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 کارائی 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 متغیرهائی که کنترل می‌شوند، تعیین کننده نهائی کارائی کلی سیستم است.

این موضوع خیلی مهم است که اصول فیزیکی، را که حسگر ها و ترانسدیوسرها بر اساس آن پارامترهائی همچون (حرارت، نیرو، موقعیت و ...) را به مقادیر الکتریکی تبدیل می‌کنند، درک کنیم؛ و از سوی دیگر، به همان اندازه توانائی 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 کارائی سیستم را تحت الشعاع قرار دهد. بعبارت 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 پارامتر ها مشابه با طریقی باشد که تولید کننده آنها ارائه داده است.

www.jozve.org

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 می باشد. کارائی حسگر ها و ترانسدیوسرها، بوسیله تولید کننده های آنها بصورت دو دسته مشخصه اعلام ، تعریف و گارانتی می‌شوند.

- مشخصه های کارآئی 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 کارآئی 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 کارآئی 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. بعبارت دیگر زمانیکه خروجی بطور کامل به تغییر در کمیت ورودی پاسخ داد و پایدار شد،

www.jozve.org

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 سئوال سه پاسخ مختلف وجود دارد.

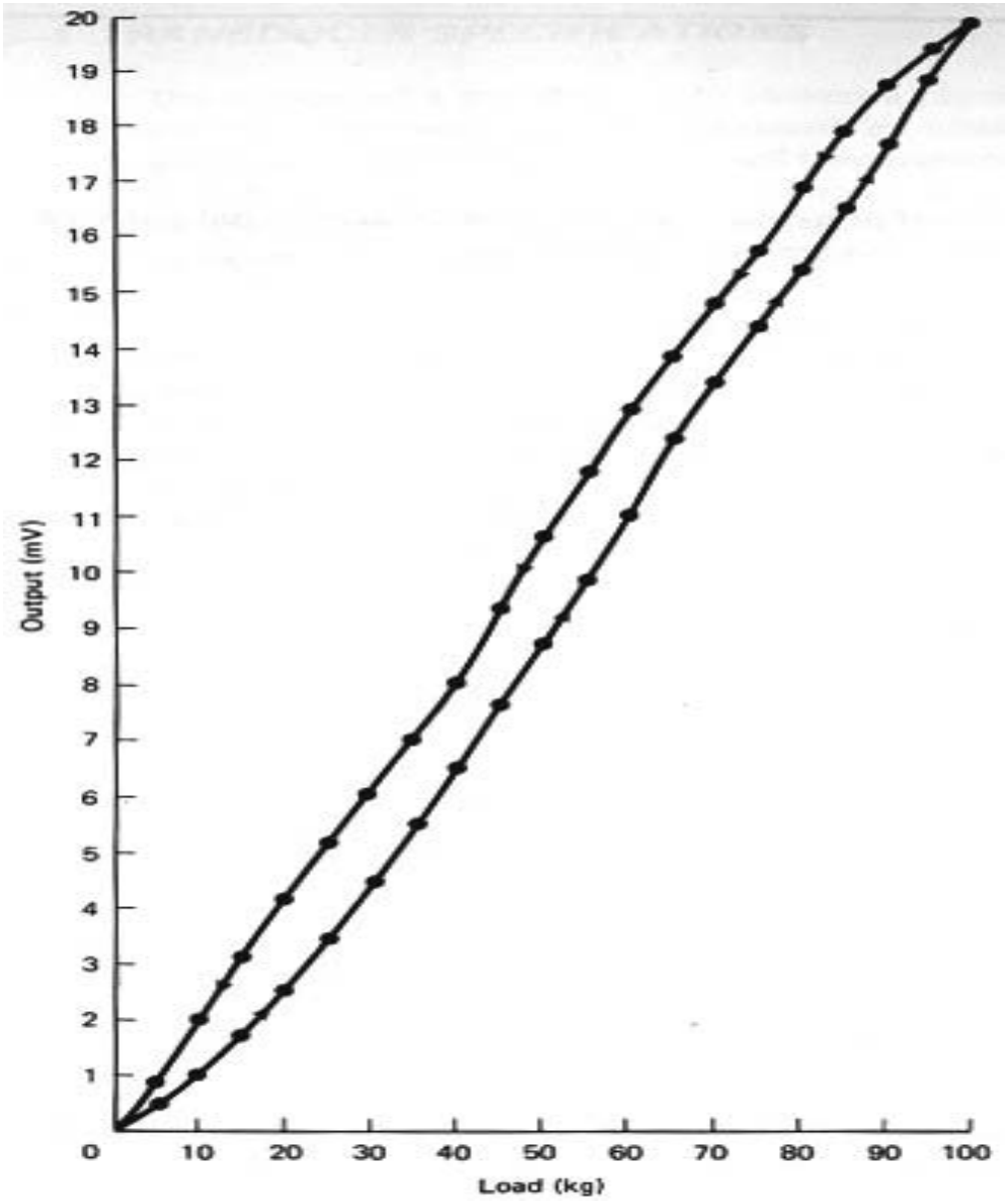
دقت ممکن است بصورت درصدی از مقیاس کامل خروجی (%FSO)، بصورت درصدی ازمقدار خوانده شده (Measured Value) ویا بصورت خطای مطلق (Absolute Error) بیان شود.

