

ترانسدیوسرها

مقصود از به کار گیری یک سیستم اندازه گیری و کنترل، اطمینان از ارتباط تنگاتنگ ما بین خروجی واقعی سیستم و خروجی دلخواه و یا مورد نظر است. خروجی واقعی، متغیر فرآیند و خروجی دلخواه نقطه تنظیم (set point) نامیده می‌شود.

کوشش ریاضی، الکترونیکی و هزینه زیادی برای اطمینان از کارایی مناسب سیستم‌های اندازه گیری و کنترلی انجام می‌شود؛ هر چند، بدون وابستگی به اینکه طراحی ریاضی چگونه بوده و مدار الکتریکی چگونه پیاده‌سازی میشود، کنترل نهایی بهتر از درک سیستم از متغیرهای فرایند نخواهد بود.

بنابراین کیفیت اندازه‌گیری متغیرهایی که کنترل می‌شوند، تعیین کننده نهایی کارایی کلی سیستم است.

این موضوع خیلی مهم است که اصول فیزیکی، را که حسگرها و ترانسدیوسرها بر اساس آن پارامترهایی همچون (حرارت، نیرو، موقعیت و ...) را به مقادیر الکتریکی تبدیل می‌کنند، درک کنیم؛ و از سوی دیگر، به همان اندازه توانایی خواندن و تفسیر مشخصات تولید کنندگان دستگاهها مهم می‌باشد.

یکی از نکات اولیه، انتخاب صحیح حسگرها و ترانسدیوسرها، از نقطه نظرهای دقت، قدرت تشخیص، خطی بودن، قابلیت تکرار پذیری و سرعت پاسخ، با توجه به احتیاجات سیستم است. حسگر و یا ترانسدیوسری که بدقت انتخاب نشده باشد، می‌تواند کارایی سیستم را تحت الشعاع قرار دهد. عبارت دیگر نمی‌توان پروسه‌ای را دقیق‌تر از دقت و صحت مقادیر حاصل از اندازه‌گیری اش، کنترل کرد.

بعنوان مثال، انتخاب و استفاده از یک ترانسدیوسر دما با محدوده کاری از $+400$ تا -100 درجه فارنهایت و دقت $0.01^{\circ}F$ برای کنترل درجه حرارت منزل، منطقی نیست.

بنابراین، اول به تعاریف پارامترهای مورد استفاده برای مشخص نمودن اینکه یک حسگر و یا ترانسدیوسر به چه خوبی و با چه سرعتی عمل تبدیل مقادیر اندازه‌گیری شده به خروجی الکتریکی را انجام می‌دهد، می‌پردازیم.

بایستی اطمینان حاصل شود که تفسیر این پارامترها مشابه با طریقی باشد که تولید کننده آنها ارائه داده است.

مشخصه‌های ترانسدیوسر

عمل یک ترانسدیوسر، تبدیل یک کمیت فیزیکی به یک سیگنال الکتریکی می‌باشد.

معمول‌ترین کمیت‌های اندازه‌گیری شده توسط ترانسدیوسرها، موقعیت، نیرو، سرعت، شتاب، فشار، سطح، جریان مایعات و درجه حرارت هستند. خروجی ترانسدیوسرها معمولاً ممکن است، ولتاژ، جریان، مقاومت، ظرفیت خازنی و یا فرکانس باشد.

اینکه خروجی ترانسدیوسر در پاسخ به یک تغییر در پارامتر فیزیکی ورودی اش با چه نزدیکی و با چه سرعتی تغییر می‌کند. کلید اصلی موفقیت در کنترل سیستم‌ها می‌باشد. کارائی حسگر ها و ترانسدیوسرها، بوسیله تولید کننده های آنها بصورت دو دسته مشخصه اعلام ، تعریف و گارانتی می‌شوند.

- مشخصه های کارائی استاتیکی، تعریف رابطه حالت پایدار بین پارامتر فیزیکی در ورودی و خروجی الکتریکی هستند. دقت (Accuracy) ، حساسیت و یا قدرت تشخیص و تفکیک (Resolution)، (Precision)، قابلیت تکرار پذیری (Repeatability) ، خطی بودن (Linearity) و پسماند (Hysteresis) همگی مشخصه های استاتیکی هستند.

- مشخصه های کارائی دینامیکی ، تعریفی از این موضوع هستند که خروجی با چه سرعتی در پاسخ به تغییرات در ورودی عکس العمل و یا پاسخ نشان میدهد. زمان جهش (Rise Time)، ثابت زمانی (Time Constant) ، زمان مرده (Dead Time) ، پاسخ فرکانسی (Frequency Response) و پارامترهای درجه دوم شامل میرایی ، فرکانس رزونانس، زمان قرار (Settling time) و درصد اورشوت و همگی مشخصه های دینامیکی هستند و برای تشریح کارائی دینامیکی مبدلها مورد استفاده قرار میگیرند.

• مشخصه‌های استاتیکی

برای تعیین مشخصه‌های استاتیکی یک ترانسدیوسر، عملیات تنظیم (Calibration) انجام میشود. این آزمایشی است که برای انجام آن ، مقادیر معلوم و اندازه‌گیری شده‌ای به ترانسدیوسر اعمال و خروجی‌های مرتبط با آنها، در یک جدول یا در یک نمودار ثبت می‌شوند. معمولاً ، عملیات تنظیم ، توسط واحد کنترل کیفیت و بر روی تعدادی نمونه از ترانسدیوسرهای تولید شده انجام میگیرد.

دو نکته دیگر هم وجود دارند، که بایستی در خصوص تنظیم دستگاه رعایت شوند.

- از صحت ورودی اعمال شده بایستی اطمینان داشته باشیم. معمولاً این بدان معنی است که خود ورودی کالیبره شده است و مدارکی دال بر اینکه مقدار آن با استاندارد تعیین شده توسط اداره بین‌المللی استاندارد همخوانی دارد، موجود باشد.

- تا زمانی که دقیقاً مشخص شده باشد که عملیات تنظیم، مربوط به تعیین مشخصات استاتیکی است. پس از اعمال کمیت به ورودی، بایستی پس از ثابت شدن هرگونه تغییرات در خروجی آنرا ثبت نمود. عبارت دیگر زمانیکه خروجی بطور کامل به تغییر در کمیت ورودی پاسخ داد و پایدار شد،

بایستی مقدار خروجی ثبت بشود.

دقت (Accuracy) : یکی از مشخصه‌های استاتیکی است که، بیشتر از دیگر مشخصه‌ها مورد استفاده درست و نادرست قرار می‌گیرد. عملاً دقت بصورت درصد خطا مشخص می‌شود.

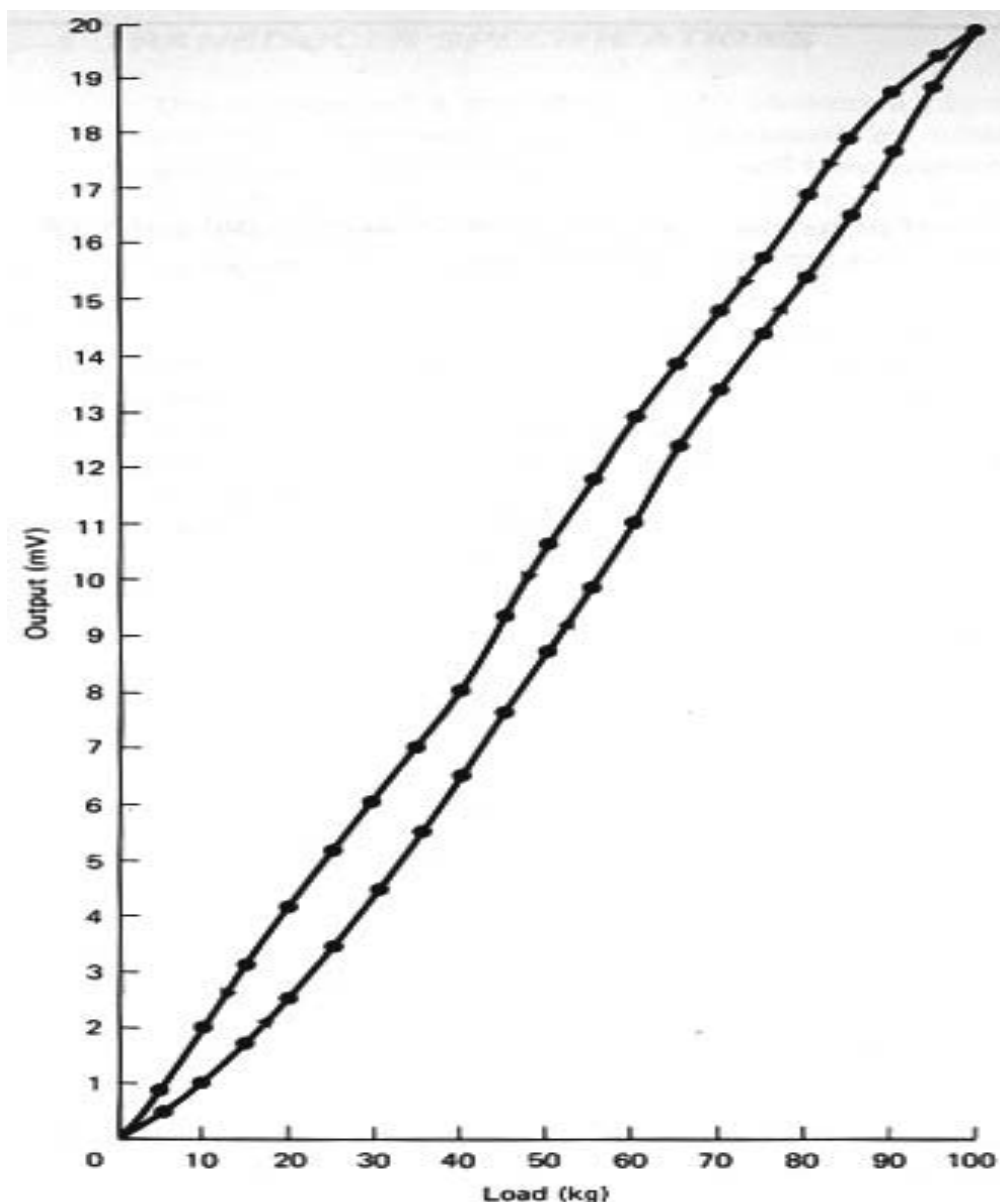
خطا اختلاف بین مقدار صحیح (درست) خروجی ترانسدیوسر و مقدار خروجی عملی آن است؛ اما معمولاً دقت بصورت درصد خطا تعریف می‌شود. سوال مهم این است که ، درصد چه چیزی؟. برای جواب به این سؤال سه پاسخ مختلف وجود دارد.

