http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۱ شماره ۲ تابستان ۱۳۹۰ ص ص ۵۷-۶۶

تاریخچه مقاله:
دریافت۸۹/۱۰/۲۹
پذیرش ۹۰/۵/۲۶
ارائه در سایت ۹۰/۶/۲۲

طراحی و ساخت میراگر مغناطیسی و کنترل فعال ارتعاشات تیر با استفاده از جریان گردابی

علی اصغر مداح[۱]، یوسف حجت[۲*]

۱- دانشجوی دکترای، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
*تهران، صندوق پستی 14115-143. yhojjat@modares.ac.ir

چکیده- روشهای مختلفی برای میرا نمودن ارتعاشات وجود دارد، ولی تعداد معدودی از این روش‌ها قادرند بدون تماس، میرا کننده ارتعاشات باشند. یکی از این روشها، استفاده از نیروی جریان گردابی است. جریان گردابی در اثر تغییرات میدان مغناطیسی القاء شده در یک رسانا بوجود می‌آید. در این پژوهش نوع فعال و نیمه فعال میراگر جریان‌گردابی ساخته شده و پاسخ ورودی ضربه برای حالتهای مختلف میرایی به طور تجربی و عددی به‌دست آمده است. جهت تحریک تیر آلومینیمی یکسر گیردار، از ضربه جریان گردابی استفاده شده است و سفتی و ضریب میرایی توسط روش کاهش لگاریتمی از روی پاسخ زمانی به‌دست آمده است. پاسخ ضربه در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده، و با نتایج به‌دست آمده مقایسه گردیده است. میرا نمودن ارتعاشات تیر با کاهش در قله های پاسخ فرکانسی خود را نشان می‌دهد. برای به‌دست آوردن پاسخ فرکانسی، در دو قسمت آزمایشهایی انجام شده است. ابتدا توسط آزمایش مودال در حالت نیمه فعال، نتایج نمایانگر کاهش ارتعاشات به میزان ۱۰ دسیبل می‌باشد. برای بررسی حالت فعال، مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده است که نتایج نشان دهنده کاهش قابل توجه دامنه در پیک اول و دوم طیف فرکانسی و نیز افزایش پهنای باند می‌باشد.

کلید واژگان: میراگر جریان گردابی، میراگر فعال، میراگر نیمه فعال، ضربه جریان گردابی، شبیه‌سازی عددی.

Design and Manufacturing Magnetic Damper and Active Control of Beam Vibrations using Eddy current

A. Maddah[1], Y. Hojjat[2*]

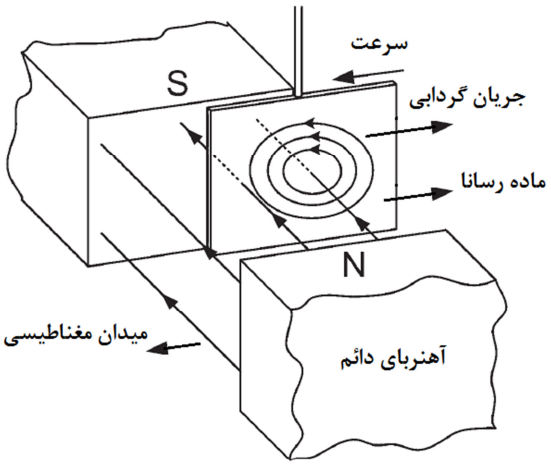
1- ph. D. Student of Mechanical Eng. Dept., Tech. and Eng. Faculty, Tarbiat Modarres Univ.
2- Assoc. Prof. of Mechanical Eng. Dept., Tech. and Eng. Faculty, Tarbiat Modares Univ.
*P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran. yhojjat@modares.ac.ir

Abstract- There is different methods to damp the vibration. However, the numbers of contactless methods are limited. Eddy current dampers are of these procedures. Eddy current is produced in a nonmagnetic conductive material when it is subjected to a time varying magnetic field. In this research, active and semi-active types of eddy current dampers are manufactured and input impulse responses for different damping modes are determined experimentally and numerically. The Aluminium cantilevered beam is stimulated by an eddy current impact. The stiffness and damping coefficient are derived by a reduced logarithmic method according to the time response. The response to impulse is simulated by Simulink of MATLAB and the outcomes are compared with experimental results. Both results show significant decrease in the peak of frequency responses. The results of modal semi-active experiments show the effective suppress of vibration by more than 10 dB. Experiments on the active damper demonstrate a remarkable decrease in the first and second peak of frequency spectrum and increase in bandwidth over previously used eddy current methods.

Keywords: Eddy Current Dampers, Active Dampers, Semi-active Dampers, Eddy Current impact, Numerical Simulation.

۱- مقدمه

عنصر فنری، بازگشتی متناسب با جابه‌جایی تولید می‌کند، که می‌تواند به‌صورت رفت و برگشتی یا فشاری باشد، از طرف دیگر عنصر میرایی از سرعت نسبی در امتداد خودش جلوگیری می‌کند. یک روش ساده برای رسیدن به میرایی، استفاده از یک میرا کننده است که رفتاری مشابه یک جاذب ارتعاشی دارد[۱]. اصول کارکرد یک دمپر جریان گردابی بر اساس اتلاف انرژی بوجود آمده به‌سبب ایجاد جریانهای گردابی در داخل یک رسانا خواهد بود و مانند شکل-۱ شامل یک قسمت رسانا و یک قسمت مغناطیسی مولد میدان مغناطیسی می‌باشد. وقتی قسمت رسانا در میدان مغناطیسی حرکت می‌کند در داخل رسانا جریان گردابی ایجاد شده که خود این جریان‌ها تولید میدان مغناطیسی کرده و در واکنش به میدان اصلی بنا بر قانون لنز ایجاد نیروی دافعه‌ایی می‌کند که در میراگرهای جریان‌گردابی همان نیروی میرا کننده ارتعاشات می‌باشد. این موضوع باعث می‌شود که دامنه ارتعاشات جسم رسانا محدود شده و عبور از فرکانس بحرانی را تضمین نماید.



