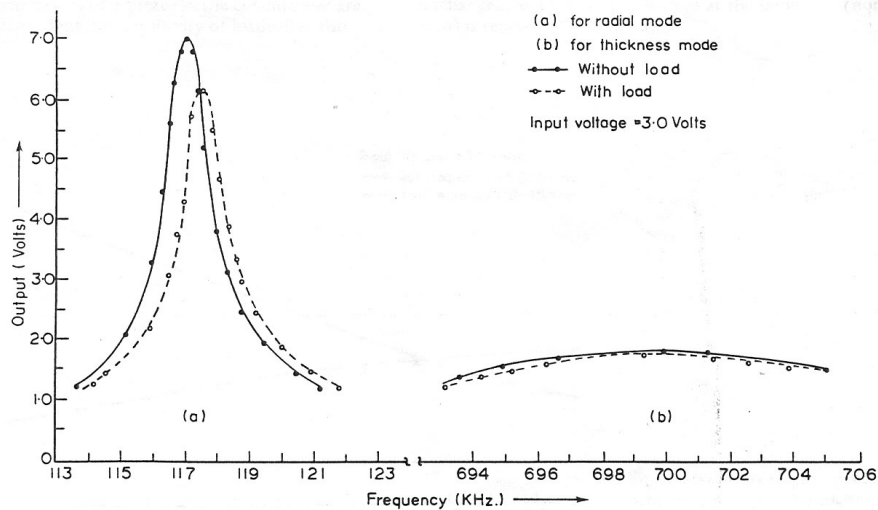
۲- آزمایشات

به منظور انجام تحقیقات ذیربط یک دیسک پیزو الکتریک (از جنس PZT) با قطر 20 میلیمتر و ضخامت 3 میلیمتر که در مود ضخامت پلاریزه شده است مورد استفاده قرار گرفته است . اتصالات دیسک ، توسط الکترودها صورت گرفته است . سطح الکترود بالایی به دو نیمه تقسیم میشود . یکی از نیمه ها برای ورودی و نیمه دیگر برای خروجی . الکترود سطح زیرین نیز مشترکا برای هر دو مدار مورد استفاده واقع شده است .

تحت این شرایط یک سیگنال در فرکانسی نزدیک به فرکانس تشدید به الکترودهای ورودی اعمال میگردد که باعث ارتعاش دیسک میشود . متعاقبا اجرای مرحله فوق ایجاد یک ولتاژ در الکترودهای خروجی را موجب میشود ، شکل (۱) . حال اگر توسط یک توده (جرم) گوه ای شکل باری به نوار باریک بین الکترودهای بالایی اعمال شود ، دامنه ارتعاشات مکانیکی تغییر می کند و متناظرا یک تغییر در ولتاژ خروجی رخ میدهد . اندازه گیریهای ولتاژ خروجی ، در فرکانسهای تحریک ورودی مختلف و در یک محدوده بارهای استاتیک صورت می پذیرد .



شکل (۱) ساختار اصلی یک ترانسدیوسر پیزوالکتریک برای اندازه گیری بار



شکل (۲) پاسخ فرکانس در مدهای ضخامت و شعاعی، در وضعیت ارتعاش

۳- انتخاب فرکانس تحریک

در خصوص بهینه کردن توانایی اندازه گیری سیستم ، انتخاب دقیق و مطمئن فرکانس تحریک ، مهم و قابل توجه میباشد بطوریکه این امر مقوله تاثیرگذاری در حساسیت و خطی بودن ابزار و ترانسدیوسر مورد نظر میباشد .

الف - وضعیت (مود) ارتعاش

پاسخ دیسک مورد نظر در فرکانسهای تحریک مختلف ، با لحاظ کردن تثبیت ولتاژ ورودی در وضعیت 3 ولت ، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است . شکل (۲) بیانگر تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب فرکانس تحریک در دو حالت اعمال بار (بارگذاری) و نیز شرایط بی باری میباشد . قابل مشاهده و استنباط است که در وضعیت وجود ارتعاشات شعاعی (با فرکانس رزونانس 117.008 kHz) ، نمودار تشدید تیز میشود ضمن اینکه تقویت ولتاژ نیز رخ میدهد . برعکس در مورد ضخامت ، در محدوده بالایی فرکانس رزونانس (699.953 kHz) تشدید ضعیف و کمی وجود دارد . بدیهی است که با لحاظ کردن ارتعاشات در مود شعاعی ، دیسک از حساسیت بیشتری برخوردار است .