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

www.jozve.org



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

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

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.

www.jozve.org

جدول ۲ - دقت برای مثال ۲

بار (kg)	خروجی صحیح (mV)	خروجی واقعی(mV)	خطای مطلق (mV)	دقت %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 ـ برای حل این مسئله چندین کار بایستی انجام داد. اول بایستی محاسبه کنید که مقـدار واقعـی خروجی چه بایستی باشد.

با فرض یک رابطه مطلوب خطی بین خروجی و ورودی.

www.jozve.org

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

پس، در هر نقطه از جدول کالیبراسیون می بایست مقدار حقیقی یـا واقعـی ، مقـدار خطـای مطلـق، دقـت 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 بـا 7.85% در 25 کیلـوگـرم افزایـشی است، و خطا بصورت درصدی از مقدار خوانده شده 60% در 5 kg کاهشی است.

بوضوح اختلاف فاحش بین این دو نتیجه دیده می‌شود. خیلی مهم است که بدانیم تولید کننده از کـدامیک استفاده کرده‌است. چیزی که ما در حقیقت می‌خواهیم بدانیم این است که چقـدر عـدم اطمینـان در مقـدار اندازه‌گیری شده در ورودی وجود دارد.

خطای مطلق در واحد پارامتر ورودی تعریف می‌شود، بنابراین دقت بر مبنای %FSO این امکان را میدهد تا خطای مطلق (Absolute Error) را محاسبه کنید. در صورتیکه اگـر خطـا بـصورت در صـدی از مقـدار خوانده داده شده باشد، این امکان وجود ندارد.

مثال ۳ - یک سلول‌بار دارای ظرفیت رنج کامل 20 میلـی‌ولـت در 100 kg اسـت. کالیبراسـیون دقـت 7.85%+ را در مبنای FSO نشان داده است. مطلوب است محاسبه خطای مطلق.

راه حل ــ 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 میلی‌ولت 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 ولـت است. بر مبنای محاسبات بالا مقدار واقعی صحیح حدود ۱/۵۷+ 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 نمی‌توان با دقت بر مبنای مقدار خوانده شده بدست آورد.

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

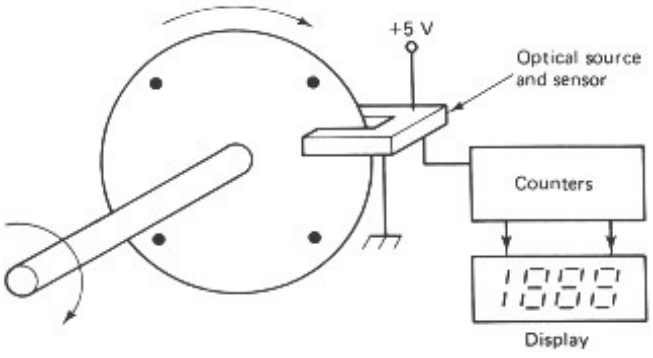
www.jozve.org

مثال ۴ – لازمست گشتاور اعلام شده بوسیله محور یک موتور هیدرولیکی را با دقت مورد نظر 0.1 ft-lb اندازه‌گیری 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 می‌توان 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. بنابرای این ترانسدیوسر بدرد نمی خورد. خیلی امکان دارد که مقدار بالا را درصد مقدار اندازه‌گیری ترجمه کرده که در این صورت خطای 0.2% از مقدار ۲۰ 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 می‌گوید که تا چه اندازه نزدیک می توانید ورودی را اندازه‌گیری 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 می‌تواند 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^O درجه بچرخد. بنابراین این اینکودر دارای یک رزولوشن 90^O درجه است. اینکودرهای نوری صنعتی 100 تا 1000 پالس در هر دو ، چرخش ، تولید می‌کنند.