شکل ۱ مجاورت میدان مغناطیسی با صفحه رسانا [۲]

از میان مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد[۳]: ۱- بدون تماس. ۲- سرعت میرایی بالا. ۳- نیرو می‌تواند در زمان بسیار کوتاهی انتقال یابد (کمتر از ۴ میلی ثانیه) و برای بوجود آوردن یک ضربه بسیار مناسب می‌باشد[۴]. نرخ انتقال انرژی در این روش، در طی اعمال ضربه بالا می‌باشد که با توجه به این ویژگی، بیشترین کاربرد آن در صنعت شکل‌دهی فلزات می‌باشد. ۴- عدم نیاز به گریس، روغن، پمپ، لوله، مخزن و فیلتر. ۵- نیاز به تعمیرات کمتر بدلیل سادگی و نداشتن تماس مکانیکی و در نتیجه طول عمر بالا.

با وجود این، روش مزبور معایبی مانند موارد زیر را دارد: ۱- تنها ارتعاشات مواد هادی (مانند مس و آلومینیم) با این روش میرا می‌شود ۲- حساس بودن نسبت به شکاف‌ها بر روی جسم مرتعش ۳- عمق نفوذ جریان گردابی در رسانا محدود می‌باشد و در طراحی میراگر محدودیت ایجاد می‌کند.

۲- آزمایش‌ها

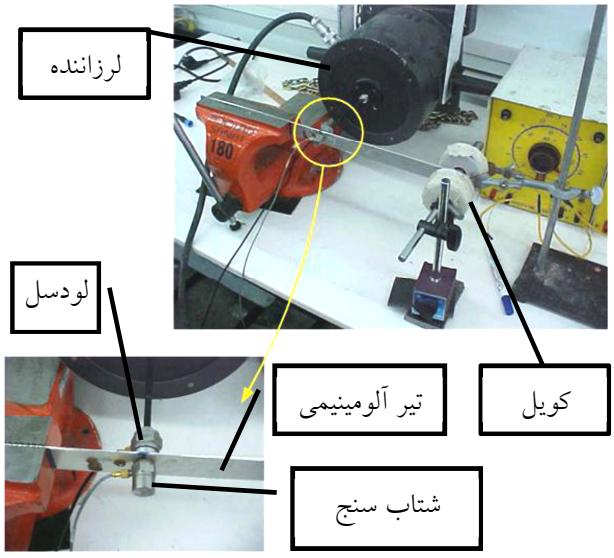
در این مقاله اثر میرایی جریان گردابی در میرا نمودن ارتعاشات تیر یکسر گیردار بررسی می‌شود. دمپر جریان گردابی در حالتهای غیر فعال و نیمه فعال بررسی شده است. بدلیل تاثیر نویز در سیگنال تجهیزات اندازه گیری آزمایشگاه مودال، در این تحقیق آزمایشها به دو قسمت تقسیم می‌شود.

قسمت اول آزمایش‌های مربوط به میراگر جریان‌گردابی نوع نیمه فعال است که در آزمایشگاه مودال بررسی می‌شود. در این قسمت میرا نمودن ارتعاشات تیر خود را با کاهش در قله‌های پاسخ فرکانسی نشان می‌دهدکه از مقایسه پاسخ فرکانسی سیستم در حالتهای بدون میرایی و با میرایی، میزان میرایی ارتعاشات تیر به‌دست می‌آید.

قسمت دوم آزمایش‌ها مربوط به نوع فعال میراگر جریان-گردابی می‌باشد و توسط مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده انجام می‌گردد. جهت کنترل نیروی تحریک ضربه، مجموعه تولید پالس جریانی و نیز چکش مغناطیسی که شامل سیم‌پیچ نوع تخت می‌باشد، طراحی و ساخته شده است. پاسخ زمانی بوسیله سنسور جابه‌جایی و مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال در نرم‌افزار متلب تبدیل به سیگنال کنترلی می‌گردد و از یک تقویت‌کننده برای تقویت ولتاژ کنترلی استفاده شده است. پاسخ زمانی تحریک ضربه، در نرم‌افزار متلب به‌دست آمده و ضریب میرایی به روش کاهش لگاریتمی محاسبه می‌گردد. با استفاده از ابزار محاسباتی نرم‌افزار متلب و با قرار دادن پارامترها دینامیکی در تابع تبدیل سیستم درجه دو، پاسخ‌فرکانسی نیز به‌دست آمده است. برای به‌دست آوردن میزان میرایی در فرکانسهای مختلف از ابزار FFT نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

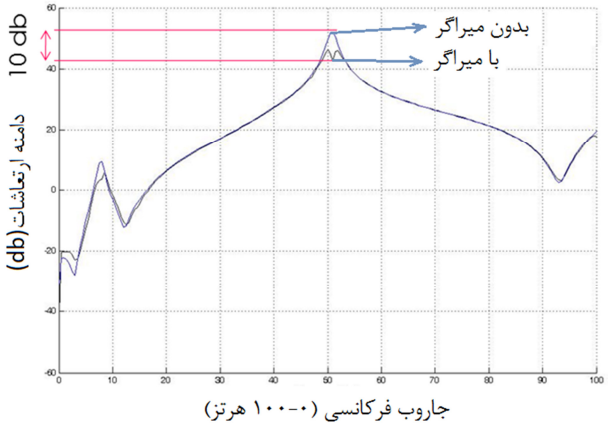
۳- بررسی میراگر نیمه فعال

تیر آلومینیومی استفاده شده، ۵۰ گرم وزن دارد که وزن آن در مقایسه با گیره چدنی ناچیز است. برای بررسی میراگر جریان‌گردابی نیمه فعال، طول تیر آلومینیومی به‌صورتی انتخاب شده است که یکی از فرکانسهای طبیعی آن با فرکانس برق شهری منطبق باشد. با تکرار آزمایش مودال و تغییر طول تیر ، فرکانس طبیعی قالب در فرکانس ۵۰ هرتز خود را در نمودار FRF نشان می‌دهد. همانطور که در شکل-۲ مشخص است از یک لرزاننده برای تحریک تیر و از یک نیروسنج برای اندازه‌گیری نیروی تحریک و از یک شتاب‌سنج جهت به‌دست‌آوردن پاسخ سیستم استفاده شده است. برای بالا بردن تکرار پذیری آزمایش، لرزاننده توسط نگهدارنده‌ای که به جرثقیل سقفی متصل است از روی میز آزمایش بالا آورده شده و لرزش میز تاثیری بر ارتعاش تیر ندارد. نیروی اعمال شده توسط آمپلیفایر به مقدار ناچیزی تنظیم می‌گردد تا کمترین جابه‌جایی انتهای تیر در مود اول ارتعاشی مشاهده شود. با این عمل پارامترهای غیرخطی سیستم حذف خواهد شد. میراگر نیمه فعال هیچ کنترلی بر پاسخ سیستم نداشته و در انتهای تیر یکسرگیردار بر روی پایه نصب می‌گردد.



