

خطا های ناشی از غیر خطی بودن پل و تستون

1- مقدمه: نشانگرهای کرنش استاتیک تجاری و سیستم های پردازش سیگنال برای کاربردهای اندازه گیری، به طور قابل توجهی در جزئیات مدارات داخلشان متفاوت هستند. اگرچه اکثر آنها بر اساس شکلی از مدار پل و تستون هستند، ولی مدار پل به روش های مختلف در ابزارهای مختلف استفاده می شود. به دلیل تنوع زیاد در طراحی تجهیزات صنعتی، بررسی کامل اثرات غیرخطی بودن همه این تجهیزات در این مقاله نمی گنجد. با این حال، دسته بزرگی از نشانگرهای کرنش استاتیک و سیستم های پردازشی وجود دارند که تقریباً از یک ساختار مشابه استفاده از پل و تستون نامتعادل در مدارات آنها با تفاوت اندکی نسبت به هم بهره می برند. و این سیستم ها مقداری در خروجی خود ویژگی غیر خطی بودن را نشان می دهند. این یادداشت فنی به منظور ارائه یک وسیله ساده برای تعیین میزان بزرگی خطاهای غیرخطی و برای انجام اصلاحات آنها در صورت لزوم تهیه شده است. توجه داشته باشید که روابط خطا و تصحیح های داده شده در اینجا فقط برای ابزارهایی اعمال می شود که ویژگی های تعریف شده در بخش 2.0 را دارند. برای سایر ابزارها، خطاهای غیرخطی، در صورت وجود، باید با کالیبراسیون مستقیم یا توسط مشخصات سازنده تعیین شوند.

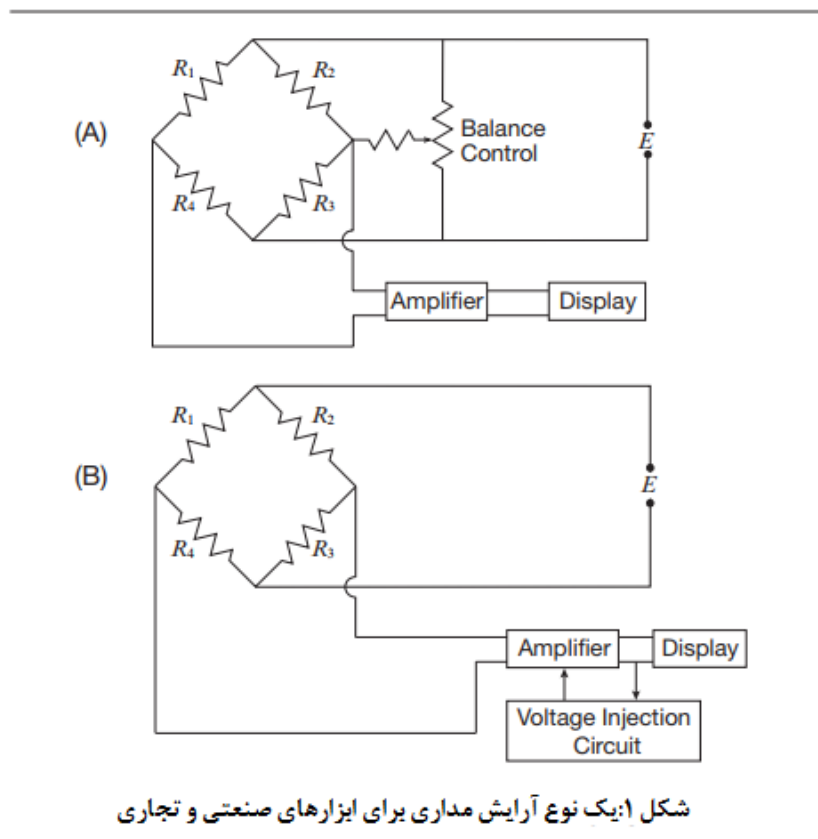
خطای غیرخطی به این دلیل رخ می دهد که وقتی اندازه گیری های کرنش با یک مدار پل و تستون نامتعادل انجام می شود (همانطور که در بخش 2.0 توضیح داده شد)، شرایط خاصی وجود دارد که در آن خروجی مدار پل تابعی غیرخطی از تغییر(های) مقاومت است. این خطاهای ایجاد شده به دلیل خاصیت غیر خطی بودن پل، معمولاً کوچک است و هنگام اندازه گیری کرنش های الاستیک در فلزات قابل چشم پوشی می باشد. با این حال، درصد خطا با بزرگی کرنشی که اندازه گیری می شود افزایش می یابد و می تواند در کرنش های بزرگ کاملاً مهم باشد. (به عنوان مثال خطا برای $1000\mu\epsilon$ برابر با 0.1%، برای $10000\mu\epsilon$ برابر با 1% و برای $100000\mu\epsilon$ برابر با 10% می باشد. در حالت کلی درصد خطای ایجاد شده متناسب با مقدار درصد کرنش اندازه گیری شده می باشد).