شکل ۲- اینکودر نوری ساده

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

قدرت تفکیک یک مبدل آنالوگ به دیجیتال مساویست با

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

که در آن n تعداد بیت‌های یک عدد باینری است. بنابراین یک مبدل ۸ بیتی می‌تواند قدرت تشخیص یک در 2^8 یا 256 داشته باشد. یک مبدل 10 بیتی می‌تواند یک سیگنال آنالوگ را به 1024 تقسیم کند. به همین ترتیب یک مبدل 12 بیتی، قدرت تفکیک برابر با 4096 دارد.

www.jozve.org

مثال ۵ ـ یک پره بطول 2.5 m به آهستگی بر روی محیط در یک دایره می‌چرخد. موتور و گیربکس به مرکز پره متصل شده‌اند. لازمست موقعیت نوک پره با حساسیت 2 سانتی‌متر 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 ـ محیط دایره با قطر 2.5 متر مساویست با

$$c = \pi\, d = \pi(2.5\ m) = 7.854\ m$$

با استفاده از نسبت و تناسب بدست می‌آوریم

$$arc = \frac{(360^o)(2cm)}{785.4cm} = 0.917^o \ \Rightarrow \quad \frac{arc}{360^0} = \frac{2cm}{785.4cm}$$

بنابراین اینکودر بایستی قادر به تشخیص 0.917^O درجه باشد. بنابراین اینکودر بایستی دارای

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

پالس در هرد دور چرخش باشد. البته اینکودر با تعداد پالس در دور بیشتر، حساسیت بهتری را ارائه می‌دهد. 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 $10\ mV/^oC$ برای اندازه‌گیری در جه حرارت یک کوره که از ۰ تا 100^oC تغییر می‌کند استفاده شده است. آیا می‌توان از یک مبدل آنالوگ به دیجیتال 8 بیتی با دامنه کامل ورودی 5 ولت استفاده کرده و حساسیت 1^oC را داشت؟

راه حل ـ یک مبدل 8 بیتی دارای یک قسمت در 2^8 یا 256 قسمت حساسیت است. بنابراین با 5 ولت ورودی دامنه کامل هر بیت دارای ارزش $\frac{5V}{256} = 19.5mV$ است.

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

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

این مقدار نزدیک به دامنه ماکزیمم ورودی مبدل نمی‌باشد. 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 می‌نماید. یک درجه سانتی‌گراد اکنون V = 1oC * 10 mV/oC * 5 = 50 mV چون حساسیت مبدل آنالوگ به دیجیتال 19.5 mV است، ترانسدیوسر می تواند 0.39oC را تشخیص دهد.