شکل ۲ چیدمان مجموعه آزمایشگاهی مودال

بوسیله یک منبع تغذیه ولتاژ متغیر، برق شهری ۲۲۰ ولت با فرکانس ۵۰ هرتز به ولتاژ متناوب ۳۰ ولت تبدیل شده و میراگر جریان گردابی را تغذیه می‌کند. مقاومت سیم‌پیچ عملگر ۱۰ اهم می‌باشد و سبب بوجود آمدن جریان متناوب در سیم‌پیچ می‌شود که بیشترین مقدار آن ۳ آمپر می‌باشد. افزایش جریان عبوری متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز سبب بالا رفتن دانسیته جریان‌گردابی در تیر شده و افزایش نیروی میراگر را باعث می‌گردد. در این آزمایش تاثیر فرکانس میراگر بر روی کاهش دامنه بررسی می‌گردد. آزمایش در حالت‌های بدون میرایی و با میرایی انجام گرفته و پاسخ سیستم به ازاء تحریک سینوسی و جاروب فرکانسی ۰ تا ۱۰۰ هرتز به‌صورت نمودار FRF طبق شکل-۳ به‌دست آمده است.



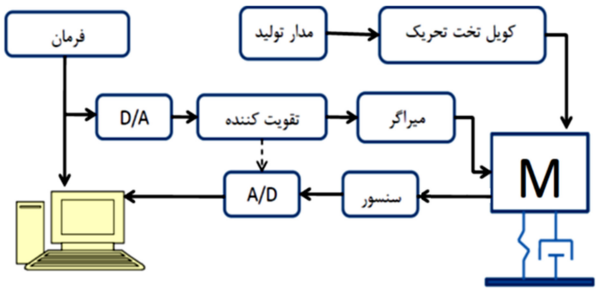
شکل ۳ مقایسه نمودارهای FRF

در این آزمایش مشخص گردید، میراگر در فرکانس ۵۰ هرتز بیشترین کاهش دامنه را به‌همراه داشته است و در فرکانس‌های بالاتر از ۵۰ هرتز نیروی میرایی کاهش داشته و بیشترانرژی تولید شده توسط جریانهای‌گردابی، به‌صورت گرما مستهلک می‌گردد.

۴- بررسی میراگر فعال

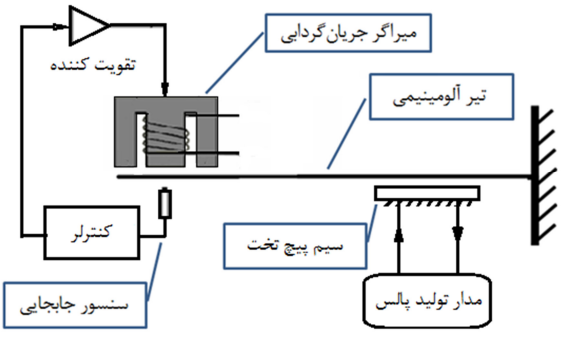
اصطلاح فعال[1] نشان‌دهنده این واقعیت است که این‌گونه از سیستم‌ها نیاز به منبع قدرت خارجی دارند[۴]. نحوه اتصالهای

قسمت‌های مختلف در شکل-۴ مشخص گردیده است. مرکز یا هسته یک کنترل کننده فعال ارتعاشی، یک سیستم ریزپردازنده با مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال می‌باشد.



شکل ۴ نحوه اتصالهای قسمت‌های مختلف

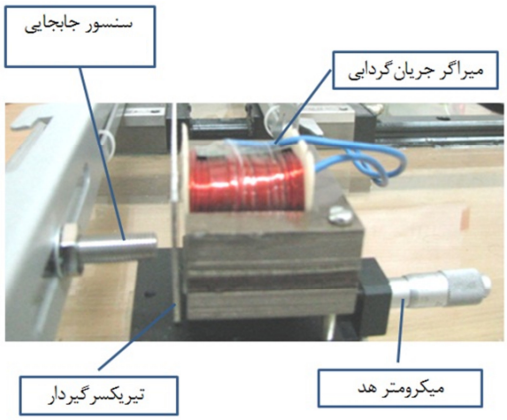
مجموعه آزمایش شامل یک میز شیشه‌ای با پایه‌های قابل تنظیم می‌باشد که توسط گیره قابل تنظیم نصب شده بر روی آن، تیر به‌صورت یکسر گیر دار در موقعیت مشخص قرار می‌گیرد. عضوهای دیگری نیز در مجموعه آزمایش در رابطه با این تیر وجود دارد. اول کویل تخت جهت اعمال ضربه جریان گردابی (تحریک ضربه تیر). دوم کویل میراگر جریان گردابی و سومسنسور جابه‌جایی که بر روی پایه قابل تنظیم همانند شکل-۵ مشخص شده است. جهت تنظیم فاصله تیر و کویل از میز مینیاتوری موقعیت‌دهی دقیق استفاده شده است همانند شکل-۶ استفاده شده است.



شکل ۵ چیدمان اجزاء آزمایش

وظیفه عملگر ضربه جریان گردابی، تحریک طیف فرکانسی سازه می‌باشد. فرمان پیشنهادی که همان نقطه مرجع یا نقطه پایداری سیستم می‌باشد که به‌صورت ولتاژ در کامپیوتر مشخص می‌شود. این معیار با اندازه ولتاژ خروجی سنسور مقایسه می‌گردد. بعد از تحریک ضربه، سیگنال خروجی سنسور به کامپیوتر ارسال شده و توسط کنترلر طراحی شده در نرم افزار متلب، تبدیل به سیگنالی کنترلی می‌گردد. سیگنال کنترلی توسط مدارهای تقویت‌کننده به عملگر تولیدکننده میدان مغناطیسی متغییر تحویل داده می‌شود و سیگنال متناسب با آن جهت میرا نمودن ارتعاشات به میراگر فرستاده می‌شود و سپس دانسیته جریان گردابی در محل اعمال نیروی میرایی تغییر می‌کند. دانسیته جریان گردابی با تغییر دامنه و فرکانس جریان عبوری از کویل تغییر می‌کند که متناسب با آن نیروی میرایی به تیر یکسر گیردار اعمال می‌شود.