2- مدار پل و تستون نامتعادل

اکثر نشانگرهای کرنش استاتیک که برای اندازه گیری کرنش از استرین گیج های مقاومتی استفاده می کنند، از شکلی از مدار پل و تستون استفاده می کنند که در آن بازوهای پل از یک تا چهار گیج فعال تشکیل شده است. آرایش کلاسیک پل و تستون سال هاست که برای اندازه گیری دقیق یک مقاومت مجهول استفاده می شود. مکانیزم کاری پل و تستون به این صورت است که قبل از عمل اندازه گیری، ابتدا پل را با تغییر مقدار مقاومت های بازوهای دیگر، آن را متعادل (بالانس) می کنند. در سیستم های اندازه گیری کرنش، هنگام اندازه گیری، با تغییر مقدار مقاومت استرین گیج، پل نامتعادل می شود و یک ولتاژی را متناسب با میزان تغییرات مقاومت گیج، در خروجی خود ایجاد می کند. و اصطلاح پل و تستون "نامتعادل" در واقع از همین موضوع نشأت گرفته شده است.

همان طور که قبلا اشاره شد، ولتاژ خروجی به دست آمده از پل و تستون "نامتعادل" تابعی از میزان عدم تعادل است آن است و بنابراین مستقیما با کرنش اعمال شده به گیج مرتبط است. با این حال، تحت شرایط خاصی که اغلب در موارد واقعی با آن مواجه می شویم، ولتاژ خروجی پل، همانطور که قبلا ذکر شد، یک تابع غیرخطی از تغییر مقاومت در بازوهای پل است. هنگامی که این اتفاق می افتد، خواندن کرنش از خروجی پل تا حدودی اشتباه خواهد بود.

شکل 1 دو مورد از ترتیبات مداری را نشان می دهد که بیشتر در نشانگرهای کرنش سنج های تجاری و صنعتی مورد استفاده قرار می گیرند. در مدار (A)، ولتاژ خروجی پل تقویت شده و بر روی یک ابزار نشانگر، اغلب یک ولت متر دیجیتال، نمایش داده می شود. در مدار (B)، ولتاژ خروجی پل توسط یک ولتاژ مساوی و مخالف تزریق شده به مدار اندازه گیری "نال" می شود. در هر دو حالت، اگر تقویت کننده ها امپدانس ورودی بالایی داشته باشند و اگر منابع تغذیه از نوع ولتاژ ثابت باشند، خطاهای غیرخطی یکسان هستند. همچنین توجه داشته باشید که در هر دو مدار، کنترل بالانس یا تعادل فقط برای برقراری تعادل پل قبل از اندازه گیری کرنش در گیج ها استفاده می شود و کنترل تعادل بخشی از مدار بازخوانی سیگنال را تشکیل نمی دهند.