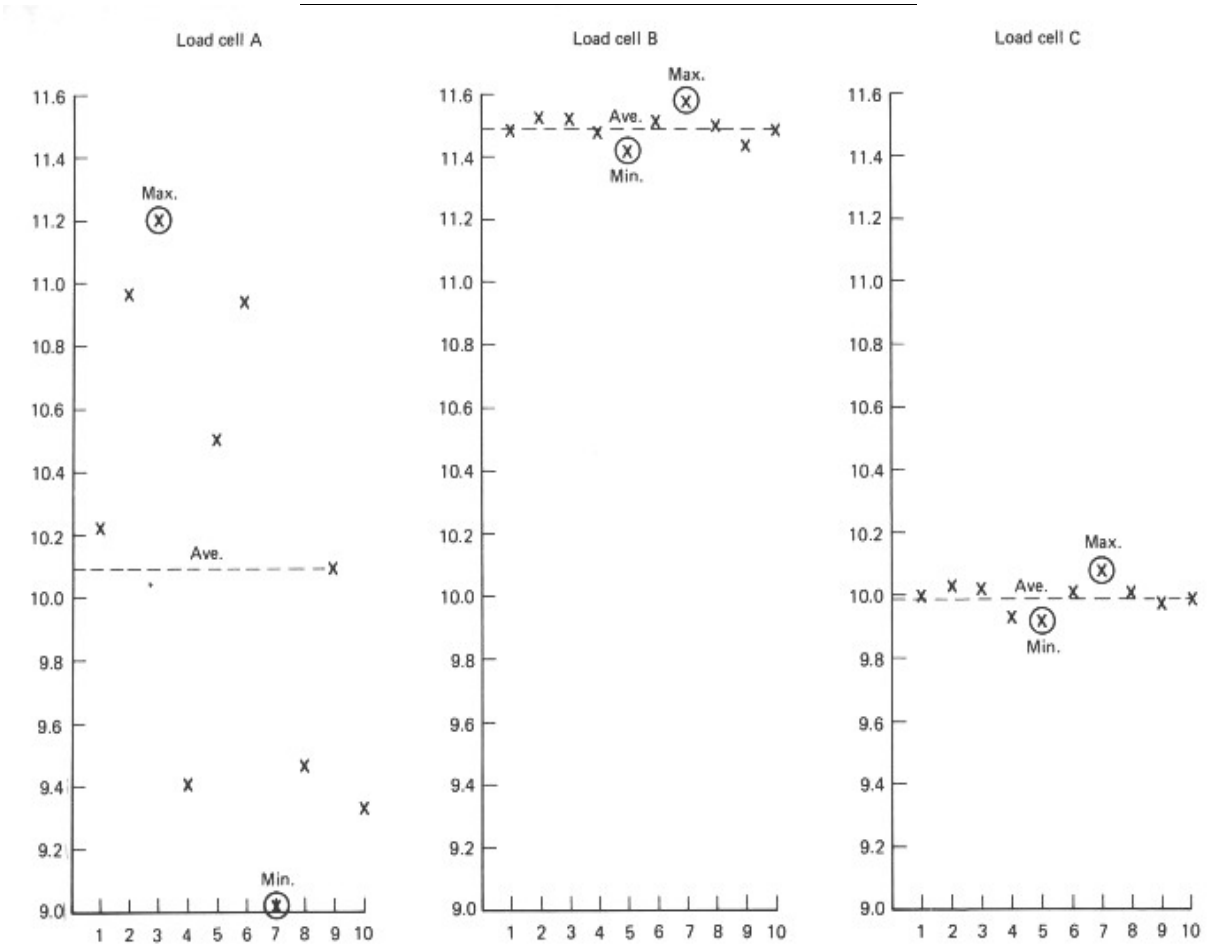
تکرار پذیری (Repeatability) : نشان دهنده این است که تا چه اندازه مقدار خروجی یک ترانسدیوسر، در پاسخ به چندین بار اعمال یک ورودی تغییر می کند و در واقع به مقدار اصلی خود بر می گردد. مواظب باشید که قابلیت تکرار پذیری را با دقت اشتباه نکنید. این دو مشخصه در مثال 7 با هم مقایسه شده‌اند.

www.jozve.org

مثال ۷ - سه سلول‌بار مشابه مثال ۱، برای قابلیت تکرار پذیری آزمایش شده‌اند. یک وزنه 50 kg ، 10 مرتبه روی هر کدام از آنها قرار داده شده است. داده های 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	خروجی Load cell (mV)		
	A	B	C
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 داده های مربوط به تکرار پذیری مثال ۷

www.jozve.org

راه حل ـ شکل ۳ نمایش رسم آزمایش سه سلول‌بار است.

سلول‌بار 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.

سلول‌بار 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 بدست‌آورید. می توانید 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

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

و دیگران به صورت

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

تعریف می نمایند.

