

شتابسنج

(ادامه)

bnaseripoor@yahoo.com

بهرام ناصری پور



در شماره‌ی قبل به معرفی انواع مدل‌های شتابسنج و اصول کارکرد و کاربردهای آنها پرداختیم. در این شماره برآنیم تا به تشریح مشخصه‌های فنی موثر در انتخاب مدل مناسب شتابسنج و روش‌های کالیبراسیون شتابسنج‌ها بپردازیم. با توجه به عمومیت مصرف شتابسنج‌های پیزوالکتریک، تمرکز این بخش بر این نوع از شتابسنج‌ها قرار گرفته است هر چند که مسایل مطرح شده برای انواع شتابسنج‌ها می‌تواند صادق باشد.

شتاب در سیستم‌های اندازه‌گیری ۵ ولت می‌باشد بنابراین تقسیم عدد ۵۰۰۰ میلی‌ولت بر حداکثر شتاب مورد اندازه‌گیری بر حسب g، محدوده‌ی گسترده‌ی حساسیت مناسب برای انتخاب شتابسنج بر حسب mv/g نمایش می‌دهد.

تقریباً تمام شتابسنج‌ها با یک گواهی کالیبراسیون که حساسیت دقیق شتابسنج به همراه محدودیت‌های عدم قطعیت اندازه‌گیری در آن ذکر شده است، ارائه می‌شوند.

در هنگام بررسی پاسخ فرکانسی شتابسنج، حساسیت نامی آن به عنوان حساسیت مرجع ذکر می‌شود و در هنگام بررسی حساسیت عرضی شتابسنج، حساسیت نامی آن به عنوان حساسیت محوری نامیده می‌شود.

با وجود عوامل موثر بر حساسیت، این عدد به عنوان حساسیت سنسور در سیگنال‌اندیشی یا سیستم داده برداری برای تعریف و اندازه‌گیری سیگنال ورودی شتاب از سنسور به کار می‌رود.

در بعضی از مدل‌های شتابسنج یک حافظه‌ی قابل برنامه‌ریزی وجود دارد که امکان ذخیره‌سازی اطلاعات سازنده، مشخصات سنسور، حساسیت و کالیبراسیون را دارا می‌باشد که به آن مشخصه‌ی فنی الکترونیک سنسور یا TEDS گفته می‌شود. این نوع از شتابسنج‌ها در صورتی که به سیستم داده‌برداری یا کاندیشنر دارای قابلیت TEDS وصل شوند علاوه بر امکان ارتباط آنالوگ جهت خواندن اطلاعات شتاب، امکان برقراری ارتباط دیجیتال و خواندن اطلاعات فنی سنسور را دارا می‌باشند. در این صورت دیگر نیاز به تعریف حساسیت سنسور برای سیستم واسط نمی‌باشد.

جرم و سائز شتابسنج

وزن و سائز شتابسنج در بسیاری از کاربردها اهمیت بالایی دارند و هر چه وزن و سائز آن کمتر باشد اثرش بر روی پاسخ ارتعاش محل آزمون و در نتیجه اندازه‌گیری ارتعاش کمتر خواهد شد. در مورد قطعات و سازه‌های سبک و کوچک این مسئله اهمیت بیشتری می‌یابد ولی کاهش وزن و سائز معمولاً منجر به کاهش حساسیت خروجی شتابسنج و همینطور افزایش قیمت آن می‌شود. معمولاً بهتر است وزن شتابسنج کمتر از یک دهم وزن محل نصب آن باشد.

پاسخ فرکانسی^۴

پاسخ فرکانسی شتابسنج تغییرات حساسیت آن را در کل بازه‌ی فرکانسی کارکرد آن نشان می‌دهد. این پاسخ عموماً پاسخ فرکانسی دامنه می‌باشد و پاسخ فرکانسی فاز به ندرت ارائه می‌شود. تغییرات حساسیت با درصد یا دسیبل (dB) نسبت به حساسیت مرجع و فرکانس مرجع نمایش داده می‌شود.