مدارات "بالانس کننده" معمولاً یک رنج عملکردی محدودی دارند، و این رنج طوری تنظیم می شود که مشکلی در تنظیم-پایداری و حساسیت پل ایجاد نکند. بنابراین این مدارات بر خطاهای غیرخطی که در این یادداشت فنی توضیح داده شده است تأثیر زیادی نمی گذارد. برای بررسی دقیق خطاها بدون ارائه ملاحظات دیگر، در سراسر بحث زیر فرض می شود که مدار "تعادل" یا به طور

کامل قطع شده است، یا اینکه در نقطه وسط رنج عملکردی خود تنظیم شده است. همچنین فرض بر این است بازوهای پل از نظر مقاومتی، نسبت به محوری که گره های خروجی پل را به هم متصل می کند، متقارن هستند. یعنی:

$$(R_1/R_4)_{nom} = 1 = (R_2/R_3)_{nom}$$

TABLE 1				
Bridge/Strain Arrangement (Note 1)	Description	Bridge Output, E_o/E mV/V (Notes 2, 3)	Nonlinearity, η Where $E_o/E = K\epsilon \times 10^{-3} (1-\eta)$ (Notes 2, 3)	Corrections (Note 3, 4)
1 	Single active gage in uniaxial tension or compression.	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon \times 10^{-3}}{4 + 2F\epsilon \times 10^{-6}}$	$K = \frac{F}{4}$ $\eta = \frac{F\epsilon \times 10^{-6}}{2 + F\epsilon \times 10^{-6}}$	$\epsilon = \frac{2\epsilon_i}{2 - F\epsilon_i \times 10^{-6}}$
2 	Two active gages in uniaxial stress field — one aligned with maximum principal strain, one "Poisson" gage.	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon(1+\nu) \times 10^{-3}}{4 + 2F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}$	$K = \frac{F(1+\nu)}{4}$ $\eta = \frac{F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}{2 + F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}$	$\epsilon = \frac{2\epsilon_i}{2(1+\nu) - F\epsilon_i(1-\nu) \times 10^{-6}}$
3 	Two active gages with equal and opposite strains — typical of bending-beam arrangement.	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon}{2} \times 10^{-3}$	$K = \frac{F}{2}; \eta = 0$	$\epsilon = \frac{\epsilon_i}{2}$
4 	Two active gages with equal strains of same sign — used on opposite sides of column with low temperature gradient (bending cancellation, for instance).	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon \times 10^{-3}}{2 + F\epsilon \times 10^{-6}}$	$K = \frac{F}{2}$ $\eta = \frac{F\epsilon \times 10^{-6}}{2 + F\epsilon \times 10^{-6}}$	$\epsilon = \frac{2\epsilon_i}{4 - F\epsilon_i \times 10^{-6}}$
5 	Four active gages in uniaxial stress field two aligned with maximum principal strain, two "Poisson" gages (column).	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon(1+\nu) \times 10^{-3}}{2 + F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}$	$K = \frac{F(1+\nu)}{2}$ $\eta = \frac{F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}{2 + F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}$	$\epsilon = \frac{2\epsilon_i}{4(1+\nu) - F\epsilon_i(1-\nu) \times 10^{-6}}$
6 	Four active gages in uniaxial stress field — two aligned with maximum principal strain, two "Poisson" gages (beam).	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon(1+\nu) \times 10^{-3}}{2}$	$K = \frac{F(1+\nu)}{2}; \eta = 0$	$\epsilon = \frac{\epsilon_i}{2(1+\nu)}$
7 	Four active gages with pairs subjected to equal and opposite strains (beam in bending or shaft in torsion).	$\frac{E_o}{E} = F\epsilon \times 10^{-3}$	$K = F; \eta = 0$	$\epsilon = \frac{\epsilon_i}{4}$