دقت ممکن است بصورت درصدی از مقیاس کامل خروجی (%FSO)، بصورت درصدی از مقدار خوانده شده (Measured Value) ویا بصورت خطای مطلق (Absolute Error) بیان شود.

مثال ۱ - نتیجه عملیات تنظیم یک سلول بار (Load Cell) (ترانسدیوسری برای اندازه‌گیری وزن مورد استفاده قرار می‌گیرد) در جدول ۱ آمده است. مطلوبست رسم منحنی عملیات تنظیم.

جدول ۱ - ثبت عملیات تنظیم مربوط به مثال ۱

بار (kg)	خروجی (mV)	
	افزایشی	کاهشی
0	0.08	0.06
5	0.45	0.88
10	1.02	2.04
15	1.71	3.10
20	2.55	4.18
25	3.43	5.13
30	4.48	6.04
35	5.50	7.02
40	6.53	8.06
45	7.64	9.35
50	8.70	10.52
55	9.85	11.80
60	11.01	12.94
65	12.40	13.86
70	13.32	14.82
75	14.35	15.71
80	15.40	16.84
85	16.48	17.92
90	17.66	18.70
95	18.90	19.51
100	19.93	20.02



شکل ۱- منحنی های کالیبراسیون یا تنظیم مربوط به مثال ۱

راه حل - در شکل ۱ ورودی در روی محورهای افقی که از صفر تا ۱۰۰ کیلوگرم مدرج شده و رسم می شوند. خروجی نیز بر روی محور عمودی که از صفر تا میلی ولت مدرج و رسم می شوند. توجه کنید که نقاط داده ها، واقعی بوده و جهت آزمایش اول بصورت افزایشی و سپس بصورت کاهشی بر روی منحنی مشخص شده اند.

مثال ۲ - مطلوبست محاسبه دقت ترانسدیوسری که نتایج عملیات تنظیم آن در جدول ۱ داده شده است. جواب را به هر دو صورت درصدی از رنج کامل خروجی و درصدی از مقدار خوانده شده و یا اندازه گیری شده ارائه دهید.

جدول ۲ - دقت برای مثال ۲

بار	خروجی صحیح (mV)	خروجی واقعی (mV)	خطای مطلق (mV)	%FSO	دقت ٪ خوانده شده
0	0	0.08	-0.08	0.4	∞
5	1.00	0.45	0.55	2.75	55.00
10	2.00	1.02	0.98	4.90	49.00
15	3.00	1.71	1.29	6.45	43.00
20	4.00	2.55	1.45	7.25	36.25
25	5.00	3.43	1.57	7.85	31.40
30	6.00	4.48	1.52	7.60	25.33
35	7.00	5.50	1.50	7.50	21.43
40	8.00	6.53	1.47	7.35	27.01
45	9.00	7.64	1.36	6.80	15.11
50	10.00	8.70	1.30	6.50	13.00
55	11.00	9.85	1.15	5.75	10.45
60	12.00	11.01	0.99	4.95	8.25
65	13.00	12.40	0.60	3.00	2.77
70	14.00	13.32	0.68	3.40	7.14
75	15.00	14.35	0.65	3.25	4.33
80	16.00	15.40	0.60	3.00	3.75
85	17.00	16.48	0.52	2.60	3.06
90	18.00	17.66	0.34	1.70	1.89
95	19.00	18.90	0.10	0.50	0.53
100	20.00	19.93	0.07	0.35	0.35
100	20.00	20.02	-0.02	-0.10	-0.10
95	19.00	19.51	-0.51	-2.55	-2.68
90	18.00	18.70	-0.70	-3.50	-3.89
85	17.00	17.92	-0.92	-4.60	-5.41
80	16.00	16.84	-0.84	-4.20	-5.25
75	15.00	15.71	-0.71	-3.55	-4.73
70	14.00	14.82	-0.82	-4.10	-5.86
65	13.00	13.86	-0.86	-4.30	-6.62
60	12.00	12.94	-0.94	-4.70	-7.83
55	11.00	11.80	-0.80	-4.00	-5.82
50	10.00	10.52	-0.52	-2.60	-5.20
45	9.00	9.35	-0.35	-1.75	-3.89
40	8.00	8.06	-0.06	-0.30	-0.75
35	7.00	7.02	-0.02	-0.10	-0.29
30	6.00	6.04	-0.04	-0.20	-0.67
25	5.00	5.13	-0.13	-0.65	-2.60
20	4.00	4.18	-0.18	-0.90	-4.50
15	3.00	3.10	-0.10	-0.50	-16.67
10	2.00	2.04	-0.04	-0.20	-10.00
5	1.00	0.88	0.12	0.60	60.00
0	0	0.06	-0.06	-0.30	∞

راه حل - برای حل این مسئله چندین کار بایستی انجام داد. اول بایستی محاسبه کنید که مقدار واقعی

خروجی چه بایستی باشد.

با فرض یک رابطه مطلوب خطی بین خروجی و ورودی.

$$V_{true} = \frac{V_{full\ scale}}{Load_{full\ scale}} * load = \frac{20mV}{100kg} * load = 0.2 \frac{mV}{kg} * load$$

پس، در هر نقطه از جدول کالیبراسیون می بایست مقدار حقیقی یا واقعی، مقدار خطای مطلق، دقت بصورت درصدی از مقدار ماکزیمم و دقت بصورت درصدی از مقدار خوانده شده را محاسبه و ثبت نمود.

این موضوع در جدول ۲ نمایش داده شده است.

نهایتاً می بایست بزرگترین مقدار خطا تعیین شود.

بزرگترین مقدار خطا بصورت درصدی از مقیاس کامل (FSO) برابر با 7.85% در 25 کیلوگرم افزایشی است، و خطا بصورت درصدی از مقدار خوانده شده 60% در 5 kg کاهش می یابد.

بوضوح اختلاف فاحش بین این دو نتیجه دیده می شود. خیلی مهم است که بدانیم تولید کننده از کدامیک استفاده کرده است. چیزی که ما در حقیقت می خواهیم بدانیم این است که چقدر عدم اطمینان در مقدار اندازه گیری شده در ورودی وجود دارد.

خطای مطلق در واحد پارامتر ورودی تعریف می شود، بنابراین دقت بر مبنای FSO% این امکان را میدهد تا خطای مطلق (Absolute Error) را محاسبه کنید. در صورتیکه اگر خطا بصورت درصدی از مقدار خوانده داده شده باشد، این امکان وجود ندارد.

مثال ۳ - یک سلول بار دارای ظرفیت رنج کامل 20 میلی ولت در 100 kg است. کالیبراسیون دقت 7.85%+ را در مبنای FSO نشان داده است. مطلوب است محاسبه خطای مطلق.

راه حل - خطای مطلق برابر است با 7.85%+ از مقدار 100 کیلوگرم یا 7.85 kg

بنابراین خروجی ممکن است به اندازه 7.85%+، از مقدار 20 میلی ولت و یا 1.57 میلی ولت عدم دقت داشته باشد.

با مقایسه این داده با جدول کالیبراسیون 2 در 25 کیلوگرم افزایش مقدار عملی خروجی 3.43 میلی ولت است. بر مبنای محاسبات بالا مقدار واقعی صحیح حدود 1/57+ با این مقدار اختلاف دارد.

بنابراین مقدار واقعی

$$3.43 + 1.57 = 5\ mV$$

و

$$3.43 - 1.57 = 1.86\ mV$$

است. بر مبنای جدول 2 مقدار واقعی 5 mV است.

این نوع آنالیز و محاسبه خطای مطلق را نمی توان با دقت بر مبنای مقدار خوانده شده بدست آورد.

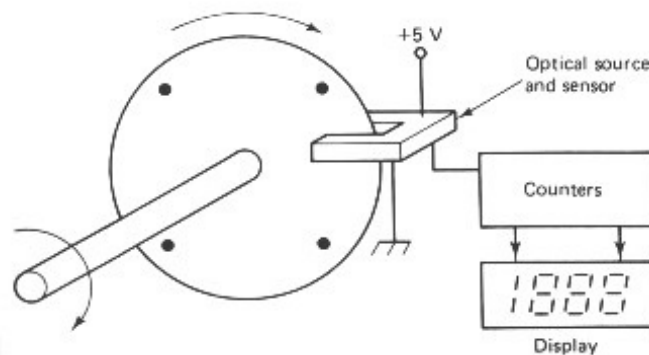
خطای خیلی مهم وقتی پیش می آید که، دو نوع دقت، بصورت درصدی از رنج کامل و یا بصورت درصدی از مقدار اندازه گیری شده را با هم اشتباه کنیم.