سنسور القایی استفاده شده در این قسمت از آزمایش‌ها، می‌تواند فواصل ۰ تا ۴ میلیمتر را اندازه‌گیری کند و خروجی آن ولتاژی بین ۰ تا ۱۰ ولت می‌باشد. نمودار خروجی این سنسورها غیرخطی می‌باشد و باید یک ناحیه خطی مناسب برای اندازه‌گیری، انتخاب گردد.

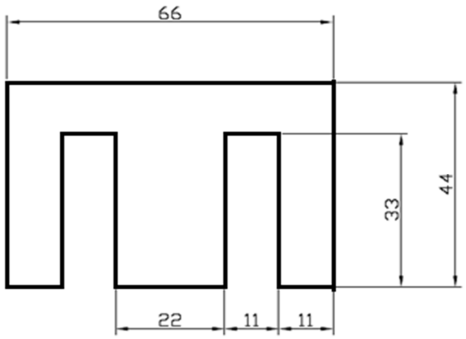


شکل ۶ مجموعه آزمایشگاهی

بهترین فاصله سنسور از تیر مرتعش که در آن سنسور به‌صورت خطی عمل کند، فاصله ۲ میلیمتر است. به همین جهت فاصله سنسور از تیر به گونه‌ای انتخاب شده است که در حالتی که تیر در وسط قرار می‌گیرد خروجی سنسور، ۵ ولت را نشان دهد. خروجی این سنسورها به ازای هر میکرومتر

تغییرات در فاصله، به مقدار ۰/۰۰۲۵ ولت تغییر می‌کند. مبدل دیجیتال به آنالوگ انتخاب شده باید قادر باشد که این تغییرات ولتاژ را بخواند که برای این منظور از شماره محصول ۱۷۱۶ تولید شده توسط شرکت Advantech استفاده شده است.

انتخاب مناسب تعداد دورها و قطر سیم برای سیم پیچ، به نحوی است که میراگر بتواند نیروی دافعه مغناطیسی کافی را با عبور جریانی کمتر از جریان مجازاعمال نماید. سیم‌پیچ استفاده شده در این سیستم، یک سیم‌پیچ E شکل است. دور سیم پیچ ۲۰۰ دور است و قطر سیم برابر با ۰/۶۵ میلی‌متر انتخاب شده است. مقاومت سیم پیچ نیز برابر ۱۰ اهم می‌باشد. هسته E شکل از جنس آهن سیلیسیم دار می‌باشد که جهت جلوگیری از بروز جریان گردابه‌ای به‌صورت لایه-لایه و از ورق با پوشش عایق انتخاب شده است. جریان مجاز حداکثر جریانی است که می تواند بدون آسیب زدن به سیم و گرم کردن بیش از حد سیم پیچ از سیم عبور نماید که مقدار آن برابر ۳ آمپر است.



شکل ۷ ابعاد هسته بر حسب میلی‌متر

با توجه به ابعاد استاندارد هسته در شکل-۷، می توان سطح مقطعی را که سیم پیچی می‌شود را به‌صورت زیر محاسبه نمود.

سطح مقطع سیم‌پیچ برابر است با: $11\times33=363mm^2$

لذا جریان مجاز برابر است با: $\frac{(11\times33)\times3}{200}=5.445A$

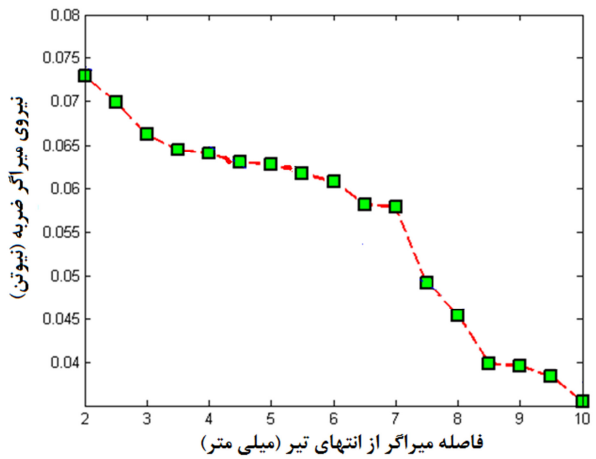
عدد ۲۰۰ در مخرج کسر نشانگر تعداد دورهای سیم پیچ است. نیروی بوجود آمده در اثر تشکیل جریانهای گردابی[۵] به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{F}{l}=\frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \qquad (۱)$$

در معادله-۱، طول سیم پیچ را با l و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلاء را با μ_0 نشان می‌توان و I_1, I_2 جریانهای بوجود آمده در تیر و کویل می‌باشند که به‌دست آوردن آن کار مشکلی است زیرا جریان مستهلک شده در رسانا را نمی‌توان به‌دست آورد. در این مقاله نیرو میراگر فعال جریان گردابی به روش استاتیکی محاسبه شده است. نیروی میراگر جریان گردابی در حالتی که تیر در وضعیت پایداری خود قرار دارد بسیار ناچیز است و برای مشاهده نیروی میرایی می‌بایست تیر از وضعیت تعادل خود خارج گردد که توسط ضربه جریان‌گردابی تیر مرتعش می‌گردد. ضربه با دشارژ شدن بانک خازنی به میزان ۷۰ ولت توسط سیم‌پیچ تخت ایجاد می‌گردد.