از پاسخ فرکانسی می‌توان تفرانس شتابسنج در طول بازه‌ی کاری مورد نظر را محاسبه نمود و حساسیت شتابسنج در یک فرکانس خاص را

3. Transducer Electronic Data Sheet

4. Frequency Response

شاخص‌های مهم در انتخاب یک شتابسنج

یکی از دشوارترین جنبه‌های انتخاب یک شتابسنج، فهم و تفسیر مشخصه‌های فنی^۱ آن است. اغلب کارشناسان الزامات آزمون یا شتاب، سرعت و جابجایی محل اندازه‌گیری را به خوبی می‌دانند ولی تطبیق این الزامات با شتابسنج‌های موجود برای آنها دشوار می‌باشد. لذا در این بخش به شرح شاخص‌های معرفی شده در مشخصه‌های فنی شتابسنج‌ها می‌پردازیم.

حساسیت^۲

حساسیت یک شتابسنج نسبت خروجی الکتریکی سنسور به ورودی مکانیکی آن می‌باشد.

حساسیت معمولاً بر اساس mV/g ، $mV/(m/s^2)$ ، pc/g ، $pc/(m/s^2)$ تعریف می‌شود و فقط در یک فرکانس اعتبار قطعی دارد (معمولاً در ۱۰۰ یا ۱۶۰ هرتز توسط سازنده یا مرکز کالیبراسیون اندازه‌گیری و ثبت می‌شود).

از طرف دیگر چون شتابسنج‌ها به دما نیز حساس می‌باشند این عدد در یک بازه‌ی دمایی خاص، برای مثال $25 \pm 5^\circ C$ اندازه‌گیری می‌شود. علاوه بر این فقط برای یک شتاب (معمولاً ۵ g یا ۱۰ g) معتبر می‌باشد.

گاهی اوقات حساسیت با یک تفرانس، معمولاً ۵ یا ۱۰ درصد مشخص می‌شود. این تضمین می‌دهد که تغییرات حساسیت نسبت به حساسیت نامی شتابسنج در این ناحیه‌ی تفرانس خواهد بود.

این شاخص مهم‌ترین مشخصه در انتخاب شتابسنج می‌باشد و باید سعی گردد تا با توجه به حداکثر شتاب مورد اندازه‌گیری، حساسیت مناسب انتخاب گردد. برای شتاب‌های خیلی بالا لازم است از حساسیت پایین و برای شتاب‌های خیلی کم از حساسیت بالا استفاده گردد تا از یک طرف سیگنال به نویز مناسبی داشته باشیم و از طرف دیگر سیگنال شتاب برش خورده نگردد. معمولاً حداکثر ولتاژ سیگنال



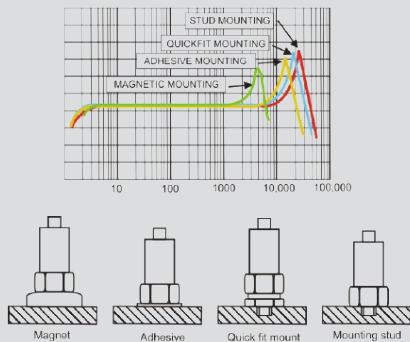
2. Sensitivity

فرکانس رزونانس نصب شده^۷

فرکانسی می‌باشد که بالاترین حساسیت را در منحنی پاسخ فرکانسی شتاب‌سنج داراست و برحسب Hz بیان می‌شود و ناشی از رزونانس طبیعی سازه‌ی مکانیکی بدنه‌ی شتاب‌سنج می‌باشد. فرکانس رزونانس شتاب‌سنج در حالتی که به عنوان یک سازه‌ی آزاد بررسی شود متفاوت می‌باشد ولی به لحاظ کاربرد در اندازه‌گیری ارتعاش، فرکانس رزونانس شتاب‌سنج به صورت نصب شده، مهم می‌باشد. این فرکانس حداقل فرکانسی است که سازنده تضمین می‌نماید قبل از آن رزونانسی رخ نمی‌دهد و حد بالای پاسخ فرکانسی شتاب‌سنج را تعیین می‌کند. در شتاب‌سنج‌های پیزوالکتریک دامنه‌ی فرکانس رزونانس بسیار زیاد است. البته واضح است که خروجی شتاب‌سنج در اطراف فرکانس رزونانس بسیار زیاد و غیر واقعی می‌باشد.