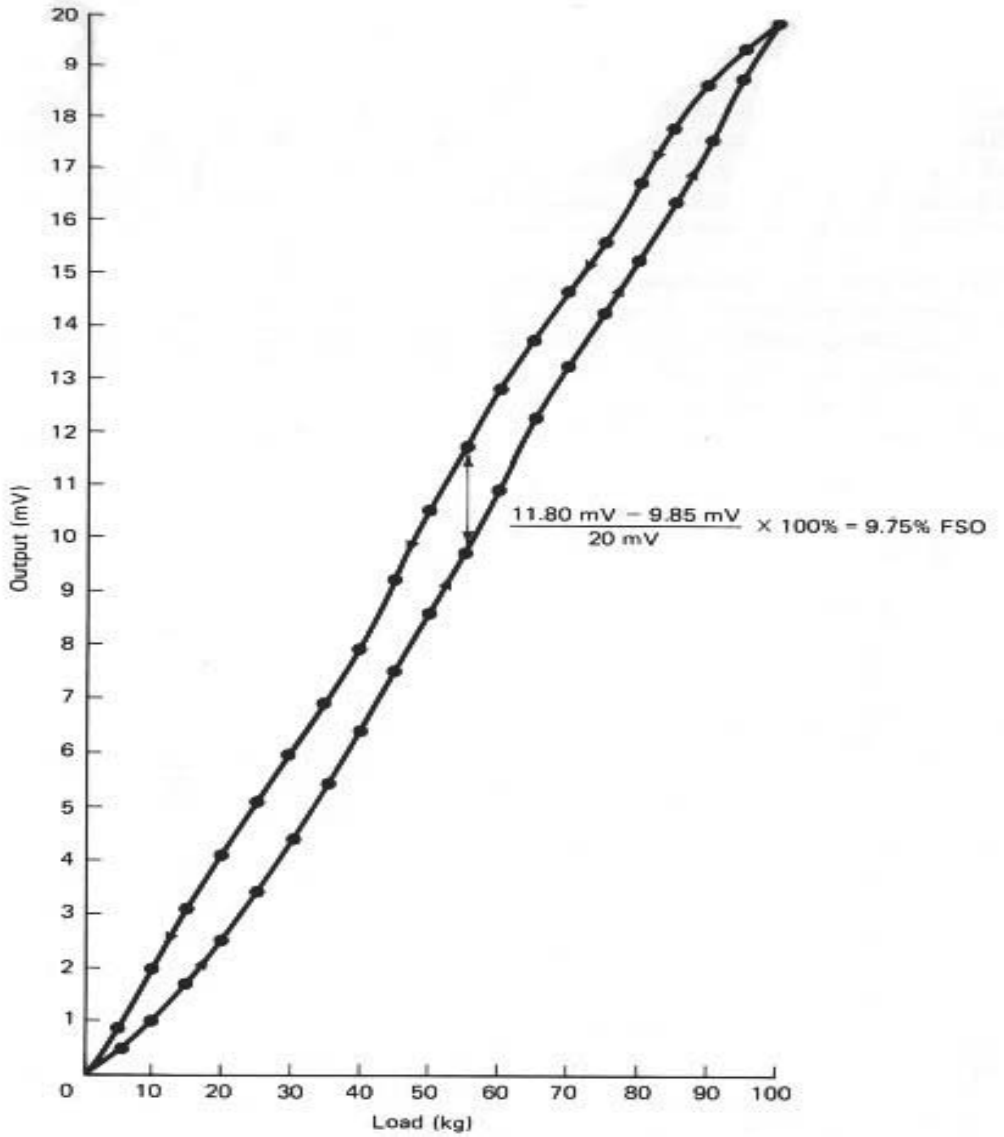
که در آن اختلاف ماکزیمم مقداری است که از مقدار متوسط بیشترین فاصله را دارد چه از بالا و چه از پائین. پس وقتی از مشخصه قابلیت تکرارپذیری استفاده می کنید، حتما باید بدانید که تولید کننده چگونه این عدد داده شده را محاسبه کرده است.

هیسترزیس Hysteresis : نشانه‌ای از قابلیت تکرار خروجی ترانسدیوسر است. ممکن است ورودی در روند افزایشی، خروجی متفاوتی نسبت به وقتیکه ورودی 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 می رسیم که خروجی آن 9.85 mV است. حال اگر پس از اینکه سلول‌بار به بارنهائی‌اش رسید وزنه را کم کنیم تا به 55 kg برسیم، ترانسدیوسر 11.80 mV را در خروجی نشان می‌دهد. برای محاسبه هیسترزیس، 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.

www.jozve.org

هیسترزیس 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 آ نهم 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.