در نتیجه آرایش های مداری که در بالا توضیح داده شد، خواندن مقدار کرنش توسط تجهیزات اندازه گیری، هیچ تأثیری بر وضعیت بالانس مقاومتی در مدار پل و تستون ندارد. حتی اگر پل و تستون در ابتدا به صورت مقاومتی بالانس شود به طوری که $R_1/R_4 = R_2/R_3$ ، به طور کلی، زمانی که یک یا چند استرین گیج در بازوهای پل دچار کرنش شوند و مقاومت آنها تغییر کند، این دیگر درست نخواهد بود و پل نامتعادل خواهد شد. در نتیجه، پل و تستون معمولاً در حالت نامتعادل از نظر مقاومتی به کار گرفته می شود. در این مد عملیاتی، تغییرات مقاومت در بازوهای پل ممکن است باعث تغییر در جریان های عبوری از بازوها شود. مقدار این جریان به علامت و بزرگی تغییرات مقاومت ها در هر چهار بازو پل وابسته می باشد. هنگامی که تغییرات جریان رخ می دهد، ولتاژ خروجی پل با تغییرات مقاومت در بازوهای پل متناسب نیست و در نتیجه خروجی

با مقدار کرنش اندازه گیری شده رابطه غیر خطی دارد و نشانگر دستگاه در واقع کرنش را به همراه خطا نشان می دهد.

خطاهای غیر خطی و تصحیح آنها

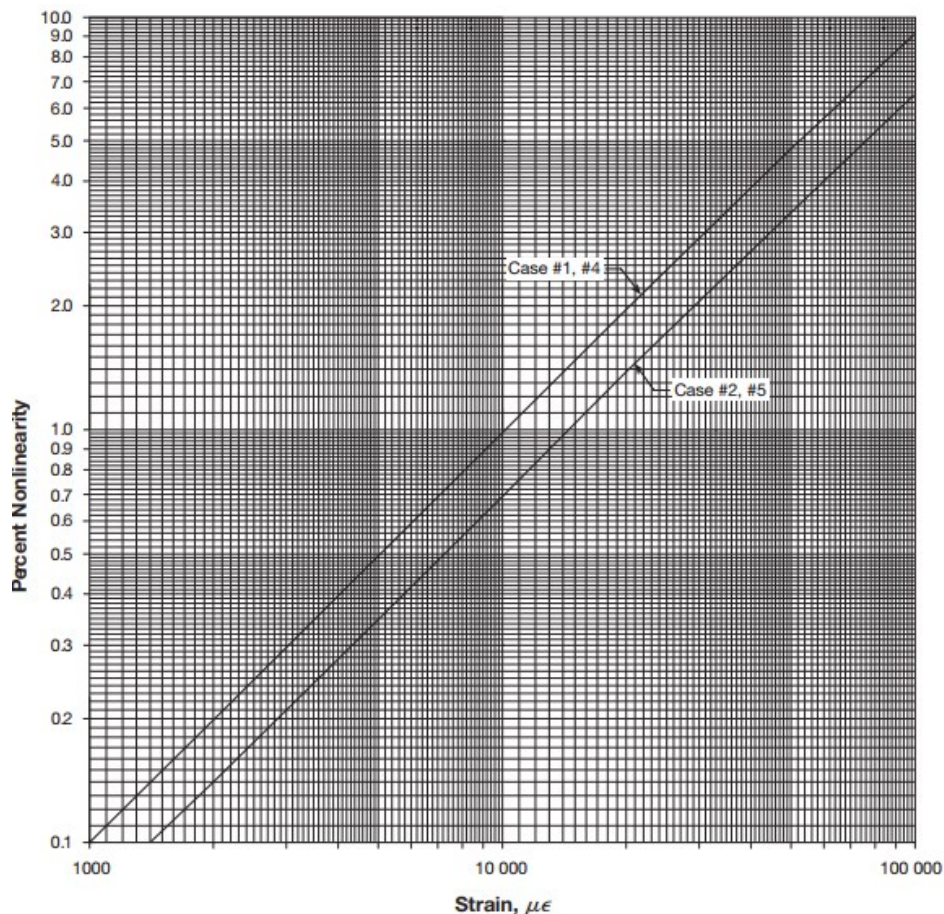
برای آن دسته از تجهیزاتی که در بخش 2 شرح داده شدند، جدول 1 میزان خطاهای غیرخطی برای آرایش های مختلف و همچنین روابط تصحیح این خطاها را نشان می دهد. این جدول تابع تبدیل یا ولتاژ خروجی بدون بعد ($\frac{E_o}{E}$) را به صورت تابعی از کرنش اعمال شده (یا فاکتور گیج) برای حالت های مختلف اندازه گیری کرنش در ساختارهای متفاوت و در آرایش های مداری مختلف پل وتستون نشان می دهد. به راحتی می توان دید که عبارات خروجی برای موارد 1، 2، 4 و 5 ذاتا غیرخطی هستند، در حالی که عبارات خروجی برای موارد 3، 6 و 7 خطی هستند. در واقع زمانی که تغییرات مقاومت بازوهای پل در اثر کرنش های اعمالی، طوری باشد که جریان عبوری از بازوهای پل ثابت بماند، یعنی: $\Delta R_1/R_1 + \Delta R_4/R_4 = 0$