سازندگان سعی می‌کنند فرکانس رزونانس را تا حد امکان بالا ببرند و خارج از ناحیه‌ی کاری فرکانس مورد نیاز مشتری قرار دهند. شما نیز باید در انتخاب شتاب‌سنج یا بازه‌ی اندازه‌گیری ارتعاش، سعی نمایید محدوده‌ی اندازه‌گیری خود را نزدیک به فرکانس رزونانس قرار ندهید. سازندگان در اندازه‌گیری این شاخص، شتاب‌سنج را در شرایط ایده‌آل نصب می‌کنند ولی اگر شما به طور صحیح شتاب‌سنج را نصب نکنید سختی^۸ آن کم و میرایی^۹ آن زیاد می‌شود و در نتیجه ضریب کیفیت مکانیکی^{۱۰} کم می‌شود و فرکانس رزونانس کاهش و دامنه‌ی رزونانس افزایش می‌یابد و در نتیجه بر پاسخ فرکانسی اثر می‌گذارد. فرکانس رزونانس نصب شده وابسته به سختی نصب می‌باشد. روش نصب سنسورهای شتاب به کمک موم زنبور عسل^{۱۱}، چسب دو طرفه، چسب قطره‌ای یا پیچ و مهره می‌باشد. نصب با پایه مغناطیسی دارای کمترین سختی نصب و نصب با پیچ و مطابق با گشتاور مشخص توسط سازنده بر روی سطح صاف سخت، بالاترین سختی نصب را دارد.

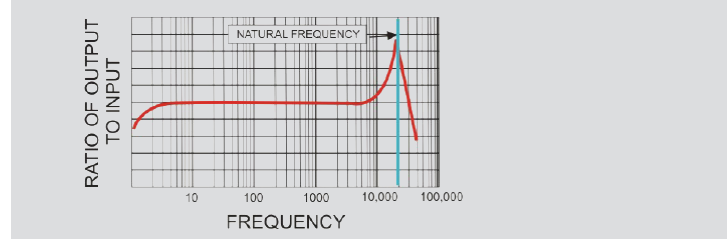
در هنگام نصب باید مطمئن باشید که رزوه‌ی اضافه‌ی پیچ، بین شتاب‌سنج و سطح نصب باقی نماند؛ یعنی تمام رزوه‌ی مورد نیاز در شتاب‌سنج پیچیده شده باشد و الباقی رزوه همگی در محل نصب بسته شده باشد تا به بالاترین فرکانس ممکن برسید.



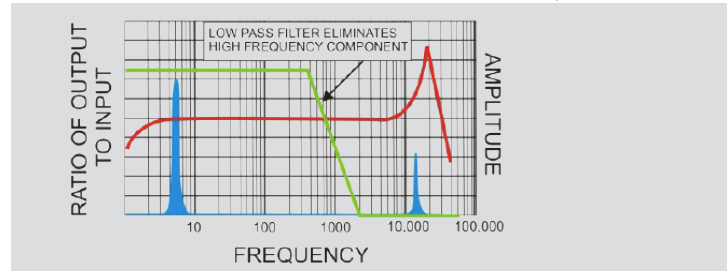
نویز ارتعاش کابل

در شتاب‌سنج‌های خروجی شارژ، با حرکت و ارتعاش کابل شتاب‌سنج در محل نصب، بر اثر پدیده تریبولکتریک^{۱۲}، سیگنال ناخواسته‌ای در خروجی تولید می‌شود که برای حذف آن لازم است کابل در نزدیکی شتاب‌سنج بوسیله چسب یا بست^{۱۳} مهار شود تا ارتعاش نداشته باشد.

7. Mounted Resonant Frequency
8. Stiffness
9. Damping
10. Quality Factor (Q)
11. Bees Wax
12. Tribo-Electric Effect
13. Clamp

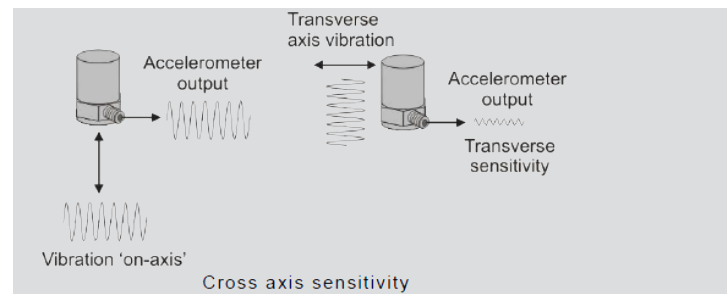


معمولاً بازه‌ی کاری شتاب‌سنج در فرکانس‌های کمتر از نصف یا دو سوم فرکانس رزونانس می‌باشد. بنابراین باید در انتخاب شتاب‌سنج به این مسئله دقت نمود. در حین کار نیز می‌توان از یک فیلتر الکتریکی یا مکانیکی برای حذف فرکانس‌های نزدیک به فرکانس رزونانس استفاده نمود.