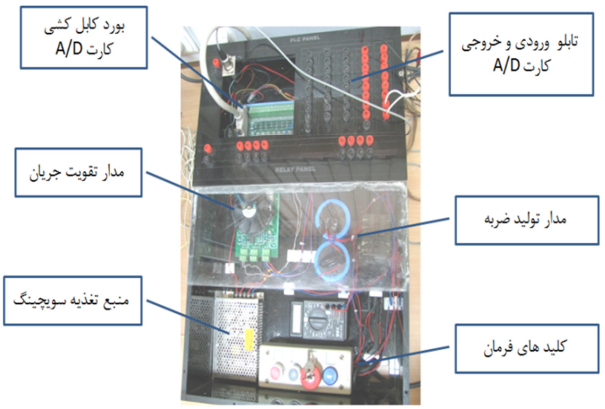
میز موقعیت‌دهی دقیق را طوری تنظیم می‌کنیم که سیم‌پیچ در فاصله ۱ میلی‌متری از تیر قرار بگیرد. سیم‌پیچ هر بار به اندازه ۱ میلی‌متر از تیر دور می‌شود و به ازاء تحریک ضربه‌ای ثابت و با دامنه‌های یکسان، جابه‌جایی انتهایی تیر در هر تغیر فاصله، توسط سنسور القایی اندازه‌گیری می‌شود که بیشترین مقدار جابه‌جایی در انتهای تیر مشخص می‌گردد. با توجه به روابط مقاومت مصالح تیر یکسرگیردار، نیرو از معادله-۲ محاسبه می‌گردد و منحنی نیروی میراگر جریان‌گردابی فعال بر حسب بیشترین مقدار جابه‌جایی تیر محاسبه می‌گردد (شکل-۸).

$$F_{max}=\frac{3EI}{L^3}*X_{max}(N) \qquad (۲)$$



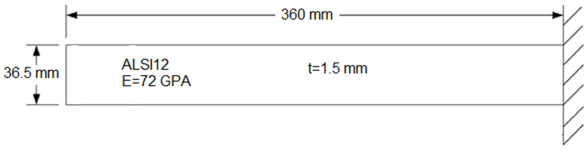
شکل ۸ نیروی میراگر ضربه

برای اعمال ضربه در این آزمایش از یک منبع تولید پالس جریانی با دو عدد خازن موازی ولتاژ بالا (۳۵۰ ولت ، μF ۱۵۰۰) استفاده شده است. یک پل دیود، برق متناوب شهری را به جریان مستقیم تبدیل می‌کند. با قرار دادن یک مدار فرمان و تحریک رله قدرتی دو سر خازن‌ها در سیم‌پیچ تخت دشارژ می‌شود که جریانی حدود ۳۰ آمپر به‌طور لحظه ایی از سیم‌پیچ تخت عبور می کند. این جریان باعث ایجاد یک پالس مغناطیسی در اطراف سیم‌پیچ تخت می‌شود. نرخ تغییرات میدان مغناطیسی بسیار بالا بوده و باعث ایجاد ضربه جریان‌گردابی به تیر آلومینیمی می‌شود.



شکل ۹ پانل کنترلی

ضریب میرایی پارامتری است که معمولا محاسبه و تخمین آن بسیار مشکل است. سفتی و جرم توسط آزمایشهای استاتیکی تعیین می‌شوند اما اندازه گیری میرایی نیاز به آزمایشهای دینامیکی دارد. حال اگر سیستمی داشته باشیم که امکان انجام آزمایش دینامیکی نیز روی آن امکان‌پذیر باشد، روش کاهش لگاریتمی روشی مناسب جهت تخمین ضریب میرایی (ζ) است[۶]. طراحی مجموعه آزمایشی به‌طوری است که می توان با تکرارپذیری بالا آزمایش‌هایی جهت به‌دست آوردن ضریب میرایی در پاسخ ضربه انجام داد. تیر توسط گیره قابل تنظیم مقید شده و ضربه جریان‌گردابی توسط سیم‌پیچ تخت در ولتاژ ۶۰ ولت اعمال می‌گردد. با این روش ضربه‌های یکسانی جهت تحریک سیستم به تیر وارد گردید. با استفاده از روش کاهش لگاریتمی، ضریب میرایی برای حالت‌های بدون میرایی و با میرایی به‌دست آمده است. ابعاد تیر در شکل-۷ مشخص شده است.



شکل ۱۰ ابعاد تیر یکسر گیردار

مشخصات تیر آلومینیومی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\rho = ۲۶۵۰ \frac{kg}{m^۳}$$

$$E = ۷۲Gpa = ۷۲*۱۰^۹ pa$$

$$I = \frac{۱}{۱۲} \times (۱.۵ \times ۳۶.۵) \times ۱۰^{-۱۲} = ۱.۰۲۶۵۶E-۱۱$$

$$m = \rho A L = ۰.۰۵۲۲۳Kg$$

با توجه به حل تحلیلی معادله اویلر برنولی منجر به معادله-۳ و معادله-۴ می‌شود که فرکانس‌های طبیعی تیر یکسر گیردار به‌دست می‌آید.

$$\omega = \frac{\gamma}{L^۲}\sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \qquad (۳)$$

ثابت γ نیز ازحل تحلیلی به‌دست می‌آید[۷] که عبارتند از:

$$\gamma_۱ = ۳.۵۱۶ \quad \gamma_۲ = ۲۲.۰۳۴ \quad \gamma_۳ = ۶۱.۷۰۱ \quad \gamma_۴ = ۱۲۰.۹۱$$

با دانستن مقادیر به‌دست آمده از بالا، چهار فرکانس طبیعی اول تیر از معادله-۳ به‌صورت زیر به‌دست آمده است:

$$\omega_۱ = ۱۰.۷۵ \quad \omega_۲ = ۶۵.۰۶ \quad \omega_۳ = ۱۷۵.۳ \quad \omega_۴ = ۲۲۰.۱۱$$

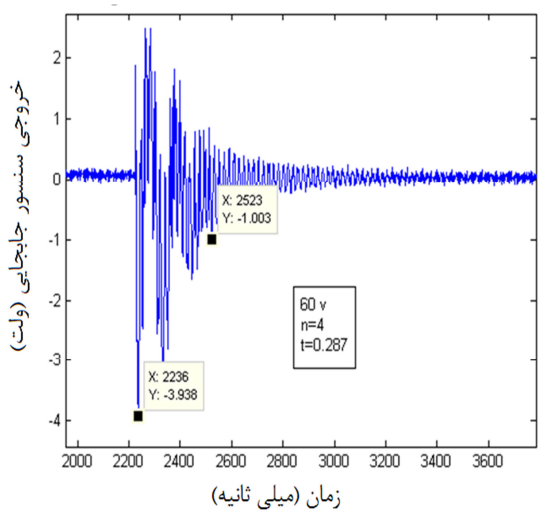
$$f = \frac{\omega}{۲\pi} \qquad (۴)$$

$$f_۱ = ۱.۷۱۱ \quad f_۲ = ۱۰.۳۵۶ \quad f_۳ = ۲۷.۹۰ \quad f_۴ = ۳۵.۰۳۲$$

ضریب کاهش لگاریتمی از روی نمودار پاسخ زمانی به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\delta = \frac{۱}{n} \ln \frac{B_۱}{B_{n+۱}} \qquad (۵)$$