مثال ۴ - لازمست گشتاور اعلام شده بوسیله محور یک موتور هیدرولیکی را با دقت مورد نظر 0.1 ft-lb اندازه گیری کنیم. ماکزیمم گشتاور اصلی اعمال شده 20 ft-lb است. یک ترانسدیوسر با رنج کامل 100 ft-lb و دقت 0.2% در دسترس است. آیا می توان از این ترانسدیوسر استفاده کرد؟

راه حل - مقدار خطای مطلق ترانسدیوسر 0.2% از مقدار 100 ft-lb است که مساویست با 0.2 ft-lb. مقدار خطای مورد نیاز 0.1 ft-lb است. بنابراین این ترانسدیوسر بدرد نمی خورد. خیلی امکان دارد که مقدار بالا را درصد مقدار اندازه گیری ترجمه کرده که در این صورت خطای 0.2% از مقدار 20 ft-lb مساوی 0.04 ft-lb است که اشتباه است. خیلی مراقب باشید که مشخصه های دقت داده شده به وسیله سازنده را بطور صحیح ترجمه و بکار بگیرید.

صحت (Percision) ، حساسیت و یا قدرت تفکیک پذیری (Resolution) : کوچکترین تغییر در ورودی ترانسدیوسر است که باعث تغییر در خروجی می شود. این مقدار به شما می گوید که تا چه اندازه نزدیک می توانید ورودی را اندازه گیری کنید.

اینکودر نوری شکل زیر دارای چهار سوراخ است. هر زمان محور 1/4 دور بچرخد پرتو نور برای مدت کوتاهی به گیرنده نوری تابیده می شود. این موضوع تولید یک پالس می کند، که می تواند شمرده شود. تعداد پالس های شمارش شده، معین کننده مقداری است که محور چرخیده است. در این نمایش ساده قبل از آنکه خروجی (مقداری که نمایش داده می شود) یک شماره عوض شود، محور بایستی 90° درجه بچرخد. بنابراین این اینکودر دارای یک رزولوشن 90° درجه است. اینکودرهای نوری صنعتی 100 تا 1000 پالس در هر دو ، ح ، خش ، تولید می کنند.



شکل ۲- اینکودر نوری ساده

از کامپیوتر در کنترل فرایندهای صنعتی بطور وسیعی استفاده می شود. تعداد بیت های تولید شده بوسیله یک مبدل آنالوگ به دیجیتال (A/D) تعیین کننده قدرت تفکیک نهائی اندازه گیری به عمل آمده می باشد.

قدرت تفکیک یک مبدل آنالوگ به دیجیتال مساویست با

$$\text{Resolution} = 1/2^n$$

که در آن n تعداد بیت های یک عدد باینری است. بنابراین یک مبدل 8 بیتی می تواند قدرت تشخیص یک در 2⁸ یا 256 داشته باشد. یک مبدل 10 بیتی می تواند یک سیگنال آنالوگ را به 1024 تقسیم کند. به همین ترتیب یک مبدل 12 بیتی، قدرت تفکیک برابر با 4096 دارد.

مثال ۵ - یک پره بطول 2.5 m به آهستگی بر روی محیط در یک دایره می چرخد. موتور و گیربکس به مرکز پره متصل شده اند. لازمست موقعیت نوک پره با حساسیت 2 سانتی متر معلوم باشد. قدرت تفکیک اینکودر نوری متصل به محور پره چقدر باشد تا این امر میسر باشد؟ فرض کنید که اینکودر مستقیماً و بدون هیچ گیربکسی به محور پره متصل شده باشد.

حل - محیط دایره با قطر 2.5 متر مساویست با

$$c = \pi d = \pi(2.5 \text{ m}) = 7.854 \text{ m}$$

با استفاده از نسبت و تناسب بدست می آوریم

$$\text{arc} = \frac{(360^\circ)(2\text{cm})}{785.4\text{cm}} = 0.917^\circ \Rightarrow \frac{\text{arc}}{360^\circ} = \frac{2\text{cm}}{785.4\text{cm}}$$

بنابراین اینکودر بایستی قادر به تشخیص 0.917° درجه باشد. بنابراین اینکودر بایستی دارای

$$\frac{360^\circ}{0.917^\circ} = 392.6$$

پالس در هرد دور چرخش باشد. البته اینکودر با تعداد پالس در دور بیشتر، حساسیت بهتری را ارائه می دهد. بنابراین بایستی از یک اینکودر با 392.6 پالس در دور و یا بیشتر استفاده نمود.

مثال ۶ - از یک ترانسدیوسر حرارت با مشخصه خروجی $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ برای اندازه گیری درجه حرارت یک کوره که از ۰ تا 100°C تغییر می کند استفاده شده است. آیا می توان از یک مبدل آنالوگ به دیجیتال 8 بیتی با دامنه کامل ورودی 5 ولت استفاده کرده و حساسیت 1°C را داشت؟

راه حل - یک مبدل 8 بیتی دارای یک قسمت در 2^8 یا 256 قسمت حساسیت است. بنابراین با 5 ولت

$$\text{ورودی دامنه کامل هر بیت دارای ارزش } \frac{5\text{V}}{256} = 19.5\text{mV} \text{ است.}$$

یک درجه سانتی گراد فقط 10 mV تغییر در ورودی ایجاد می کند. بنابراین به نظر می رسد که مبدل دارای حساسیت کافی نیست.

$$\frac{10\text{mV}}{^\circ\text{C}} \times 100^\circ\text{C} = 1\text{V} \quad \text{در ماکزیمم درجه حرارت خروجی ترانسدیوسر برابر است با:}$$

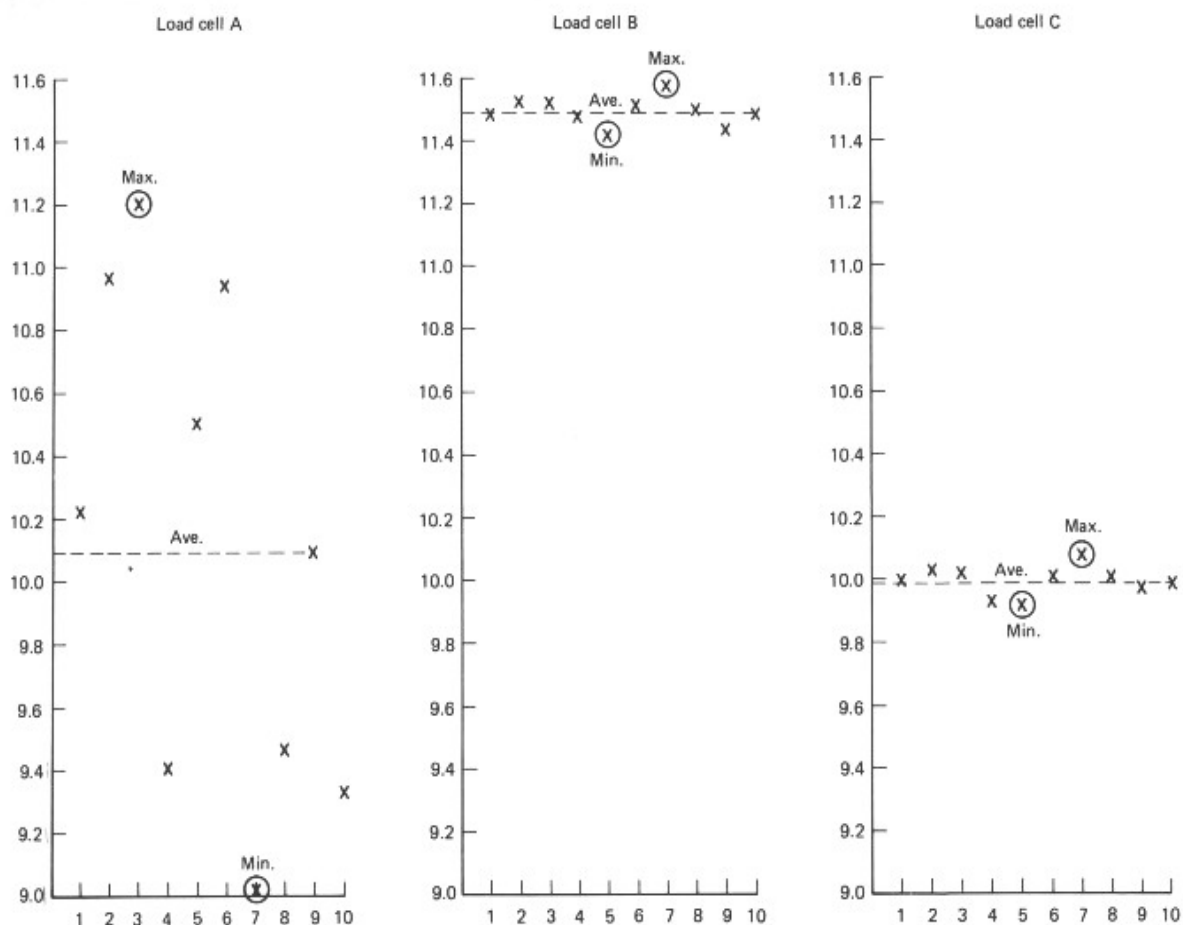
این مقدار نزدیک به دامنه ماکزیمم ورودی مبدل نمی باشد. بنابراین راه حل موجود، تقویت خروجی ترانسدیوسر به اندازه 5 برابر است، در این حالت در 100 درجه سانتی گراد، 5 ولت تولید می شود که با رنج کامل ورودی تطبیق می نماید. یک درجه سانتی گراد اکنون $V = 10^\circ\text{C} * 10 \text{ mV}/^\circ\text{C} * 5 = 50 \text{ mV}$ چون حساسیت مبدل آنالوگ به دیجیتال 19.5 mV است، ترانسدیوسر می تواند 0.39°C را تشخیص دهد.