حساسیت عرضی^۵

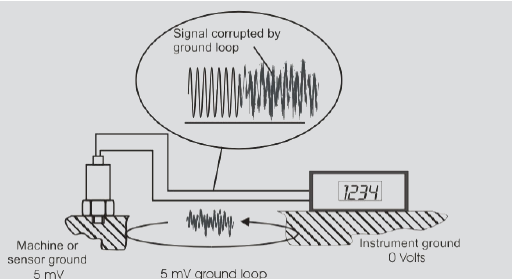
حساسیت عرضی، حساسیت شتاب‌سنج در حالتی می‌باشد که بصورت ۹۰ درجه نسبت به محور ارتعاش نصب شده باشد و با درصد نسبت به حساسیت سنسور نمایش داده می‌شود. حالت ایده‌آل آن ۰٪ می‌باشد. این میزان به حدود ۵٪ هم می‌تواند برسد. در صورت مهم بودن این شاخص برای کاربرد خاص، می‌توان موارد بهتر پیدا جستجو کرده و سفارش داد. قیمت این نوع از شتاب‌سنج‌ها بسیار بالا می‌باشد. حساسیت عرضی گاهی حساسیت عمود بر محور نیز نامیده می‌شود. این شاخص به این دلیل اهمیت دارد که شما می‌خواهید مطمئن باشید خروجی دریافتی از شتاب‌سنج شما فقط مربوط به ارتعاشات در محوری است که شتاب‌سنج را نصب کرده‌اید، در غیر این صورت تحلیل اطلاعات بسیار مشکل خواهد بود.



شتاب‌سنج‌های سه محوره برای اندازه‌گیری ارتعاش در سه محور عمود برهم در یک نقطه وجود دارند.

در هنگام کالیبراسیون سنسور ارتعاش، معمولاً تجهیزات ارتعاشی (Shakers) کالیبراسیون بنحوی ساخته می‌شوند که حرکت‌های جانبی بسیار کمی داشته باشند و ارتعاش تقریباً فقط در یک محور ایجاد می‌شود لذا حساسیت اندازه‌گیری شده فقط ناشی از ارتعاش در محور شتاب‌سنج می‌باشد. ولی در آزمون‌ها و سازه‌های واقعی، ارتعاش در تمامی جهات وجود دارد و همین امر باعث اهمیت بیشتر حداقل بودن حساسیت عرضی می‌شود. به هر حال مشارکت سیگنال ناشی از حساسیت عرضی را می‌توان به عنوان یک نویز در اندازه‌گیری لحاظ نمود.

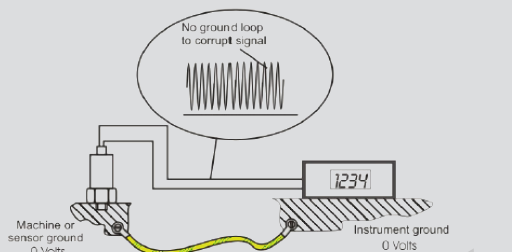
5. Transverse Sensitivity
6. Cross Axial Sensitivity