ب- پاسخ فرکانس در حالت بارگذاری

شکل (۳) نشان دهنده پاسخ فرکانس دیسک برای انواع متغیر بار و در محدوده صفر تا 3 کیلوگرم می باشد . همانطور که ملاحظه می شود با افزایش بار افزایش اندکی در فرکانس تشدید رخ می دهد ضمن اینکه افت نسبتا زیادی را در ولتاژ خروجی شاهد هستیم . بعنوان مثال در فرکانس تشدید در وضعیت بدون بارگذاری با اعمال 0.5 کیلوگرم بار ، ولتاژ خروجی به میزان 5% تقلیل میابد در حالیکه تغییرات در فرکانس تشدید تنها 12% میباشد . بنابراین میتوان نتیجه گرفت که اندازه گیریهای سطح ولتاژ خروجی ، مواردی نسبتا حساس در آشکار سازی ارتعاشات و تغییرات بار هستند .

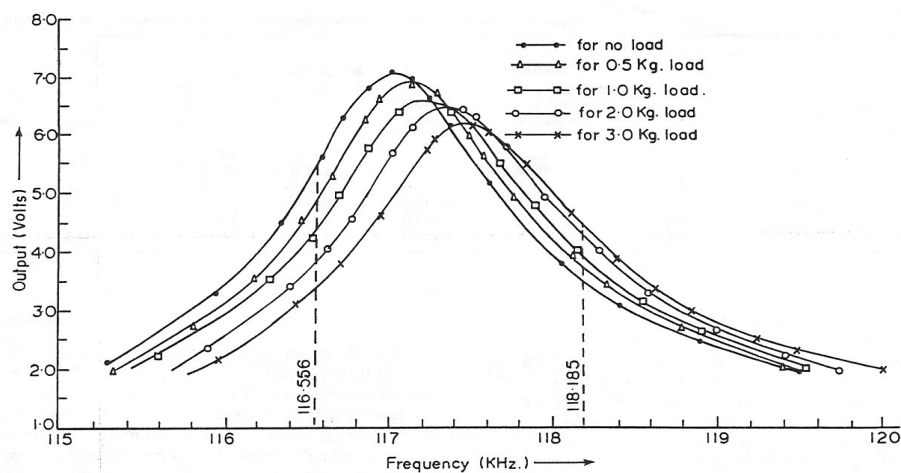
ج- اثر فرکانس بر حساسیت

همچنین از شکل (۳) میتوان مشاهده کرد که اگر دیسک در فرکانس تشدید و در حالت بدون بارگذاری عمل کند ، تغییرات در ولتاژ خروجی بواسطه تغییر بار 0.5 کیلوگرمی ، در حدود 5% می باشد . در حالیکه در یک فرکانس تحریک پایین تر (116.556 kHz) ، این تغییرات حدود 13% میباشد . تغییرات در ولتاژ خروجی در حالت بارگذاری در یک فرکانس تحریک (116.556 kHz) با خط ممند در شکل (۴) نشان داده شده است . باید توجه و اذعان داشت که با افزایش بار ، در ولتاژ خروجی با کاهش مواجه خواهیم شد .

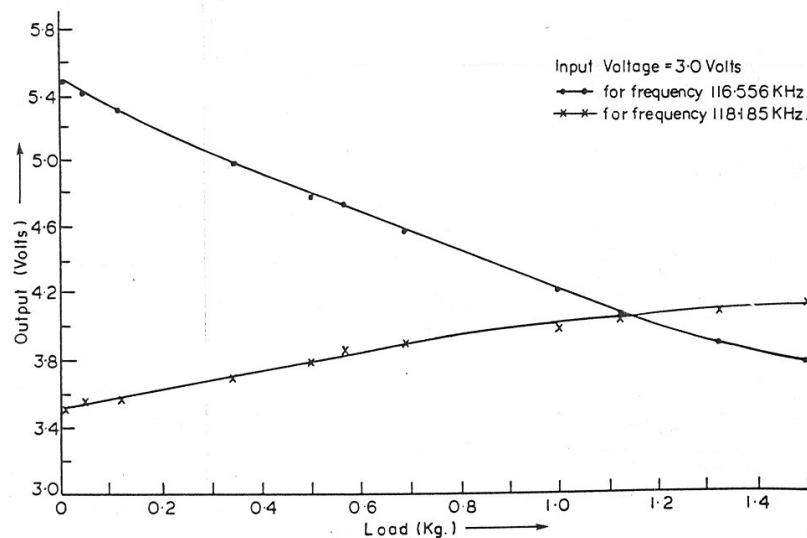
درمقایسه ، اگر دیسک در فرکانس (118.185 kHz) که بالاتر از فرکانس تحریک در حالت بی باری دیسک میباشد) تحریک گردد ، تغییرات در ولتاژ خروجی برای 0.5 کیلوگرم بار ، فقط در حدود 5% میباشد .