B_1 دامنه پیک اول انتخاب شده است زیرا بلندترین پیک بوده و کمتر در معرض خطا می‌باشد، اما حتما نباید اینگونه باشد و این فرمول می‌تواند برای هر دو سیکل با فاصله n به کار رود. برای به‌دست آوردن ضریب میرایی، ضربه‌ای به تیر وارد کرده و میراگر را به‌صورت کنترل فعال قرار می‌دهیم. پاسخ زمانی تیر در اثر تحریک ضربه جریان‌گردابی به‌صورت شکل-۱۱ به‌دست آمده است.



شکل ۱۱ پاسخ زمانی تیر (ضربه ۶۰ ولت و میراگر فعال)

برای استفاده از روش کاهش لگاریتمی و محاسبه ضریب میرایی، مقدار ولتاژ خروجی سنسور که متناسب با جابه‌جایی انتهای تیر می‌باشد در قله اول تا چهارم در نرم‌افزار متلب به‌دست آمده است. تیر آلومینیمی نازک عوامل اغتشاش همچون فن کامپیوتر و سیستم تهویه متبوع را همانند شکل ۱۱ کاملا نمایان می‌کند. به همین علت برای مشخص کردن مقادیر B_1 و B_{n+1} از نویز های محیطی که بر موج اصلی سوار شده‌اند صرفنظر شده است.

نحوه محاسبه ضریب میرایی:

$$\{n = ٤, t = ۰.۲۸۷\}$$

$$\{B_۱ = ۳.۹۳۸, B_{n+۱} = ۳.٤۰۱, V = ٦۰ volt\}$$

$$\delta = \frac{۱}{n} \ln \frac{B_۱}{B_{n+۱}} = \frac{۱}{٤} \ln \frac{۳.۹۳۸}{۳.٤۰۱} = ۰.۰۳٦٦$$

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{٤\pi^۲ + \delta^۲}} = ۰.۰۰۵۸۲۳$$

$$p = \frac{t}{n} = \frac{۰.۲۸۷}{٤} = ۰.۰٦۹۵ s$$

$$w_d = \frac{۲\pi}{p} = ۹۰.٤۰۵ \frac{rad}{s}$$

$$w_n = \frac{w_d}{\sqrt{۱-\zeta^۲}} = ۹۰.٤۱٤ \frac{rad}{s}$$

$$k = m w_{n^۲} = ٤۲٦.۹٦٤ \frac{N}{m}$$

$$\text{پریود تپش} = \frac{٤\pi}{w_d + w_n} = ۰.۰٦۹٤ \frac{rad}{s}$$

$$\text{پریود ارتعاشات} = \frac{۲\pi}{|\omega_d - \omega_n|} = ٦۹۸.۱۳ \frac{rad}{s}$$

تابع bode شکلی از نمودارهای پاسخ فرکانسی است که از واحد دسیبل برای نشان دادن دامنه ارتعاشات و واحد رادیان بر ثانیه برای نشان دادن محور فرکانسی لگاریتمی استفاده می‌کند. بوسیله نرم‌افزار متلب از تابع تبدیل، جهت انتقال مناسب و اتوماتیک رنج فرکانسی نمودارها، استفاده شده است. شکل-۱۲ نشان دهنده دیاگرام Bode به‌دست

آمده از تابع تبدیل سیستم درجه دو تحت ضربه جریان گردابی می‌باشد. تابع تبدیل سیستم با گرفتن تبدیل لاپلاس از مدل یک درجه آزادی به‌صورت معادله-۶ به‌دست می‌آید[۸].

$$G(s)=\frac{۱}{ms^{۲}+cs+k} \qquad (۶)$$

میراگر جریان‌گردابی از مدار خارج شده و پارامترهای سیستم برای حالت بدون میرایی دوباره به‌دست آمده است. تابع تبدیل سیستم برای حالت بدون میراگر تشکیل شده و توسط نرم‌افزار متلب، نمودار پاسخ فرکانسی آن رسم شده شد.

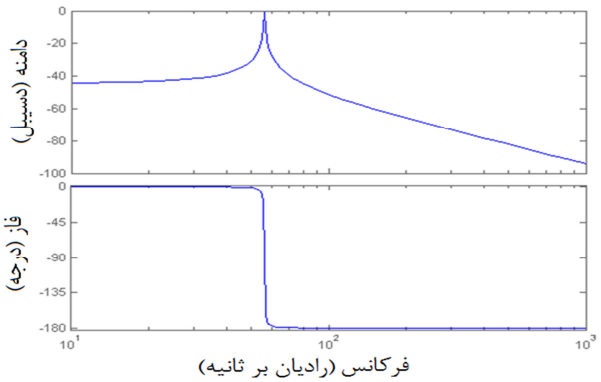
همانطور که در شکل- ۱۲ نمایان است، قله دامنه ارتعاشات کاملا تیز و در نتیجه پهنای باند آن کوچک می‌باشد. پاسخ فرکانسی سیستم، با فعال کردن میراگر همانند حالت قبلی به‌دست آمده و به‌صورت شکل-۱۳ نمایش داده شده است. با بررسی کاهش دامنه ارتعاشات قله‌های پاسخ فرکانسی در حالتهای بدون میرایی و با میرایی می‌تواند مقدار میرایی میراگر نوع فعال را مشخص نماید[۹].

دیاگرامهای *Bode* در حالت‌های با میرایی و بدون میرایی نشان داد که حدود ۱۰ دسیبل کاهش دامنه ارتعاشات بوجود آمده است.