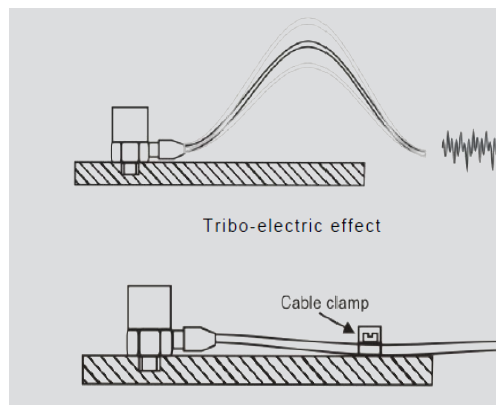
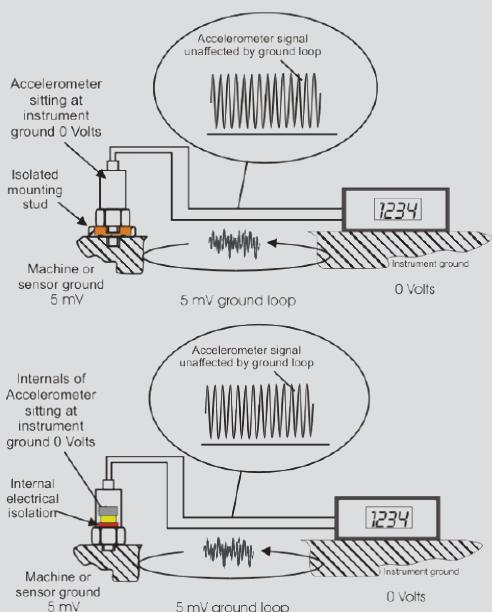
یکی از ارزان‌ترین روش‌ها در ساخت شتاب‌سنج، اتصال زمین سیگنال به بدنه‌ی سنسور می‌باشد. در این حالت معمولاً سازندگان جهت پیشگیری از بروز خطای حلقه‌ی زمین یک پایه ایزوله به همراه سنسور ارائه می‌کنند که بین شتاب‌سنج و محل نصب قرار می‌گیرد.

شتاب‌سنج‌های ایزوله به دو روش تولید می‌شوند. یک روش مانند شتاب‌سنج‌های معمولی می‌باشد با این تفاوت که پایه‌ی ایزوله نیز به طور دائمی زیر شتاب‌سنج وصل شده است. روش دیگر این است که بدنه‌ی شتاب‌سنج و کانکتور آن بطور کامل در داخل شتاب‌سنج از زمین داخلی آن ایزوله می‌باشد.

یک راه حذفی حلقه زمین، اتصال مطمئن گراند به همه نقاط با سیم دارای قطر مناسب می‌باشد تا حلقه‌ی زمین ایجاد نگردد.



ولی وقتی فاصله‌ی اجزا طولانی باشد یا سازه دارای نویزهای ناشی از ماشین‌آلات خودش باشد، این روش راحت و مناسب نمی‌باشد و بهتر است به جای حذف حلقه‌ی زمین، اثر آنها بر روی خروجی سنسور را کاهش داد. راه‌حل مناسب برای این منظور نصب شتاب‌سنج بر روی یک سطح ایزوله‌ی الکتریکی یا استفاده از شتاب‌سنج‌های ایزوله‌ی زمین می‌باشد. البته استفاده از ایزولاتور زمین باعث کاهش فرکانس رزونانس نصب شده‌ی سنسور می‌شود، بنابراین اکثر شتاب‌سنج‌ها بدون ایزولاسیون الکتریکی زمین می‌باشند.



خطی بودن دامنه^{۱۴}

شتاب‌سنج باید در تمام شتاب‌هایی که اندازه‌گیری می‌کند دارای حساسیت یکسان باشد. به تغییرات حساسیت در گستره‌ی شتاب کاری سنسور و درجه‌ی دقت خروجی شتاب‌سنج در حداقل تا حداکثر شتاب، خطی بودن دامنه یا غیرخطی بودن دامنه گفته می‌شود که معمولاً بصورت درصد در طول بازه‌ی کاری نمایش داده می‌شود. مثلاً ۱٪، در ۰ g تا ۲۰۰۰ g. این مشخصه در برخی موارد به صورت دقیق‌تر بیان می‌شود. برای مثال ۱٪ در هر ۵۰۰ g. در این صورت برای ۰ تا ۲۰۰۰ g تغییرات حساسیت می‌تواند تا ۴٪ بشود.

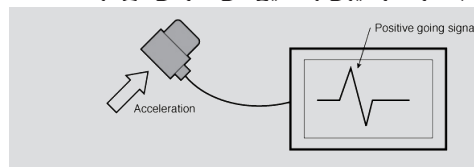
این تغییرات می‌تواند در شتاب‌های بالا مشکل‌ساز شود. به ویژه اگر ترکیب چند فرکانس در محیط اندازه‌گیری وجود داشته باشد تغییرات دامنه‌ی آنها می‌تواند به صورت فرکانس‌های غیر واقعی در وسیله‌ی اندازه‌گیری ظاهر شود.