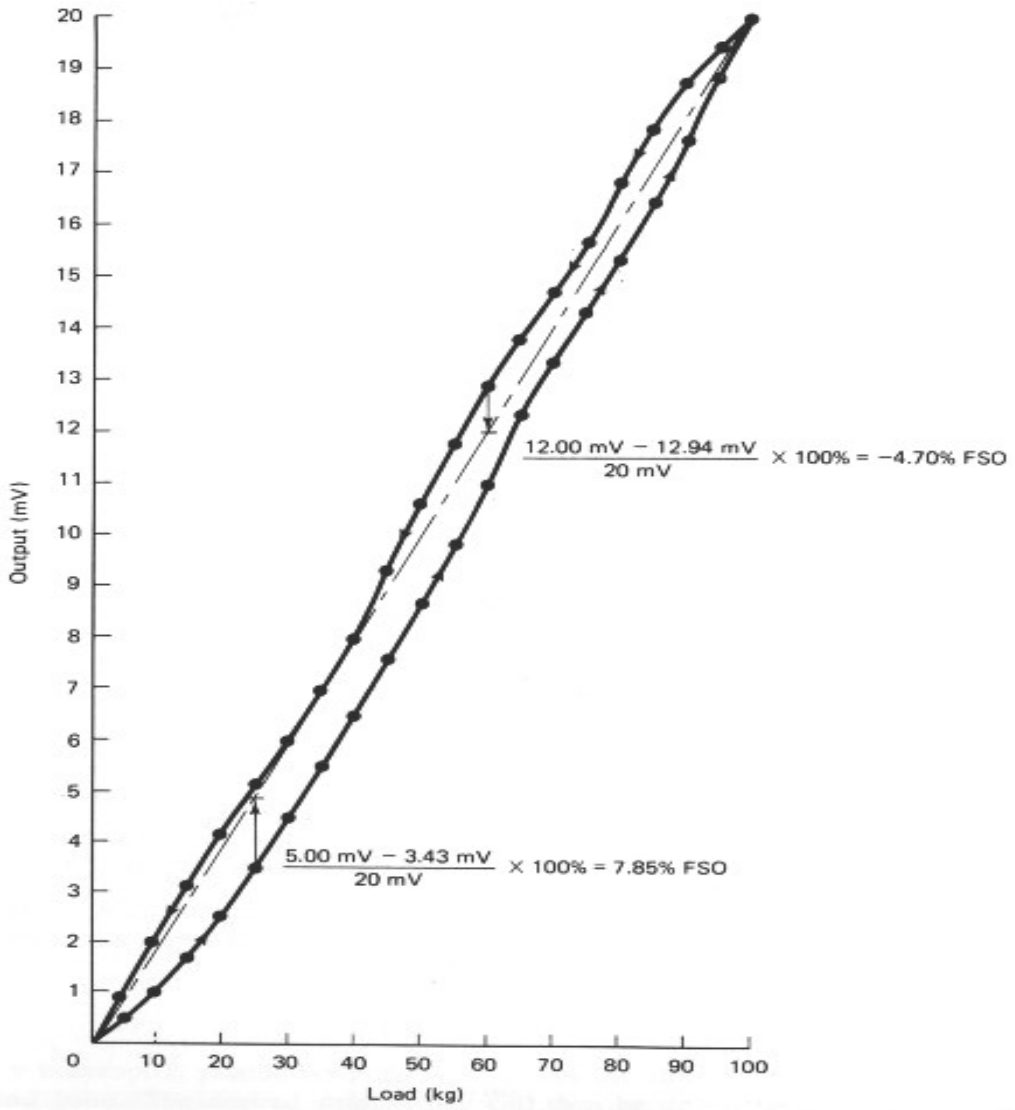
www.jozve.org

درحالت ایده‌آل 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 می‌کنیم. اگر از مقادیر تئوری صفر و درجه بندی کامل ورودی و خروجی استفاده شود، عدد نتیجه شکل خطی تئوری نامیده می شود.