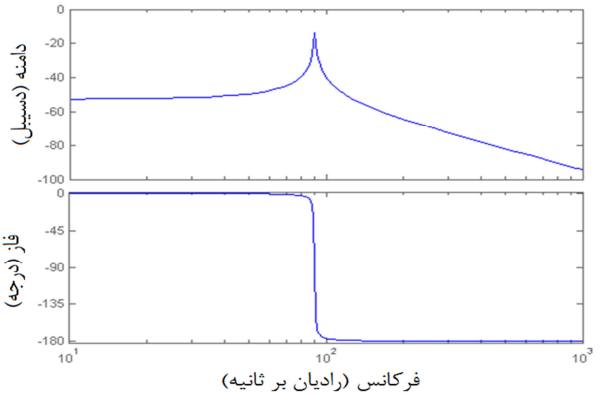
۵- بررسی میراگر فعال در فرکانس‌های مختلف

بررسی اثر میرایی توسط نمودار پاسخ فرکانسی صورت گرفته است. با بکارگیری تبدیل فوریه و گرفتن FFT از پاسخ زمانی سیستم، پاسخ فرکانسی در حالتهای بدون میرایی و با میرایی به‌دست آمده است. فرکانسهای طبیعی در روش حل تحلیلی با دقت بسیار خوبی در نمودار FFT خود را نشان می‌توان.

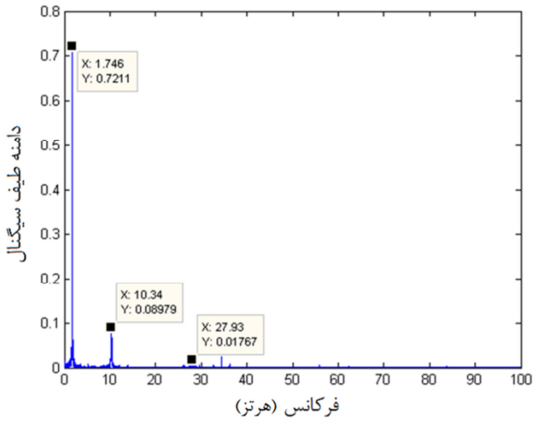
میرا نمودن ارتعاشات در فرکانسهای پایین عموما مشکل‌تر از میرا نمودن ارتعاشات در فرکانسهای بالاست[۱۰]. نمودارهای شکل-۱۴ و شکل-۱۵ نمایانگر دامنه ارتعاشات در فرکانسهای مختلف هستند. تحریک توسط ضربه جریان گردابی باعث تحریک تمامی فرکانسها در تیر می‌شود و توانایی میراگر در میرایی ارتعاشات تیر، با کاهش دادن دامنه قله‌ها در نمودار پاسخ فرکانسی مشخص می‌گردد.



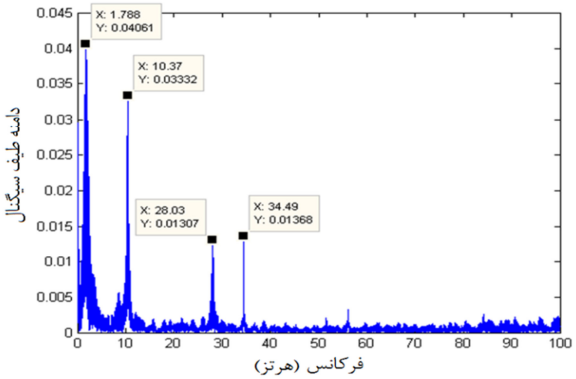
شکل ۱۲ نمودار بود (ضربه ۶۰ ولت، میراگر غیر فعال)



شکل ۱۳ نمودار بود (ضربه ۶۰ ولت، میراگر فعال)



شکل ۱۴ FFT جابه‌جایی (ضربه ۵۰ ولت، میراگرغیر فعال)



شکل ۱۵ FFT جابه‌جایی (ضربه ۵۰ ولت ، میراگر فعال)

۶- شبیه‌سازی پاسخ زمانی ضربه جریان‌گردابی

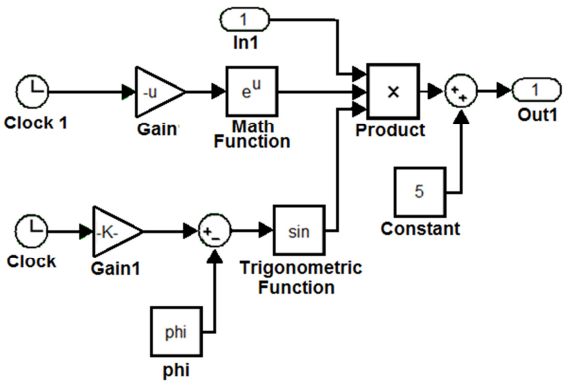
شکل کلی نیروی ضربه به‌صورت تابعی سینوسی و لگاریتمی کاهنده می‌باشد که به‌صورت رابطه زیر در سیمولینک متلب مدل شده است:

$$y(t) = a e^{-\zeta \omega_n t} Sin(\omega_d t)$$ معادله ۷ :

با مشاهده ضربه جریان‌گردابی در اسیلوسکوپ، زمان اعمال ضربه کمتر از۲/۵ میکروثانیه مشخص گردید.

هر ۲/۵ ولت دریافتی از سنسور جابه‌جایی برابر یک میلی‌متر جابه‌جایی در انتهای تیر می‌باشد که در نتیجه ۳/۹۳۸ ولت پیک اول منحنی بالا، نشانگر۱/۵۷۶ میلی‌متر جابه‌جایی انتهای تیرمی‌باشد که این مقدار در معادله-۷ برابر a_0 در نظر گرفته شده است.

ورودی ضربه به‌صورت تابعی سینوسی با کاهش نمایی همانند معادله-۷ در نرم‌افزار متلب مدل شده است. بلوک‌های مورد نظر جهت مدل کردن ضربه ورودی مانند شکل-۱۷ به هم متصل می‌گردند.