و $\Delta R_2/R_2 + \Delta R_3/R_3 = 0$ در این صورت خروجی پل تابعی خطی از کرنش خواهد بود. برای هر یک از حالت های جدول 1 خروجی بدون بعد مدار را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$E_o/E = K\epsilon \times 10^{-3} (1-\eta), \text{ mV/V}$$

در این رابطه K یک ضریب ثابت می باشد که مقدار آن بستگی به فاکتور گیج استرین گیج (ها) و همچنین تعداد بازوهای فعال پل وتستون دارد. و η (در صورت غیر صفر بودن)، میزان غیرخطی که در اثر تغییرات جریان در بازوهای پل به وجود آمده است، را نشان می دهد. $\eta \times 100^*$ نیز میزان غیرخطی بودن خروجی بر حسب درصد می باشد.

ستون غیرخطی در جدول 1 بیان ریاضی را برای محاسبه η به عنوان تابعی از کرنش اعمال شده و سایر پارامترهای مربوطه ارائه می دهد. از جدول 1 می توان متوجه شد که بر اساس درصد، بزرگی خطاهای غیرخطی برای موارد 1 و 4 و برای 2 و 5 یکسان است، هرچند خروجی های مدار متفاوت است. برای سهولت در قضاوت بزرگی خطاهای غیرخطی، روابط برای موارد 1، 2، 4 و 5 در شکل 2 ترسیم شده اند، این شکل با فرض کرنش های مثبت (کششی)، ضریب گیج 2.0 و نسبت پواسون (در صورت وجود) 0.30 رسم شده است. خطاهای غیرخطی برای کرنش فشاری از نظر علامت مخالف و از نظر مقدار تا حدودی متفاوت از حالت کششی است، اما همیشه می توان از روابط داده شده در جدول 1 مقادیر دقیق آنها را محاسبه کرد.



شکل ۲: خطاهای غیر خطی برای کرنش های کششی در مدارات پل

آخرین ستون (راست ترین) در جدول 1 روابطی را برای تبدیل کرنش قرائت شده ϵ_i از نشانگر یا سایر تجهیزات اندازه گیری کرنش به کرنش واقعی روی سطح مواد ϵ ، تحت یک گنج فعال ارائه می دهد.

مثال های عددی:

برای مثال اول، پل و تستون quarter-bridge را در نظر بگیرید که از نظر مقاومتی در حالت بالانس کامل بوده و هیچ باری هم به قطعه کار اعمال نشده است. سپس قطعه کار در حدی اعمال بار به آن صورت می گیرد که نشانگر کرنش مقدار $15000 \mu\epsilon$ کششی را در خود ثبت می کند. از شکل 2 برای حالت 1، مقدار خطای غیرخطی برای این حالت 1.5 درصد یا $225 \mu\epsilon$ بدست می آید. مقدار واقعی کرنش سطحی برای خروجی نشانگر $15000 \mu\epsilon$ را می توان از طریق ستون تصحیح روابط در جدول 1 بدست آورد. با جایگذاری $F=2.0$ و $\epsilon_i = 15000 \mu\epsilon$ در رابطه :