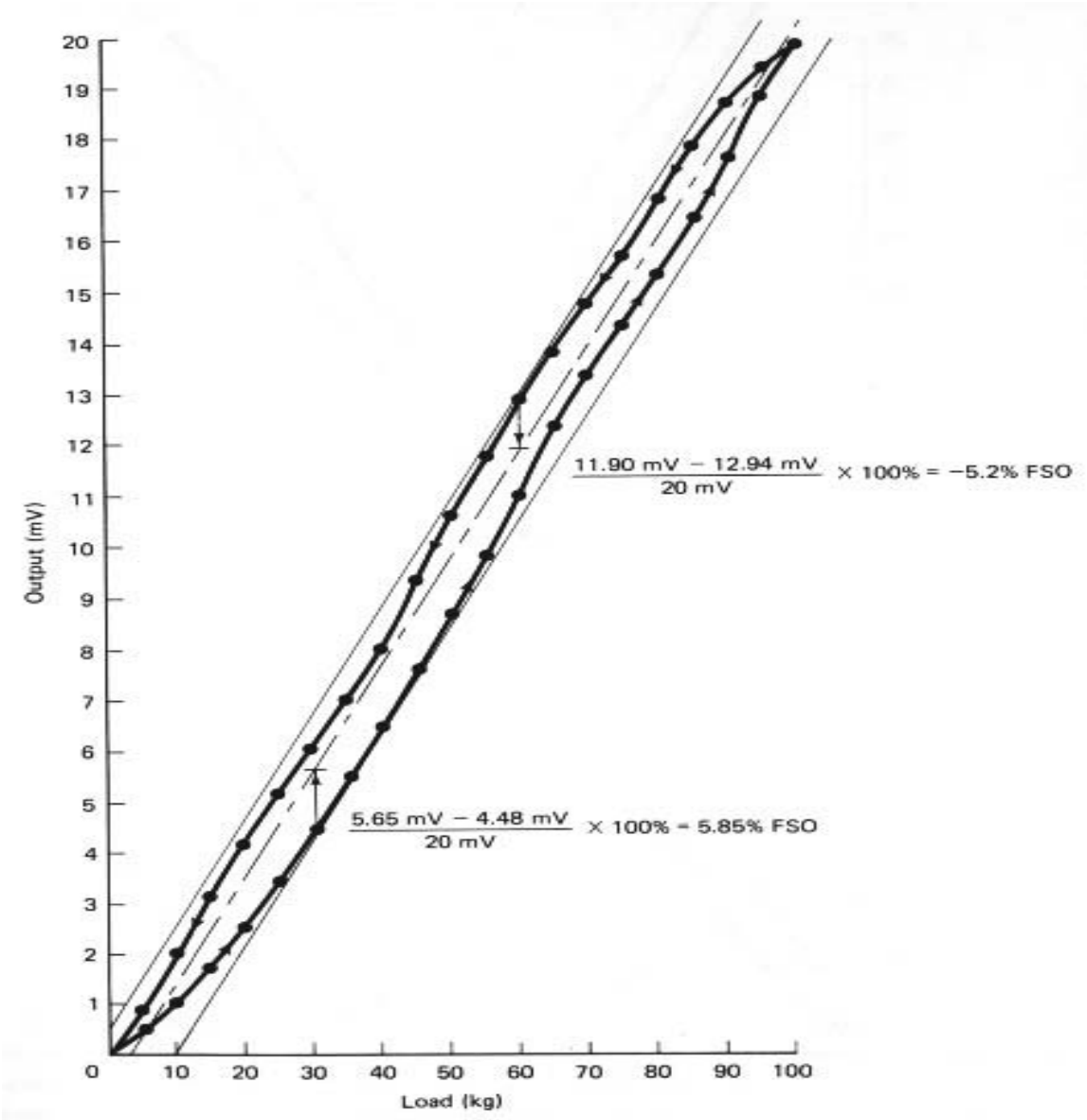
می‌توانید ماکزیمم انحراف منحنی از بالا و پائین خط مستقیم را حساب کرد. این مقادیر بصورت %____+ و %_____- از خروجی در رنج کامل تعریف شده‌اند. به شکل ۵ و جدول ۲ توجه کنید



شکل ۵ – خطی بودن نقاط انتهائی

www.jozve.org

برای محاسبه خطی بودن خط مستقیم غیر وابسته، بایست دو خط موازی رسم کنید که درست منحنی کالبراسیون را احاطه کنند. خط مستقیم غیر وابسته ما بین این دو حد رسم می‌شود. می‌توانید ماکزیمم انحراف از این خط مرکزی مستقیم را بصورت %___+ و %_____- از درجه‌بندی 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 می‌شود. این خط مستقیمی است که مجموع مجذور فاصله‌ها (خطا) از آن کمترین و یا مینیمم است. با داشتن یک مجموعه ازجفت x,y ها که داده‌های کالیبراسیون هستند (ورودی محور x و خروجی محور y است)، می‌توانید معادله خط مستقیمی را محاسبه کنید که کمترین خطا را داشته باشد.