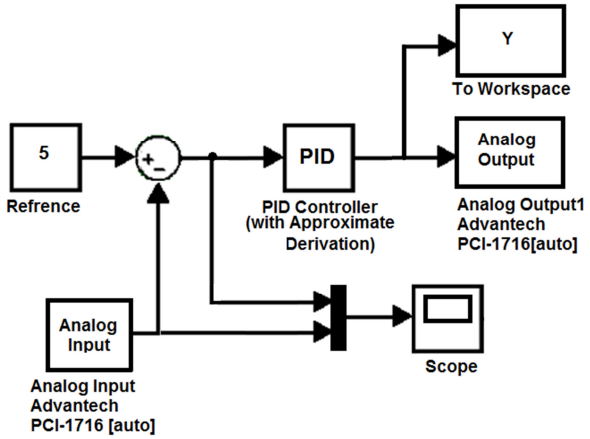
شکل ۱۶ مدل ضربه ورودی به سیستم

نمودار پاسخ زمانی ضربه ورودی به سیستم میراکننده فعال به ازاء تحریک ضربه ۶۰ ولت درشکل-۱۶مشخص شده است.

مقادیر P,D,I با روش سعی و خطا برای به‌دست آوردن پاسخ ضربه جریان گردابی به‌صورت زیر به‌دست آمده است:

P=0.9 I=0.23 D=0.11

قسمتهای مختلف واحد کنترل فعال و نحوه ارتباط آنها با یکدیگر، در شکل-۱۸مشاهده می‌گردد.

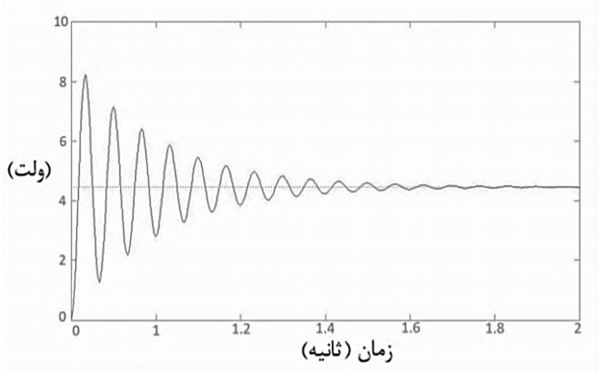


شکل ۱۷ تحقق کنترلر PID در محیط سیمولینک

از روی نمودار پاسخ زمانی ورودی ضربه در حالت ۶۰ ولت دشارژ خازن (شکل-۱۱) ، پارامترهای دینامیکی بوسیله روش کاهش لگاریتمی به‌دست آمده است که در نتیجه، تابع تبدیل سیستم به‌صورت زیر می‌گردد:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{۱}{۰.۰۵۲۲۳s^{۲} + ۰.۰۵۴۹s + ٤٢٦.٩٦٤}$$

با توجه به شکل-۱۸ مشاهده می‌شود که به ازاء ورودی ضربه جریان‌گردابی مدل شده در نرم‌افزار متلب، پاسخ سیستم میرا به‌دست آمده است.



شکل ۱۸ شبیه‌سازی پاسخ زمانی تیر (میراگر فعال)

۷- نتیجه‌گیری

کاهش دامنه ارتعاشات میراگر جریان‌گردابی در حالت نیمه فعال در فرکانس ۵۰ هرتز محسوس است و پهنای باند در نمودار پاسخ فرکانسی با فعال کردن میراگر افزایش داشته است. بررسی میراگر جریان‌گردابی در حالت فعال نشان داد که در پاسخ ضربه ۵۰ ولت، کاهش دامنه ارتعاشات در طیف فرکانسی به‌صورتی است که میزان دامنه ارتعاشات در قله اول طیف فرکانسی در حالت بدون میرایی ۱۸ برابر حالت میرایی و در قله دوم طیف فرکانسی در حالت بدون میرایی ۲/۴۲ برابر حالت میرایی می‌باشد. در قله سوم طیف فرکانسی میراگر معکوس عمل کرده و دامنه ارتعاشات در حالت میرایی ۳ برابرحالت بدون میرایی شده است. میراگر جریان‌گردابی نوع فعال در فرکانسهای پایین، کاهش قابل توجه دامنه ارتعاشات را به همراه داشته است. پیشنهاد می‌شود با طراحی کنترلر مناسب، میرایی در فرکانسهای بالاتر نیز حاصل گردد.

۸- سپاسگزاری

مولفان بدینوسیله از همکاریهای آزمایشگاه مودال دانشگاه سمنان و جناب آقای دکتر آشوری تشکر می‌نمایند.

۹- منابع

[1] Sodano, H. A., Bae, J. S., Inman, D. J., and Belvin, W. K, Concept and Model of Eddy Current Damper for Vibration Suppression of a Beam, J.Sound Vib, Vol.74, 2004; pp 560-580

[2] phD thesis, Jianhuishang M.S, electro magnetically Assisted Sheet Metal Staming, Ohaio State University, 2006; Vol.62, pp 305-320

[3] phD thesis, Sodano, Deveolopment of Novel Eddy Current Damping Mechanisms for the Suppression of Structural Vibrations, Virgina Tech University, 2005; pp 50-80.

[4] Babak Ebrahimi, Permanent magnet configuration in design of an eddy current damper, Technical paper, 2008; pp 1-4

[5] Sodano, Improved Concept and Model of Eddy Current Damper,J.Sound Vib, Vol.86, 2004; pp 163-170.

[۶] ارتعاشات مکانیکی، ویلیم‌جی‌پالم، ترجمه دکتر انوشیروان فرشیدیان‌فر، جلد دوم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۸، ص ص ۳۶۱-۳۵۳.

[۷] ارتعاشات مکانیکی، ویلیم‌جی‌پالم، ترجمه دکتر انوشیروان فرشیدیان‌فر، جلد اول، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۸، ص ص ۲۷۶-۲۰۵.

[۸] مهندسی کنترل، کاتسوهیکو اگاتا، ترجمه محمود دیانی، ویراست چهارم، ۱۳۸۳، ص ص ۱۶۸-۱۶۱ www.ndtuk.com

[9] C.M.Harris and A.G.Piersol, eds., Shock and Vibration Handbook, McGraw-Hill, New York,2002; pp 430-478

[10] E.L. Bruno, ed. High Velocity Forming of Metals, Revised Edition ., ASTM; 1978.pp 65-70

[11] Sodano, H, Non-Contact Eddy Current Excitation Method for Vibration Testing. J.Sound Vib Vol.83, 2006; pp 83-86.

[12] W.Palm, Analysis and Control of Dynamics Systems, john Wiley & Sons, New York, 2000; pp 300-320