تکرار پذیری (Repeatability): نشان دهنده این است که تا چه اندازه مقدار خروجی یک ترانسدیوسر، در پاسخ به چندین بار اعمال یک ورودی تغییر می کند و در واقع به مقدار اصلی خود بر می گردد. مواظب باشید که قابلیت تکرار پذیری را با دقت اشتباه نکنید. این دو مشخصه در مثال 7 با هم مقایسه شده اند.

مثال ۷ - سه سلول بار مشابه مثال ۱، برای قابلیت تکرار پذیری آزمایش شده‌اند. یک وزنه 50 kg، 10 مرتبه روی هر کدام از آنها قرار داده شده است. داده‌های نتیجه در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. این داده‌ها را رسم کرده و قابلیت تکرار پذیری و دقت هر ترانسدیوسر را تشریح کنید.

جدول ۳- آزمایش تکرار پذیری برای مثال ۷

شماره آزمایش	Load cell (mV)		خروجی C
	A	B	
1	10.02	11.50	10.00
2	10.96	11.53	10.03
3	11.20	11.52	10.02
4	9.39	11.47	9.93
5	10.50	11.42	9.92
6	10.94	11.51	10.01
7	9.02	11.58	10.08
8	9.47	11.50	10.00
9	10.08	11.43	9.97
10	9.32	11.48	9.98
ماکزیمم	11.20	11.58	10.08
میانگین	10.09	11.49	9.99
می نیمم	9.02	11.42	9.92



شکل ۳ - رسم داده‌های مربوط به تکرار پذیری مثال ۷

راه حل - شکل ۳ نمایش رسم آزمایش سه سلول بار است.

سلول بار A دارای مقادیری است که بصورت گسترده‌ای پخش شده‌اند. متوسط این نتایج خیلی نزدیک به مقدار درست است اما نتایج بطور وسیعی از هم فاصله دارند. پس سلول بار A یک سلول بار از نوع دقیق است اما تکرار پذیر نمی باشد.

تمام نتایج سلول بار B بهم نزدیک هستند اما حول میانگین اشتباهی قرار دارند. این ترانسدیوسر قابلیت تکرار پذیری دارد اما دقیق نیست.

سلول بار C دارای نتایجی است که نزدیک به هم و نزدیک مقدار صحیح هستند. این همان سلول باری است که شما می‌خواهید. این ترانسدیوسر هم تکرار پذیر است و هم دقیق.

یک ترانسدیوسر که تکرارپذیر است اما چندان دقیق نمی باشد نیز می‌تواند در اندازه‌گیری و کنترل مورد استفاده قرار گیرد. چنانچه ترانسدیوسری تکرار پذیر باشد، شما می‌توانید نتایج یکسانی بدست آورید. می‌توانید این مقدار غلط را بوسیله یک آمپلی‌فایر یا تضعیف کننده به مقدار صحیح تقویت و یا تنظیم کنید. این تنظیم الکتریکی (که تنظیم صفر و پهنا (zero and span) نامیده می‌شود) سیگنالی تولید می کند که هم قابل تکرار و هم دقیق است.

بین چگونگی تعریف عددی قابلیت تکرار پذیری اختلاف نظری وجود دارد. بعضی‌ها تکرارپذیری را بصورت

$$\text{تکرار پذیری} = \frac{\text{کمترین} - \text{بیشترین}}{\text{رنج کامل}}$$

و دیگران به صورت

$$\text{تکرار پذیری} = \frac{\text{میانگین} - \text{بیشترین انحراف}}{\text{رنج کامل}}$$

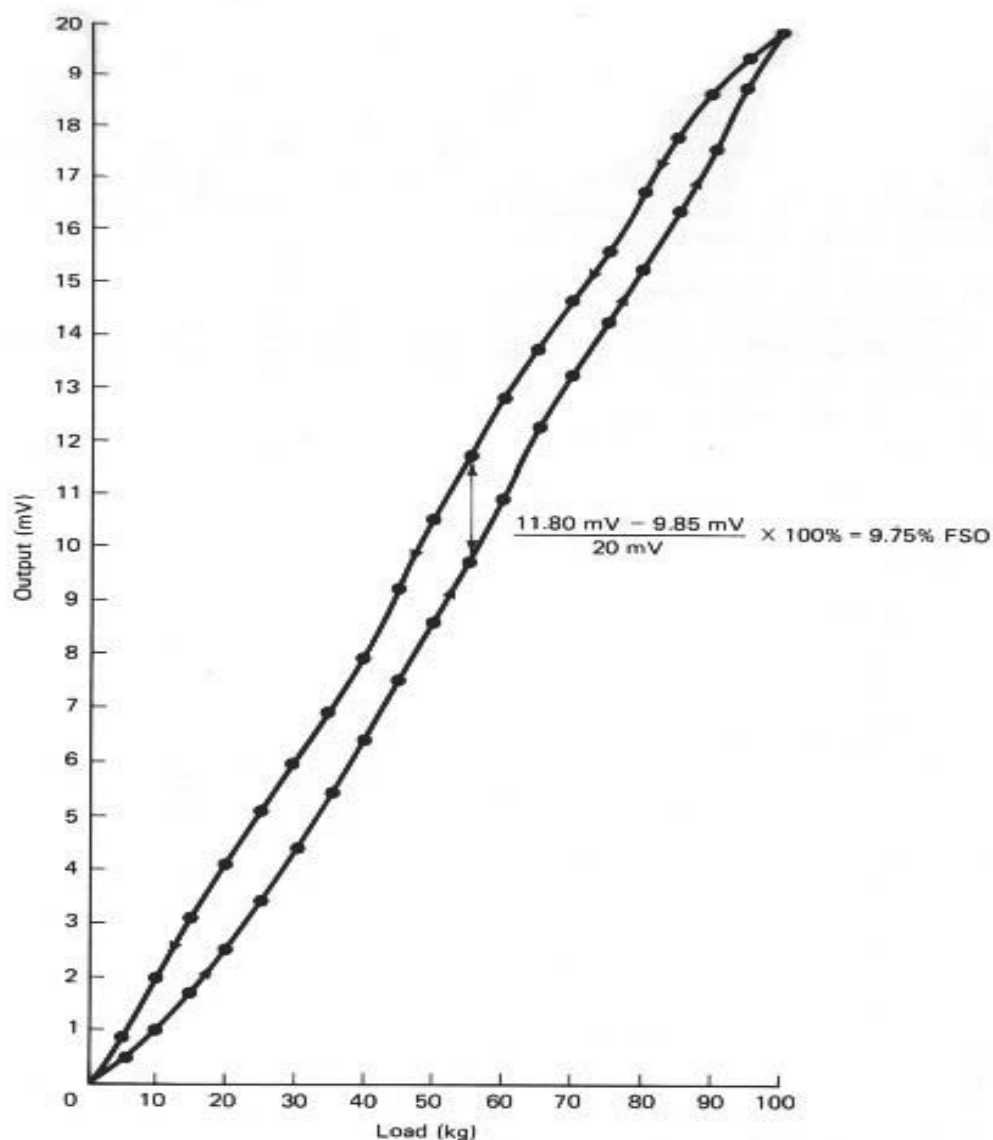
تعریف می نمایند.

که در آن اختلاف ماکزیمم مقداری است که از مقدار متوسط بیشترین فاصله را دارد چه از بالا و چه از پایین. پس وقتی از مشخصه قابلیت تکرارپذیری استفاده می کنید، حتما باید بدانید که تولید کننده چگونه این عدد داده شده را محاسبه کرده است.

هیستریزیس Hysteresis: نشانه‌ای از قابلیت تکرار خروجی ترانسدیوسر است. ممکن است ورودی در روند افزایشی، خروجی متفاوتی نسبت به وقتی که روند کاهشی را طی می کند تولید کنند. به همین دلیل دو سری عملیات تنظیم کردن انجام می‌شوند؛ یکی برای حالت افزایشی و دیگری برای حالت کاهشی.

به شکل ۴ توجه کنید. با اضافه کردن وزن بر روی سلول بار، به وزن 55 kg می‌رسیم که خروجی آن 9.85 mV است. حال اگر پس از اینکه سلول بار به بارنهائی‌اش رسید وزنه را کم کنیم تا به 55 kg برسیم، ترانسدیوسر 11.80 mV را در خروجی نشان می‌دهد. برای محاسبه هیستریزیس، بایستی اختلاف بین خروجی‌ها را در حالت افزایش و کاهشی در هر نقطه از جدول کالیبراسیون بدست آورد (جدول 1) و بزرگترین مقدار را بصورت درصدی از خروجی ماکزیمم ثبت نمود.

هیستریزیس به دلیل مکانیزم فیزیکی ترانسدیوسر و در برداشتن مقداری از یک نتیجه ورودی قبلی اعمال شده بوجود می‌آید. بنابراین مقدار پسماند بستگی به دامنه ورودی قبلی دارد، در آزمایش‌ها، بایستی ورودی را قبل از کاهش دادن تا انتهای درجه‌بندی نهایی اضافه نمائید. در عمل، اگر ورودی ترانسدیوسر به انتها برده نشود، پسماند حاصل کمتر از مقدار تعیین شده خواهد شد.