$$\epsilon = (2\epsilon_i) / (2 - F\epsilon_i \times 10^{-6})$$

مقدار $\varepsilon = 15228 \mu\varepsilon$ را بدست می دهد. اگر نشانگر کرنش مقدار $\varepsilon_i = -15000 \mu\varepsilon$ را برای حالت فشاری نشان می دهد، در این صورت مقدار واقعی کرنش سطحی $\varepsilon = -14778 \mu\varepsilon$ می شد، غیر خطی بودن پل باعث می شود که نشانگر میزان کرنش را برای حالت های کششی کمتر از مقدار واقعی و برای حالت های فشاری بیشتر از مقدار واقعی نشان دهد.

در مثال قبلی فرض بر این بود که پل و تستون در ابتدا در حالت تعادل مقاومتی قرار دارد. در عمل هنگام تجزیه و تحلیل تنش تجربی با استرین گیج، ممکن است همیشه اینطور نباشد. به عنوان مثال، در طول نصب یک استرین گیج، ممکن است مقاومت گیج به طور قابل توجهی از مقدار تولید شده به خاطر عدم رعایت تکنیک های نصب تغییر کند. همچنین ممکن است قبل از انجام عمل اندازه گیری کرنش، استرین گیج به خاطر مونتاژ یا تنش های پیش بار، وارد ناحیه پلاستیکی شود. این عدم تعادل ها در خروجی پل، در صورتی که مقدار آنها ناچیز نباشد، باید بطور دقیق اندازه گیری شوند و مقدار آنها در روابط اصلاحات باید در نظر گرفته شوند. این عدم تعادل های اولیه باید به صورت جبری (بیان شده در واحدهای کرنش) به مقدار کرنش مشاهده شده در نشانگر اضافه شوند تا اصلاح غیرخطی بر اساس عدم تعادل کل (یا خالص) پل و تستون در هر مرحله از اندازه گیری باشد.

برای این مثال، فرض کنید که نشانگر مقدار $4500 \mu\varepsilon$ - را در خروجی خود به عنوان عدم تعادل اولیه، و بدون اعمال بار به قطعه کار نشان می دهد. این مقدار به عنوان عدم تعادل اولیه پل شناخته می شود، در نتیجه مقداری خطای غیرخطی را هم شامل می شود که باید تصحیح شود. با جایگذاری در روابط تصحیح جدول 1 برای حالت 1 همانند قبل، مقدار عدم تعادل اولیه پل بر حسب واحد کرنش $\varepsilon = -4480 \mu\varepsilon$ بدست می آید. بعد از محاسبه این مقدار (بدون اینکه پل را متعادل کنیم)، قطعه کار تحت تست به مقدار لازم بارگذاری می شود. میزان تغییرات در نشانگر کرنش به دلیل اعمال بار به قطعه کار $8000 \mu\varepsilon$ - می باشد. بنابراین مقدار کل کرنش نشان داده شده از خروجی پل $12500 \mu\varepsilon$ - می باشد. مقدار کرنش تصحیح شده واقعی برای این مقدار برابر با $12346 \mu\varepsilon$ - می باشد. بنابراین مقدار کرنش واقعی اعمال شده به قطعه کار برابر با $\varepsilon = -2346 - (-4480) = -7866 \mu\varepsilon$ می باشد.

به عنوان مثال آخر از این بخش، فرض کنید که مقدار کرنش نشان داده شده در نشانگر ناشی از عدم تعادل اولیه برابر با $2500 \mu\varepsilon$ - باشد. سپس به خاطر مونتاژ یک سری تجهیزات دیگر روی قطعه کار مورد نظر، $45500 \mu\varepsilon$ - واحد دیگر به مقدار اولیه آن اضافه شود. بعد از قرائت این مقادیر از نشانگر، قطعه کار به اندازه ای بار گذاری می شود که مقدار $3000 \mu\varepsilon$ در خروجی آن

تغییر ایجاد می شود (بار کششی). حالا مقدار واقعی تنش کششی اعمال شده به قطعه کار چقدر است؟