رزولوشن^{۱۵}

حداقل سیگنال شتاب قابل تفکیک خروجی شتاب‌سنج رزولوشن آن می‌باشد که با توجه به ماهیت آنالوگ شتاب‌سنج و خروجی پیوسته‌ی آن، معمولاً بستگی به نویز خروجی شتاب‌سنج دارد و بر حسب g rms بیان می‌شود.

پلاریته‌ی خروجی^{۱۶}

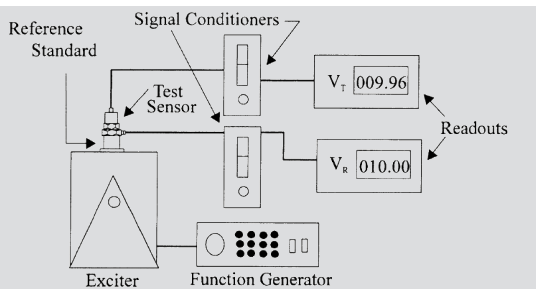
جهت مثبت یا منفی سیگنال خروجی شتاب‌سنج نسبت به شتاب وارده به آن پلاریته خروجی نام دارد که معمولاً مثبت می‌باشد. یعنی شتاب وارده به زیر شتاب‌سنج، خروجی مثبت دارد. در مورد شتاب‌سنج‌های سه محوره معمولاً جهت را با فلش نمایش می‌دهند. این مشخصه در اندازه‌گیری شوک و انجام آزمون مودال بسیار مهم می‌باشد و غلط بودن آن می‌تواند باعث بروز اشتباه در اندازه‌گیری و تحلیل‌های سازه‌ای می‌شود.



ایزولاسیون زمین^{۱۷}

شتاب‌سنج‌ها به عنوان یک وسیله الکتریکی نیاز به مسیر برگشت زمین سیگنال به سیگنال کاندیشنر دارند و مصرف‌کننده باید بداند که این زمین چگونه وصل شده است چرا که اگر سیستم زمین مناسبی وجود نداشته باشد می‌تواند باعث بروز حلقه‌ی زمین^{۱۸} و سیگنال‌های ناخواسته در خروجی شود.

14. Amplitude Linearity
15. Resolution
16. Output Polarity
17. Ground Isolation
18. Ground Loop



در مواردی که دقت کمتری مورد نظر باشد و یا لازم باشد تا کالیبراسیون شتابسنج در محل نصب آن انجام پذیرد، می‌توان از کالیبراتورهای دستی یا کالیبراتورهای قابل حمل استفاده نمود.



برای کالیبراسیون شتابسنج‌های اندازه‌گیری شوک با توجه به محدودیت شتاب شیکرهای کالیبراسیون، از سیستم‌های آزمون شوک استفاده می‌شود.

در صورتی که مرکز کالیبراسیون دارای مجوز باشد می‌تواند گواهی کالیبراسیون شتابسنج را به همراه محدودیت‌های عدم قطعیت^{۲۲} اندازه‌گیری و ارائه نماید. معمولاً علاوه بر حساسیت، شماره سریال، مدل شتابسنج، نام مشتری و پاسخ فرکانسی نیز در برگه‌ی کالیبراسیون درج می‌گردد.

برای سنسورهایی با قابلیت اندازه‌گیری شتاب ثابت می‌توان در یک روش ساده و اولیه با قراردادن سنسور در راستای محور زمین و در راستای خلاف آن با اندازه‌گیری شتاب ۱ g و -۱ g، شتابسنج را کالیبره نمود. مشخصه‌های دیگری نیز مانند پاسخ دمایی، ثابت زمانی، ظرفیت خازنی، حساسیت کرنش، پایه‌ی شتابسنج، حساسیت مغناطیسی و ... نیز وجود دارند که توضیح آنها از حوصله‌ی این مطلب بیرون می‌باشد و علاقمندان می‌توانند در صورت نیاز به سایر منابع مربوطه مراجعه نمایند.

سازندگان

برای اطلاعات بیشتر راجع به شتابسنج‌ها می‌توان به اطلاعات کارخانه‌های سازنده از قبیل سازندگان معتبر زیر مراجعه نمود: PCB, B&K, Kistler, Endevco, Dytran, Analog Devices, Motorola, Silicon Designs, Polytec, HBM,....