شکل ۴ - پسماند

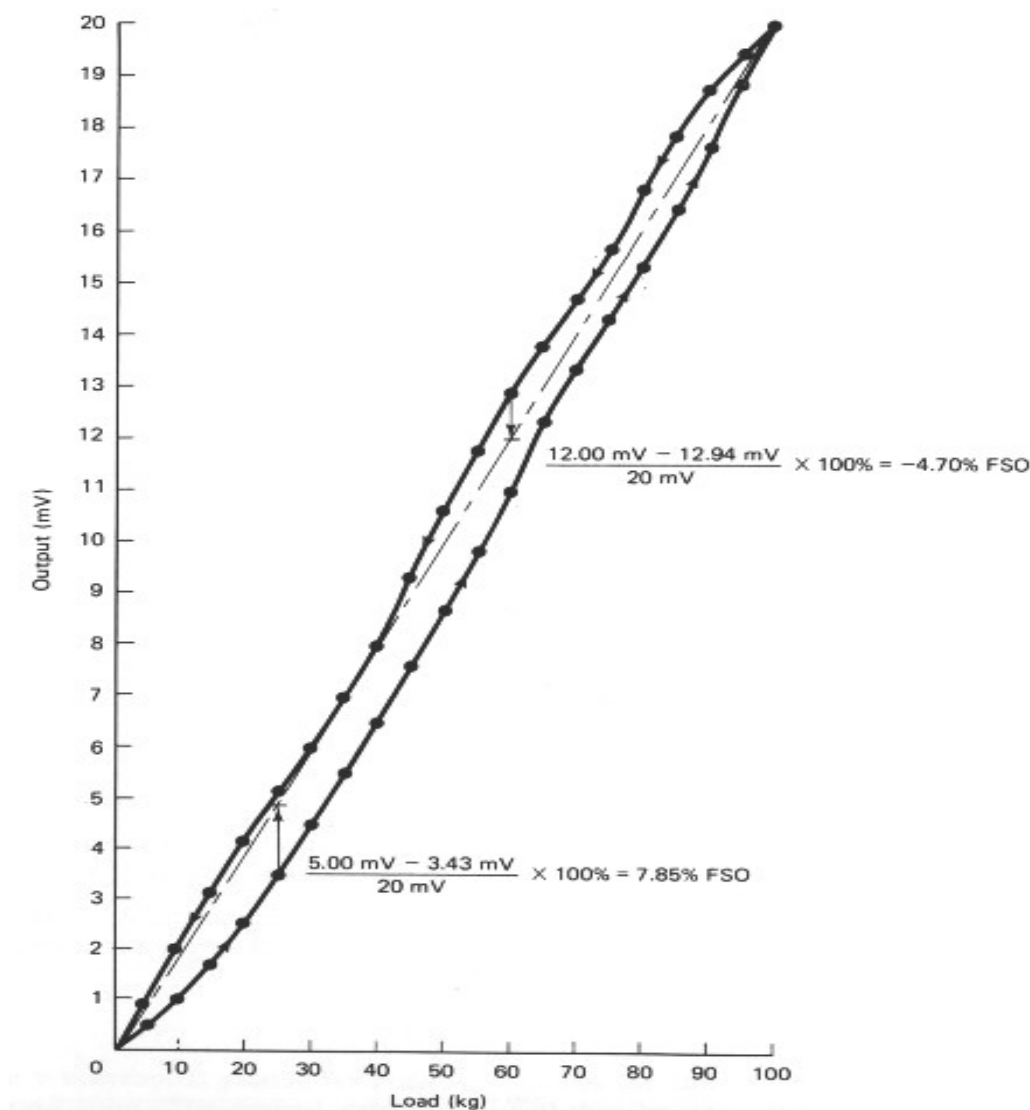
همچنین بخاطر داشته باشید که پسماند یک مشخصه استاتیکی است. داده در هر زمان برای یک نقطه برداشته می‌شود آنهم وقتی که خروجی ترانسدیوسر بحالت پایدار خودش رسید. اینرسی و اصطکاک یا زبری باعث اثر مشابهی می‌شوند که مشابه پسماند به نظر می‌رسد. بنابراین اگر ورودی را تغییر دهید و اجازه ندهید خروجی به حالت پایدارش برسد، قبل از آنکه به نقطه ورودی بعد بروید، ممکن است اینرسی و اصطکاک باعث تأخیری در خروجی شوند. نتیجتاً منحنی انتقالی ترانسدیوسر ورودی بازاء خروجی مشابه پسماند بنظر می‌رسد. این تشابه وقتی شدیدتر به نظر می‌رسد که شما سرعت تغییرات ورودی را افزایش دهید. که این پسماند نیست.

در حالت ایده آل منحنی انتقالی یک ترانسدیوسر یک خط مستقیم است. تغییر مشخصی در ورودی اثر یکسانی در خروجی خواهد داشت، چه خروجی در 25% مقدار ماکزیمم و یا 75% مقدار ماکزیمم خروجی باشد.

خاصیت خطی بودن (Linearity): سه روش معمول برای تعیین خاصیت خطی بودن عبارتند از: خطی بودن نقاط انتهائی، خطی بودن خطوط مستقیم غیر وابسته و روش کمترین مربعات (که بهترین تشابه و یا خطی سازی حدی نیز خوانده می شوند).

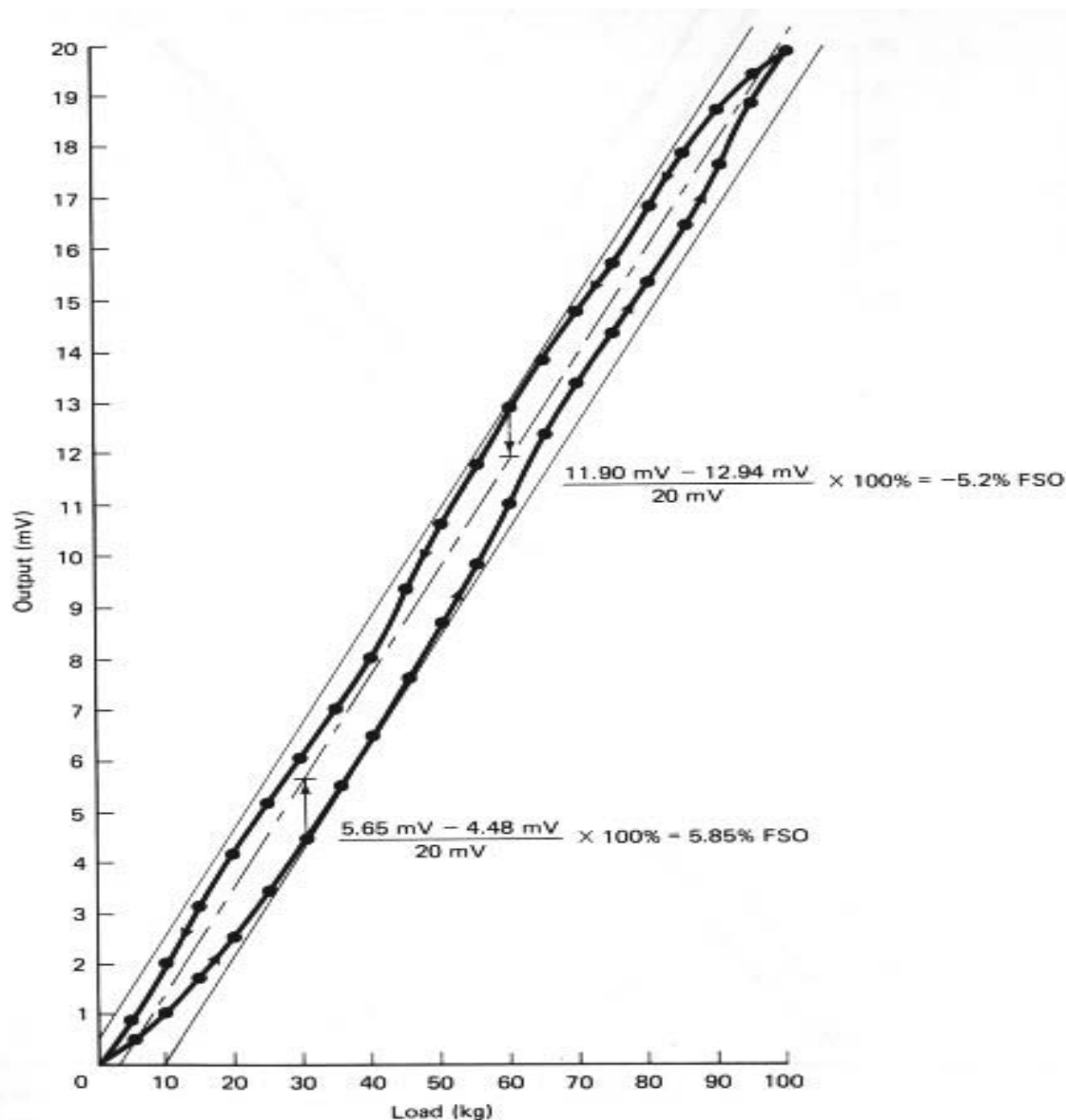
برای حالت خطی بودن نقاط انتهائی، یک خط مستقیم بین دو نقطه انتهائی منحنی کالیبراسیون رسم می کنیم. اگر از مقادیر تئوری صفر و درجه بندی کامل ورودی و خروجی استفاده شود، عدد نتیجه شکل خطی تئوری نامیده می شود.

می توانید ماکزیمم انحراف منحنی از بالا و پائین خط مستقیم را حساب کرد. این مقادیر بصورت $\pm \%$ و $\%$ - از خروجی در رنج کامل تعریف شده اند. به شکل ۵ و جدول ۲ توجه کنید



شکل ۵ - خطی بودن نقاط انتهائی

برای محاسبه خطی بودن خط مستقیم غیر وابسته، بایست دو خط موازی رسم کنید که درست منحنی کالیبراسیون را احاطه کنند. خط مستقیم غیر وابسته ما بین این دو حد رسم می شود. می توانید ماکزیمم انحراف از این خط مرکزی مستقیم را بصورت \pm ___ % و $-$ ___ % از درجه بندی کامل بدست آورید و ثبت نمائید. به شکل ۶ توجه کنید.