د- اثر فرکانس بر روی میزان خطی بودن

میزان خطی بودن منحنی خروجی نیز به فرکانس تحریک وابسته است . بطوریکه فرکانسیدر حدود (116 kHz) در مقایسه با (117 kHz) و (118 kHz) بترتیب 3% و 9% دارای میزان خطی بودن بهتری می باشد . از آنجا که هم بیشترین حساسیت و هم خطی بودن نسبی ، هردو در فرکانس حدود (116 kHz) حاصل میگردد ، بدیهی است که فرکانس تحریک بهینه در محدوده زیر فرکانس تشدید میباشد .



شکل (۳) منحنی پاسخ فرکانس در وضعیت ولتاژ ورودی برابر با 3(V)



شکل (۴) تغییرات ولتاژ خروجی بر اساس بار در فرکانس ثابت

۴- اثر ابعاد دیسک و مواد گوناگون

در این مرحله مناسب است که تاثیر پارامترهای فیزیکی مختلف و مواد پیزوالکتریک گوناگون را بر روی حساسیت ولتاژ خروجی مورد توجه و آزمون قرار دهیم. ضریب فرکانس نیرو K_v که بیانگر میزان جابجایی (شیفت) فرکانس دیسک با در نظر گرفتن تغییر در میزان میدان بار میباشد، بصورت زیر قابل توصیف است. [5]

$$K_v = \frac{2}{\eta} \cdot \frac{\Delta v/v}{cP/Dt} \quad (1)$$

که در این رابطه :

$\Delta v/v$ جابجایی (شیفت) نسبی فرکانس ، P نیروی استاتیک ، D قطر دیسک ، t ضخامت دیسک ،

C سرعت صوت در ماده مربوطه و η ضریبی است که بیانگر میزان کیفیت ساختار اتصالی میباشد .

رابطه (۱) در خصوص یک سیستم با الکتروود منفرد (تک الکتروودی) و در وضعیت مرتعش شده شعاعی ، استخراج و لحاظ گردیده است . با اعمال تغییر مناسب در η میتوان رابطه مذکور را تحت شرایط مناسب برای یک سیستم دو الکتروودی و در وضعیت مرتعش شده شعاعی نیز لحاظ کرد . ضریب K_v نیز متناظرا با این موارد تغییر می کند .

جدول (۱) بیانگر میزان جابجایی در فرکانس تشدید مبنی بر بارهای گوناگون و نیز بر اساس تغییر در فرکانس خروجی در یک فرکانس تحریک ثابت و برای بار ثابت میباشد . از جدول (۱) برمی آید که در محدوده خطای آزمایشات ، نسبت

$\Delta v/v$ متناسب است با $\Delta V/V$. یعنی $\frac{\Delta v}{v} = K \frac{\Delta V}{V}$ که در آن K ، ثابت تناسب است . با جایگذاری $\Delta v/v$ در رابطه (۱) ضریب K_v میتواند بر حسب تغییر در ولتاژ خروجی و به شرح زیر تبیین گردد :

$$\frac{K_v}{K} = \frac{2}{\eta} \cdot \frac{\Delta V/V}{cP/Dt} = K_v \quad (2)$$

که در آن K_v ، ثابت ولتاژ-نیرو می باشد . رابطه (۲) می تواند با لحاظ کردن بار P مجددا بر حسب تغییر در ولتاژ خروجی ΔV بازنویسی شود .