به امید حضرت حق در شماره بعد به معرفی سنسورهای فشار خواهیم پرداخت.

22. Uncertainty

محدوده‌ی دینامیک^{۱۹}

محدوده‌ی بین حداقل و حداکثر شتاب قابل اندازه‌گیری توسط شتابسنج را محدوده‌ی دینامیک آن می‌نامند.

در حداقل شتاب، عامل محدود کننده‌ی نویز سیستم الکترونیک، تقویت سیگنال خروجی شتابسنج می‌باشد و در حداکثر شتاب، عامل محدود کننده، حداکثر ولتاژ تغذیه مدار می‌باشد.

عامل محدود کننده‌ی دیگر در حداکثر شتاب، ساختار مکانیکی سنسور و حداکثر تحمل شتاب آن بیش از آسیب دیدن اجزای داخلی آن است. اگر حداکثر ولتاژ خروجی شتابسنج ۵ V و حساسیت آن ۱۰۰ mV/g باشد، محدوده‌ی دینامیک سنسور ± 50 g خواهد بود و اگر حساسیت آن ۱۰ mV/g باشد، محدوده‌ی دینامیک سنسور ± 500 g خواهد بود.

مشخصه‌های الکتریکی

در بخش مشخصه‌های الکتریکی به پارامترهایی که در تحریک و خواندن اطلاعات شتابسنج اهمیت دارند از قبیل ولتاژ و جریان تغذیه، امپدانس خروجی، مقاومت عایقی، ظرفیت خازنی و ... اشاره می‌شود.

مشخصه‌های محیطی

در بخش مشخصه‌های محیطی، محدوده‌ی قابل تحمل شرایط محیط کارکرد شتابسنج از قبیل دما، رطوبت، ارتعاش، شوک و ... مشخص می‌شوند. در صورتی که شرایط محیطی عملکردی خارج از محدوده‌های مشخص شده قرار گیرند اطلاعات خروجی شتابسنج معتبر نمی‌باشند و حتی ممکن است شتابسنج آسیب دائمی دیده و خراب شود.

موارد انتخابی در سفارش شتابسنج

پس از انتخاب شتابسنج معمولاً در هنگام سفارش، این امکان را دارید تا محدوده‌ی دمای کارکرد، ایزوله بودن زمین، دارا بودن امکان TEDS طول و نوع کانکتور کابل ارتباطی، ضد آب بودن و بعضی پارامترهای دیگر را در کد سفارش مشخص نمایید که بالطبع بر قیمت شتابسنج اثر خواهد گذاشت. این انتخاب‌ها برای سازندگان مختلف و انواع مختلف شتابسنج می‌توانند متفاوت باشند.

کالیبراسیون

شتابسنج‌ها در صورتی که در معرض شوک شدید و دمای بالا قرار نگیرند تغییرات کمی در حساسیت خروجی پیدا می‌کنند و حتی ممکن است در طول چندین سال کمتر از ۲٪ تغییر در حساسیت خروجی پیدا کنند.

به عنوان مثال چنانچه شتابسنج‌ها در حین کار و یا نگهداری از دست بر روی سطح سخت بیفتند ممکن است تا چند هزار g به آنها شوک وارد شود. سقوط سنسور و اعمال شتاب بیش از حد تحمل بر روی آن باعث خرابی دائمی سنسور و یا تغییر مشخصات فنی آن می‌شود. بنابراین لازم است شتابسنج‌ها به طور دوره‌ای کالیبره شوند.

در کالیبراسیون سنسورهای شتاب معمولاً از روش نصب سنسور مورد اندازه‌گیری بر روی یک سنسور مرجع کالیبره معتبر و قابل ردیابی به NIST^{۲۰} استفاده می‌شود که اصطلاحاً نصب پشت به پشت^{۲۱} نام دارد. این ترکیب بر روی یک لرزاننده‌ی (Shaker) مخصوص کالیبراسیون نصب می‌گردد و نتایج سنسور در شتاب‌ها و فرکانس‌های مختلف ثبت می‌گردد و کالیبراسیون به روش مقایسه‌ای نسبت به سنسور مرجع انجام می‌پذیرد.

19. Dynamic Range

20. National Institute of Standards and Technology

21. Back to Back Installation