شکل ۶ - خطی بودن خطوط مستقیم غیر وابسته

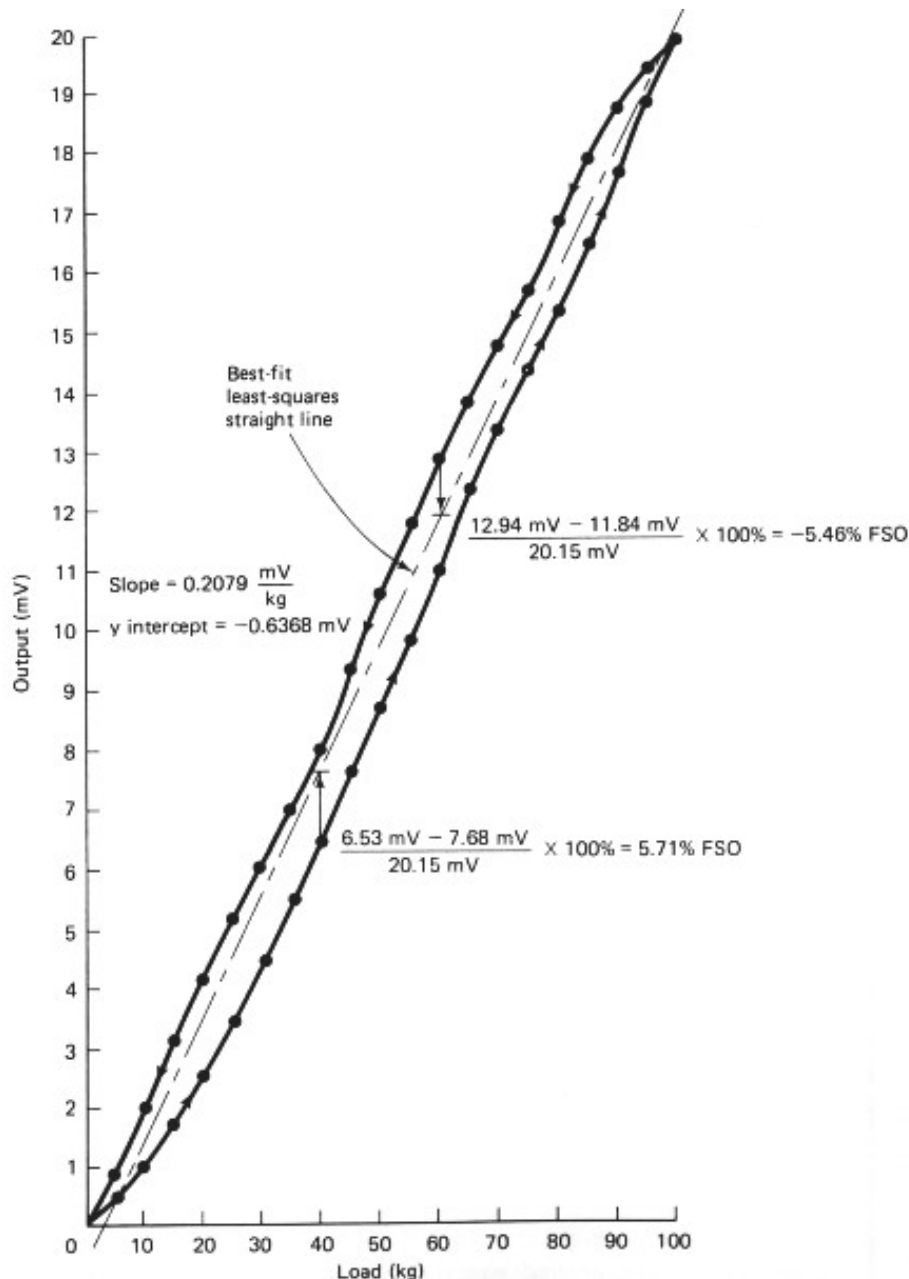
خطی بودن کمترین مربعات، توسط یک خط مستقیم که از روش آماری بدست آمده اندازه گیری می شود. این خط مستقیمی است که مجموع مجذور فاصله ها (خطا) از آن کمترین و یا مینیمم است. با داشتن یک مجموعه از جفت X, Y ها که داده های کالیبراسیون هستند (ورودی محور X و خروجی محور Y است)، می توانید معادله خط مستقیمی را محاسبه کنید که کمترین خطا را داشته باشد.

شیب خط راست $m =$ ، مقادیر خروجی $y =$ ، مقادیر ورودی $x =$

تعداد نقاط داده $n =$ ، عرض از مبدا خط راست $b =$

$$m = \frac{n \sum(xy) - \sum x \sum y}{n \sum(x^2) - (\sum x)^2}, \quad b = \frac{\sum y}{n} - m \frac{\sum x}{n}$$

محاسبه شیب و عرض از مبدا بهترین خط مستقیم، ممکن است کمی مشکل بنظر برسد؛ اما بیشتر ماشین حساب ها دارای برنامه داخلی هستند و یا می توان آنها را به نحوی برنامه ریزی کرد تا b و m را پس از وارد کردن تمام نقاط داده شده تعیین نمایند.



شکل ۷ - خطی بودن کمترین مربعات

مثال ۸ - با استفاده از داده های جدول ۱ مطلوب است محاسبه و رسم بهترین خط مستقیم و محاسبه خاصیت خطی بودن.

راه حل - چون منحنی کالیبراسیون دارای ۲۱ نقطه در حالت افزایشی و ۲۱ نقطه در حالت کاهش می باشد، در حقیقت ۴۲ نقطه داده را بایستی وارد کنیم. با استفاده از این داده ها خواهیم داشت:

$$m = 0.2079, \quad b = -0.6368 \text{ mV}$$

محل برخورد با محور V را در شکل ۷ رسم کرده و سپس با استفاده از شیب، نقطه دوم قابل محاسبه است. خط مستقیم مورد نظر را می توان بوسیله این دو مقدار رسم کرد. معادله خط به صورت زیر است:

$$V_{\text{out}} = \left(0.2079 \frac{\text{mV}}{\text{kg}} \right) \times I_{\text{input}} - 0.6368 \text{ mV}$$

برای تشخیص خطی بودن، مقادیر خط مستقیم را برای هر نقطه از جدول ۱ محاسبه کرده و این مقادیر را با مقادیر عملی مقایسه نمایید. بزرگترین اختلاف در 40 kg ورودی و 60 kg ورودی است بنابراین

$$\% \text{linearity} = \frac{+1.15 \text{ mV}}{20.15 \text{ mV}} \times 100\% = 5.71\%$$

9

$$\% \text{linearity} = -\frac{1.10 \text{ mV}}{20.15 \text{ mV}} \times 100\% = -5.46\%$$

$$= 5.71\% - 5.46\% \text{ FSO}$$

• مشخصات دینامیکی

تمام مشخصه‌هایی که در قسمت قبل ارائه شدند مشخصه‌های استاتیکی بودند. ورودی به ترانسدیوسر اعمال شده اجازه داده می شد تا سیستم پاسخ داده و پایدار شود و سپس خروجی اندازه گیری می شد.

در حقیقت، اگر ترانسدیوسر وقتی که مقادیر را ثبت می کنیم پاسخ کامل نداده باشد، داده‌های اشتباهی بدست خواهند آمد. هر چند، به ندرت ترانسدیوسرها در یک وضعیت استاتیک مورد استفاده قرار می گیرند. هدف از استفاده از ترانسدیوسر آن است که تغییرات ورودی اش را احساس نموده و آنها را به کنترل کننده ای که کارائی سیستم را کنترل می کند تحویل دهد. بنابراین اینکه ترانسدیوسر با چه سرعتی به تغییرات ورودی اش پاسخ می دهد، اهمیت دارد. به این مشخصه ها پاسخ های دینامیکی گفته می شود.

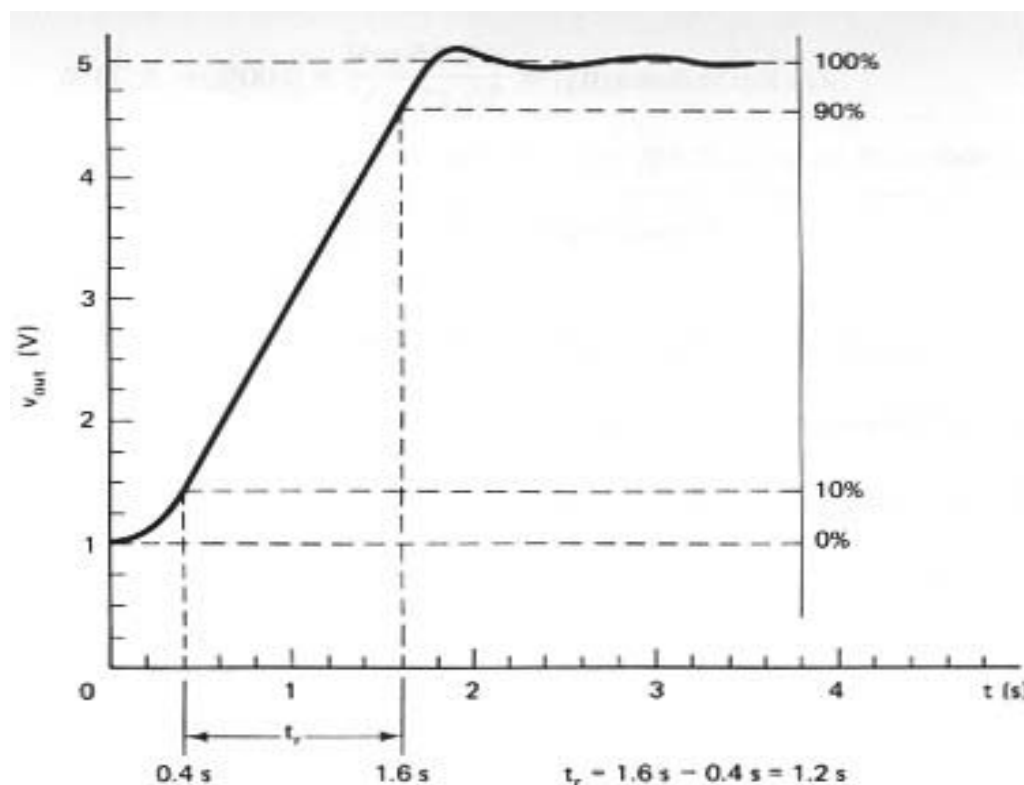
عملکرد دینامیکی یک ترانسدیوسر را می توان به دو طریق تشریح نمود. پاسخ ترانسدیوسر به تغییر پله در ورودی اش، بوسیله زمان جهش، ثابت زمانی، و زمان مرده تعریف می شود.