$$\frac{\Delta V}{P} = K_v \cdot \frac{\eta}{2} \cdot \frac{cV}{Dt} \quad (3)$$

از رابطه (۳) چنین به نظر می‌رسد که با افزایش میدان اعمالی، تغییرات در ولتاژ خروجی بیشتر خواهد بود. به هر حال ورای محدوده خاصی از فرکانس، دیسک بصورت غیر قطبی در خواهد آمد. برای داشتن بیشترین حساسیت دیسک بایستی خیلی نزدیک به این محدوده راه اندازی و تحریک شود. همچنین انتخاب موادی که امواج را با سرعت بیشتری ارسال میدارند سودمند و توام با مزیت می‌باشد. از آنجا که C متناسب است با ثابت فرکانس ماده مورد نظر، به هر میزانی که ثابت فرکانس بیشتر باشد، ابزار دارای حساسیت بیشتری خواهد بود. رابطه (۳) بیانگر این امر است که قطر دیسک بکار رفته بایستی حتی الامکان کوچک باشد. مع الوصف، سیستم و روند بارگذاری، محدودیتهای کارکردی را در این خصوص لحاظ میکند.

جدول (۱) مقادیر مشاهده شده از شیفیت فرکانس نسبی و تغییر نسبی در ولتاژ خروجی

ردیف	بار (Kg)	فرکانس رزونانس (kHz)	تغییر در فرکانس (kHz)	شیفت نسبی فرکانس	ولتاژ خروجی (V) در فرکانس 116.556 (kHz)	تغییر در ولتاژ خروجی (V)	تغییر نسبی در ولتاژ خروجی	ثابت تناسب K
1	0.0	117.008	-	-	5.50	-	-	-
2	0.5	117.136	0.128	0.0011	4.90	0.60	0.109	0.0101
3	1.0	117.243	0.235	0.0020	4.40	1.10	0.200	0.0101
4	2.0	117.401	0.393	0.0033	3085	1.65	0.300	0.0110
5	3.0	117.503	0.495	0.0042	3045	2.05	0.373	0.0130
6	5.0	117.559	0.551	0.0047	3.05	2.45	0.445	0.0105

۵- پایداری دما

از آنجا که پارامترهای دیسک سرامیکی پیزوالکتریک وابسته به دما هستند، حساسیت L.C نیز متناظرا با دما تغییر میکند. با توجه به اطلاعات و مستندات موجود در خصوص میزان درصد انحراف فرکانس و ضریب انبساط حرارتی دیسک سرامیکی بکار رفته در این تحقیق، تغییرات در حساسیت در محدوده $\pm 0.05\%$ در یک درجه سانتیگراد می‌باشد. [6]

۶- تکرار پذیری

تکرار پذیری در L.C های سرامیکی پیزوالکتریک با مقایسه ولتاژ خروجی در همان بار مجدداً مورد بررسی قرار گرفته است. در این خصوص چنین استنباط میگردد که ولتاژ خروجی (با بار صفر) قبل از بارگذاری و بعد از جدا سازی بار، مقدار ثابت و تغییر ناپذیر باقی میماند و ولتاژ خروجی در همان بار (غیر صفر) دارای تکرار پذیری معادل $\pm 1.5\%$ می‌باشد.

۷- نتیجه گیری

بهره گیری و استفاده از مواد سرامیکی پیزوالکتریک در سنسورهای ذریعته ایده ای نسبتاً جدید است. بررسیها و مطالعات نشان میدهد که بکارگیری ابزار دو الکترودی و اندازه گیری بار بر حسب تغییرات در ولتاژ خروجی در فرکانس تحریک ثابت و در وضعیت ارتعاشی شعاعی، همراه با مزایای ویژه ای خواهد بود. همچنین نشان داده شده است که استفاده از یک فرکانس تحریک پایین تر (کوچکتر) از فرکانس تشدید، میزان حساسیت و خطی بودن کلی ابزار را افزایش میدهد. استفاده از دیسک با ابعاد کوچکتر و ساخته شده از موادی با ثابت فرکانس بالا میتواند موجب افزایش بیشتری در حساسیت ابزار گردد.

4 , 513.

[2]: Langenecker, B. (1962)"Piezoelectric device for measuring dynamic and static forces"; Rev Scienc Instrument , 33 , 4 .

18 ,24 .

New Delhi , 16 .

[5]:Baranovski , S. N. and Shestopal , V. O.(1975)"Variation of the frequency of a piezoelectric Sov phys Acoust , 21 , 7 .

[6]:Jain G. C. , Bindal , V. N. , Janardan Singh , Ved Singh , Narayana Swami and Soni , N. C. (1980)"The frequency and temperature dependence of dielectric and electromechanical properties Ultrasonic (ICEU-80) , National physical Laboratory ,New Delhi , 18-20 july , 431 .