قبل از اعمال هر باری، پل و تستون به اندازه $48000 \mu\epsilon$ - عدم تعادل را در خروجی خود نشان می دهد. با جایگذاری این مقدار در روابط تصحیح جدول 1 برای حالت 1، مقدار $45802 \mu\epsilon$ - عدم تعادل اولیه در واحد کرنش بدست می آید. بعد از بارگذاری ساختار، باید نشانگر مقدار $45000 \mu\epsilon = -48000 + 3000$ را در خروجی خود نشان دهد. مقدار تصحیح شده واقعی برای این مقدار برابر با $43062 \mu\epsilon$ - بدست می آید. بنابراین مقدار کرنش واقعی ایجاد شده روی ساختار در اثر بارگذاری کششی آن $2740 \mu\epsilon = -43062 - (-45802)$ بدست می آید. این مثال نشان می دهد که اگر پل و تستون دور از نقطه تعادل مقاومتی خود کار کند، حتی با کرنش های کاری نسبتاً متوسط، خطای غیرخطی می تواند بسیار بزرگ باشد (در این مثال حدود 10٪).

خطاهای غیر خطی در کالیبراسیون شنت و اندازه گیری کرنش دینامیکی:

خطاهای غیرخطی شرح داده شده در بخش های قبلی این یادداشت فنی را باید همیشه در حین کالیبراسیون شنت نشانگر کرنش یا هر ابزار دیگر اندازه گیری کرنش در نظر داشت. در روش مرسوم کالیبراسیون شنت، استرین گیج به طور لحظه ای توسط یک مقاومت با مقدار بزرگ موازی می شود. این کار مقاومت بازوی پل را که گیج در آن قرار گرفته کاهش می دهد. مقدار این مقاومت طوری انتخاب می شود که سیگنالی که به واسطه موازی شدن آن در خروجی پل ظاهر می شود، دقیقاً برابر با سیگنالی باشد که نشانگر کرنش برای یک بار فشاری معلوم، آن خروجی را تولید می کند. در واقع با این عمل بار فشاری معلوم در پل شبیه سازی می شود. به عنوان یک جایگزین، مقاومت ثابت داخلی در بازوی مجاور مدار پل می تواند برای شبیه سازی یک کرنش کششی در گیج، شنت شود. از آنجایی که مقدار خطا برای حالت های کششی و فشاری فرق می کند، پس مقادیر مقاومت های شنت نیز برای این دو حالت متفاوت می باشد. برای کرنش هایی با مقادیر کوچک تفاوت بین خطای غیرخطی حالت های کششی/فشاری ناچیز است و در این حالت می توان از مقاومت های استاندارد موجود برای هر دو حالت استفاده کرد. اما برای کالیبر دقیق تر در اندازه گیری کرنش های بزرگ، بهتر است از مقاومت های مخصوص که برای هر حالت جداگانه می باشد، استفاده کرد.

خلاصه:

خطاهای غیرخطی مدارات پل و تستون که در آنها از استرین گیج برای اندازه گیری کرنش استفاده می شود، برای رنج های میانی کرنش از نظر بزرگی دامنه مانند اندازه گیری کرنش

Houshmand Sanat Tav Electronic CO.,LTD.

الاستیکی در فلزات، معمولاً به حدی کوچک هستند که می توان از آنها صرف نظر کرد. (به شرطی که قبل از عمل اندازه گیری پل در حالت تعادل باشد). اما در مقابل، عدم تعادل های بزرگ در پل و تستون می تواند منجر به ایجاد خطاهای غیرخطی قابل ملاحظه ای در خروجی پل شود. روابط و مراحل گفته شده در این یادداشت فنی می تواند در جهت تصحیح این خطاها، در صورت نیاز به کار گرفته شود. همچنین برای اندازه گیری دقیق تر بهتر است از استرین گیج هایی با تیرانس پایین تر استفاده شود و در حین نصب باید مراحل نصب گیج به دقت رعایت شود تا تغییر مقاومت زیادی در استرین گیج (ها) حین نصب به وجود نیاید.