اگر ترانسدیوسر دارای مشخصه ای از نوع درجه دوم باشد، ضریب میرایی، فرکانس رزونانس و زمان پاسخ یا درصد جهش ممکن است داده شوند.

نوع دوم مشخصه های دینامیکی بصورت پاسخ ترانسدیوسر به ورودی سینوسی تعریف می شود. ممکن است منحنی پاسخ فرکانس و فرکانس قطع بالا مشخص بشوند.

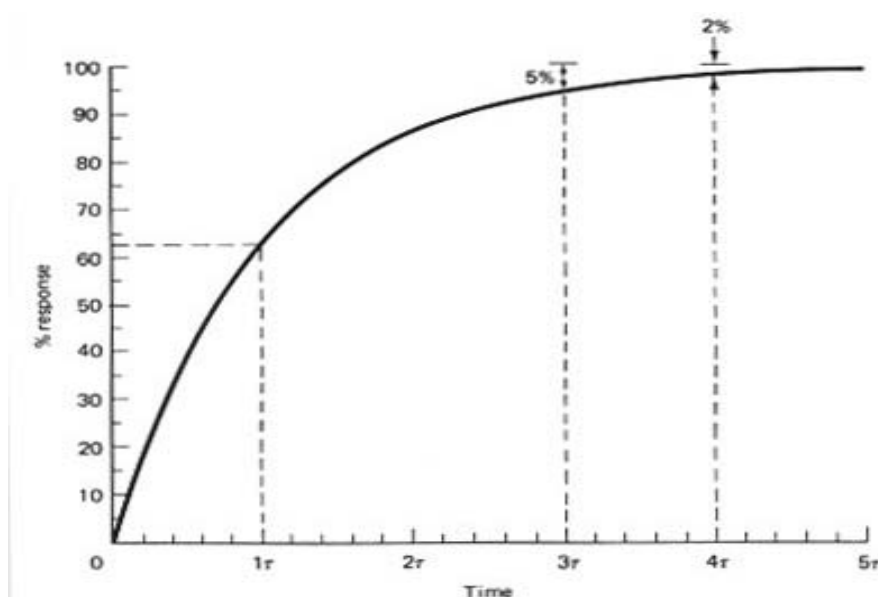
پاسخ المانهای درجه اول و درجه دوم دارای پارامترهای کلیدی زیر هستند.

زمان جهش مدت زمانی است یک پله به ورودی اعمال شده باشد و خروجی از 10% به 90% پاسخ کامل برسد. این موضوع در شکل ۸ رسم شده است.



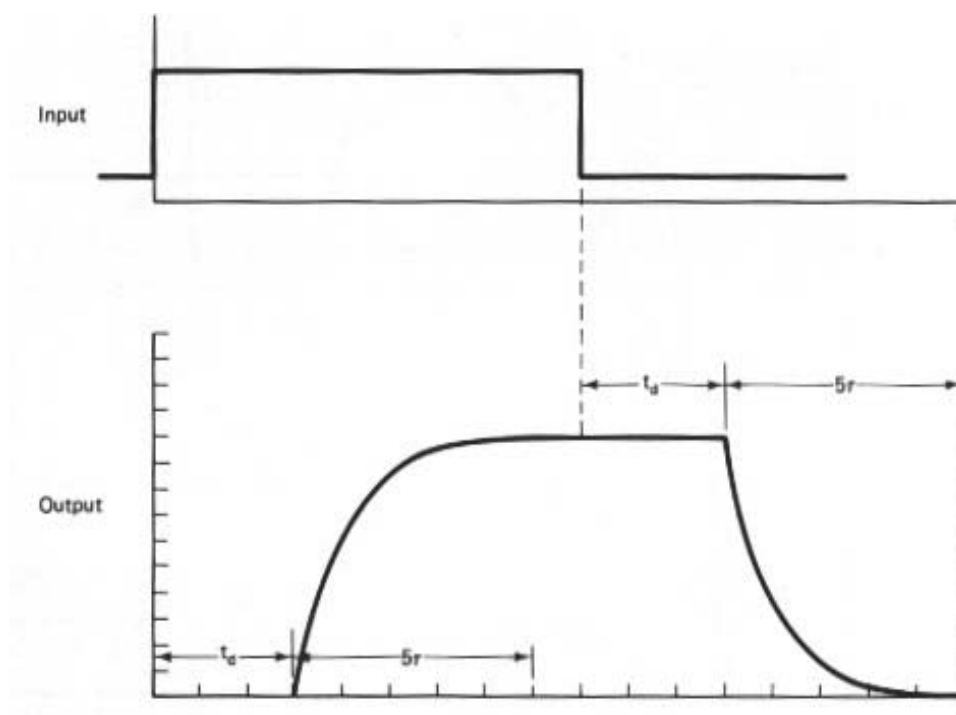
شکل ۸ - زمان جهش

ثابت زمانی معمولاً برای المانهای درجه اول بکار برده می شود و عبارت است از زمانی که خروجی به 63.2% مقدار ماکزیمم ممکن برسد. پس از سه ثابت زمانی معمولاً خروجی در 5% مقدار نهایی و پس از ۴ ثابت زمانی در 2% مقدار نهایی اش است. پاسخ معمولاً پس از ۵ ثابت زمانی کامل در نظر گرفته می شود. این موضوع در شکل ۹ رسم شده است.



شکل ۹ - ثابت زمانی

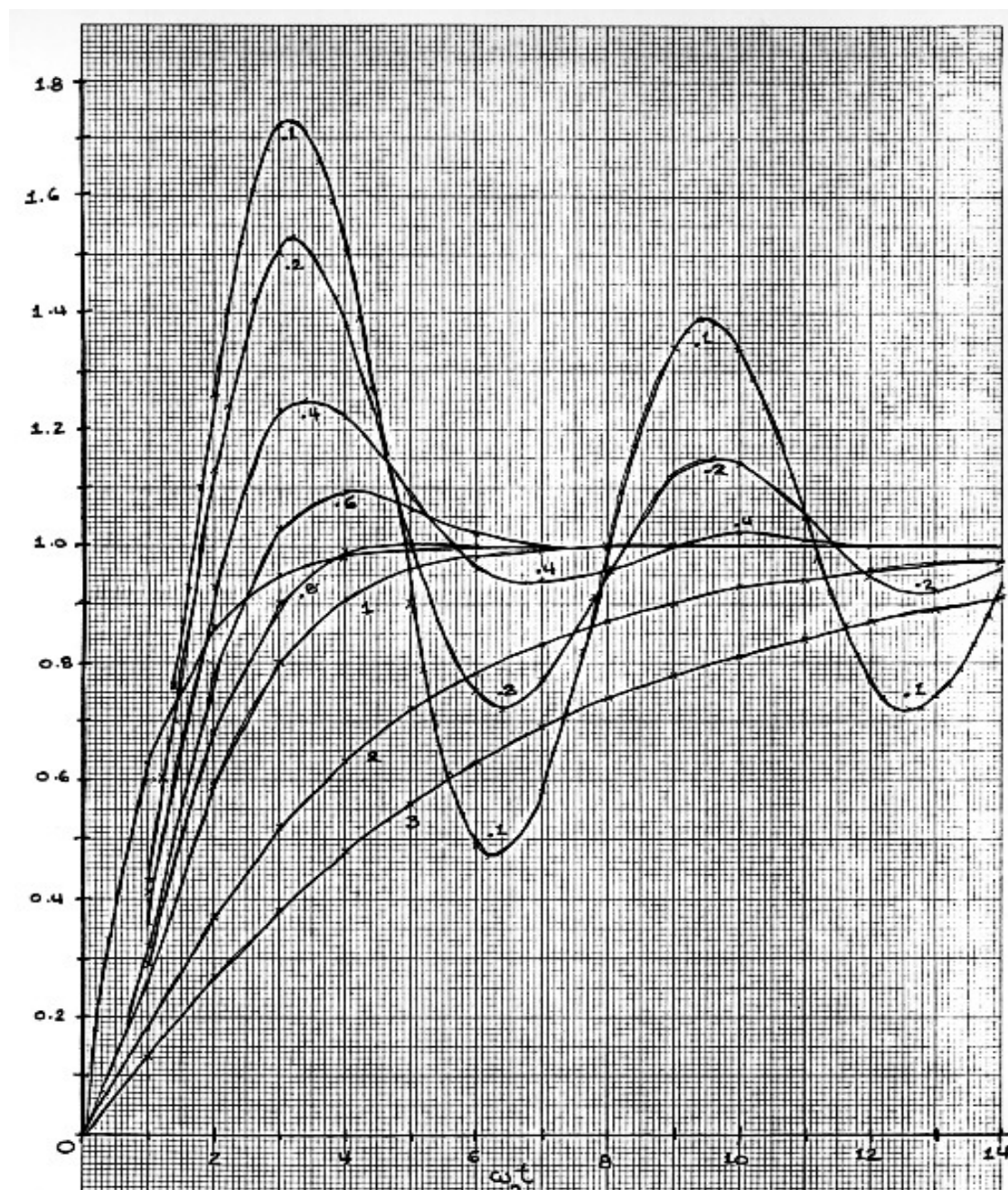
زمان مرده مدت زمانی است که طول می کشد تا پس از اعمال تغییر پله به ورودی، خروجی ترانسدیوسر شروع به تغییر کند. پاسخ ترانسدیوسر به همراه زمان مرده و ثابت زمانی (درجه اول) در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ - پاسخ زمانی یک ترانسدیوسر دارای ثابت زمانی و زمان مرده

المانهای درجه اول معمولاً بوسیله ثابت زمانی شان مشخص می شوند مانند شکل ۹. پاسخ دینامیکی ترانسدیوسرهای با تابع انتقال درجه دوم بوسیله ضریب میرایی و فرکانس رزونانس تعریف یا مشخص می شوند. ضریب میرایی و فرکانس رزونانس شکل پاسخ زمانی یک ترانسدیوسر درجه دوم را به یک پله در ورودی مشخص می کنند.

به شکل ۱۱ توجه کنید. محور عمودی % پاسخ است. تمام منحنی ها به ۱ (یا 100%) رسیده اند. محور افقی دارای واحد $\omega_n t$ است. برای مدرج کردن آن بر حسب ثانیه بایستی هر عدد را بر فرکانس طبیعی رزونانس مربوط به ترانسدیوسر (ω_n) تقسیم کرد. هر منحنی دارای ضریب میرایی (ξ) متفاوتی است. برای ترانسدیوسر داریم:



شکل ۱۱- پاسخ پله (نرمالیزه شده)

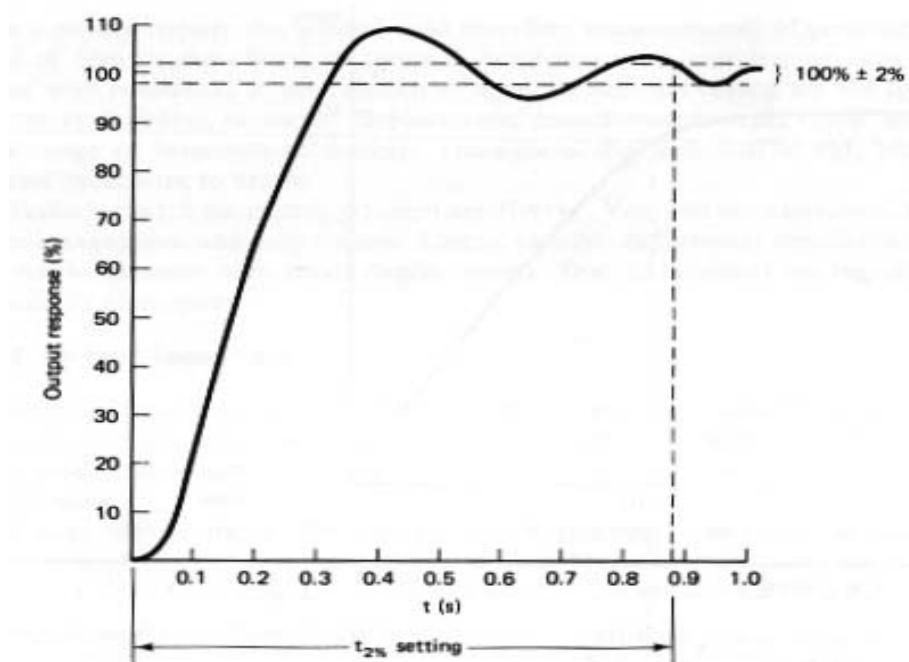
خیلی میرا	آنگاه	$\xi > 1$
میرایی بحرانی	آنگاه	$\xi = 1$
زیر میرا	آنگاه	$\xi < 1$

اورشوت در حالت زیر میرایی ترانسدیوسر اتفاق می افتد. درصد اورشوت اندازه ای است از پیک اولیه، البته چنانچه آنرا با مقدار شرایط پایدار مقایسه کنیم:

$$\% \text{ overshoot} = \frac{m_p - \text{steady state}}{\text{steady state}} \times 100\%$$

این مقدار مستقیماً به ضریب میرایی ربط دارد.

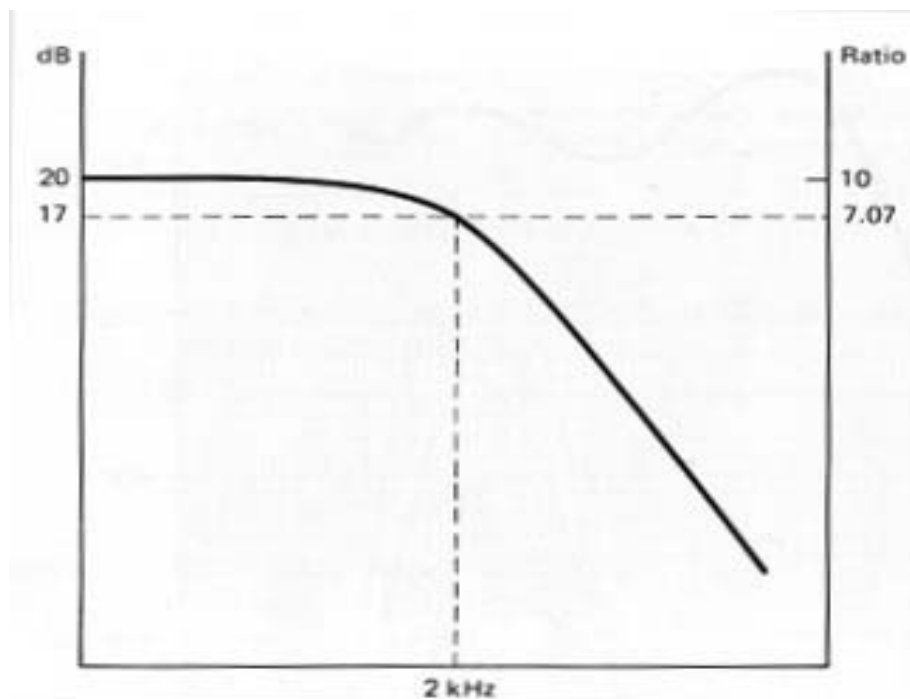
اما چه مدت بایستی صبر کرد تا ترانسدیوسر خروجی مفیدی بدهد؟ زمان پایدار شدن به شما نشان خواهد داد. زمان پایداری 2% عبارت است از زمانی که طول می کشد تا پس از اعمال ورودی پله، خروجی ترانسدیوسر پایدار شده و در یک محدوده $\pm 2\%$ مقدار نهائی اش قرار گیرد. این موضوع در شکل ۱۲ رسم شده است.



شکل ۱۲- زمان قرار

پاسخ فرکانسی و فرکانس قطع بالا دو مشخصه دیگر هستند که پاسخ ترانسدیوسر را به یک موج سینوسی در ورودی اش می دهند.

برای یک ترانسدیوسر نسبتاً خطی، ورودی سینوسی، خروجی سینوسی ایجاد می کند. همچنانکه فرکانس بالا می رود بایستی ترانسدیوسر سریعتر و سریعتر پاسخ بدهد تا اینکه کم کم، دیگر ترانسدیوسر نمی تواند همگام با سرعت تغییرات ورودی پاسخ دهد و نتیجتاً خروجی ترانسدیوسر کوچک می شود. بنابراین با افزایش فرکانس، دامنه خروجی کمتر و کمتر می شود. این کاهش دامنه خروجی با افزایش فرکانس ورودی را پاسخ فرکانسی می گویند و آن را مانند شکل ۱۳ روی نمودار پاسخ فرکانسی نشان می دهند. محور عمودی بهره ترانسدیوسر است که بسادگی نسبت خروجی به ورودی است هر چند غالباً بهره بر حسب dB رسم می شود.



شکل ۱۳- منحنی پاسخ فرکانسی

$$\text{dB} = 20 \log \frac{\text{output}}{\text{input}}$$

محور افقی به صورت لگاریتمی مدرج شده نه خطی، تا بتوان فرکانس وسیع تری را نمایش داد. فرکانس قطع (high frequency cutoff) (f_h) فرکانسی است که در آن بهره ترانسدیوسر به مقدار 0.707 مقدار اولیه اش در فرکانس کم پایدار، افت می کند. اگر محور عمودی بر حسب dB مدرج شده باشد، f_h زمانی است که بهره با اندازه 3 dB - افت کند.

چون یک ترانسدیوسر معمولاً به ندرت دارای ورودی سینوسی می باشد، غالباً فرکانس قطع را به زمان جهش

$$\text{بوسیله رابطه زیر مربوط می کنند. } t_r = \frac{0.35}{f_h}$$

بنابراین حتی اگر مشخصات پاسخ دینامیکی حالت گذرا داده نشده باشد، می توانید سرعت ترانسدیوسر را از روی فرکانس قطع آن بفهمید.

مثال ۹ - فرکانس قطع ترانسدیوسری را که پاسخ فرکانسی اش در شکل 13 رسم شده را تعیین کنید.

حل - بهره فرکانس پایین ترانسدیوسر 20 dB است که مربوط به بهره 10 می باشد. فرکانس قطع بالا فرکانسی است که بهره آن بهره به اندازه 3 dB - (یا به نسبت بهره 0.707) افت کند. بنابراین باید بهره 17dB و نسبت بهره 7.07 داشته باشیم. با قطع دادن خط 17 dB با شکل، فرکانس قطع 2 kHz می شود.