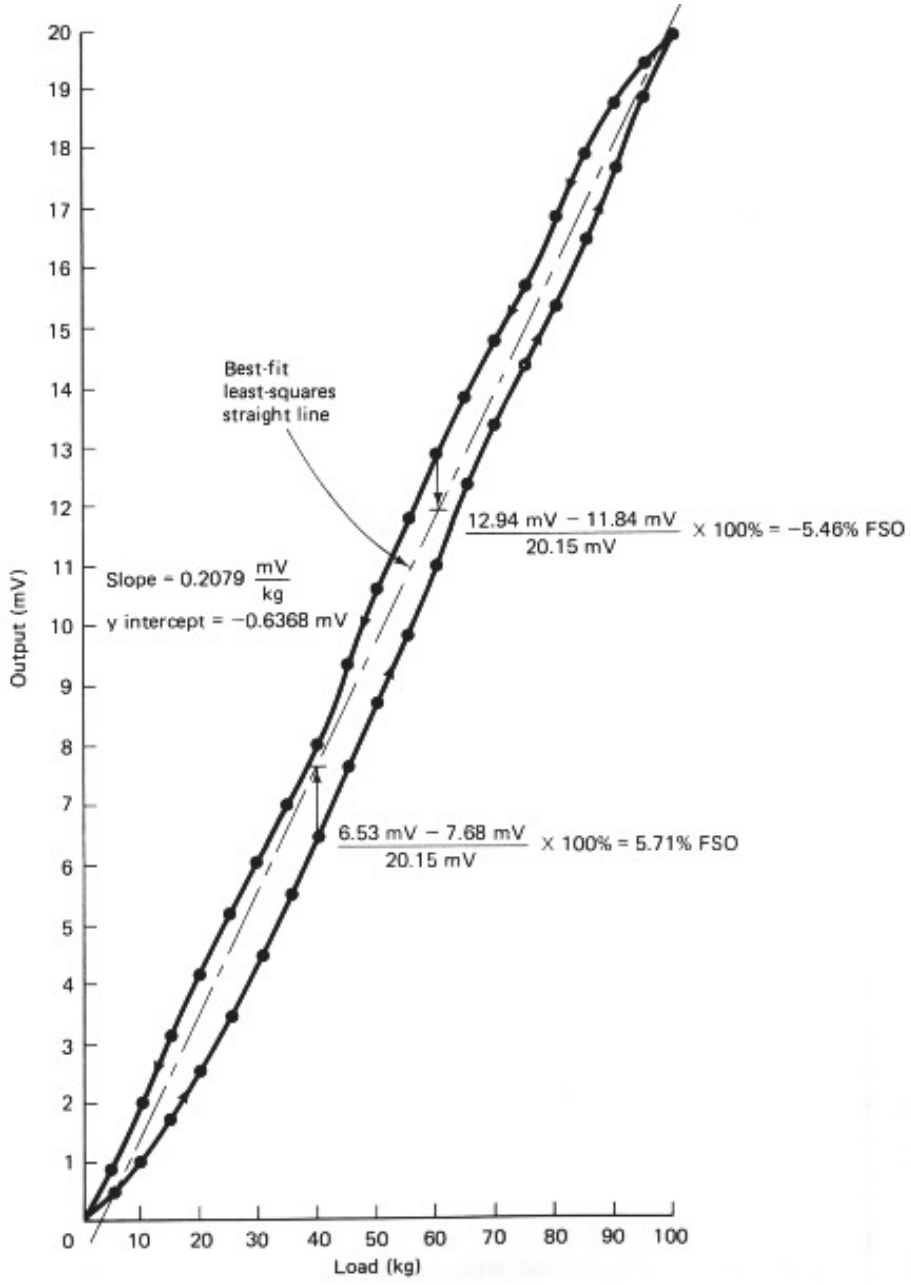
m = شیب خط راست, y = مقادیر خروجی , x = مقادیر ورودی ,

n = تعداد نقاط داده , b = عرض از مبدا خط راست

www.jozve.org

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

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 می‌توان آنها را به نحوی برنامه‌ریزی 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 داده‌های 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 کاهشی است، در حقیقت ۴۲ نقطه داده را بایستی وارد کنیم. با استفاده از این داده‌ها خواهیم داشت:

www.jozve.org

$m = 0.2079, \quad b = -0.6368\ mV$

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

$$v_{out} = \left(0.2079\,\frac{mV}{kg}\right) \times l_{input} - 0.6368\,mV$$

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

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

و

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

$$= 5.71\% - 5.46\% FSO$$

- **مشخصات دینامیکی**

تمام مشخصه‌هائی 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 اندازه‌گیری می شد.

در حقیقت، اگر ترانسدیوسر وقتی که مقادیر را ثبت می‌کنیم پاسخ کامل نداده باشد، داده‌های اشتباهی بدست خواهند آمد. هر چند، به ندرت ترانسدیوسرها در یک وضعیت استاتیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. 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 می‌کند تحویل دهد. بنابراین اینکه ترانسدیوسر با چه سرعتی به تغییرات ورودی اش پاسخ می دهد، اهمیت دارد. به این مشخصه ها پاسخ‌های دینامیکی گفته می‌شود.

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

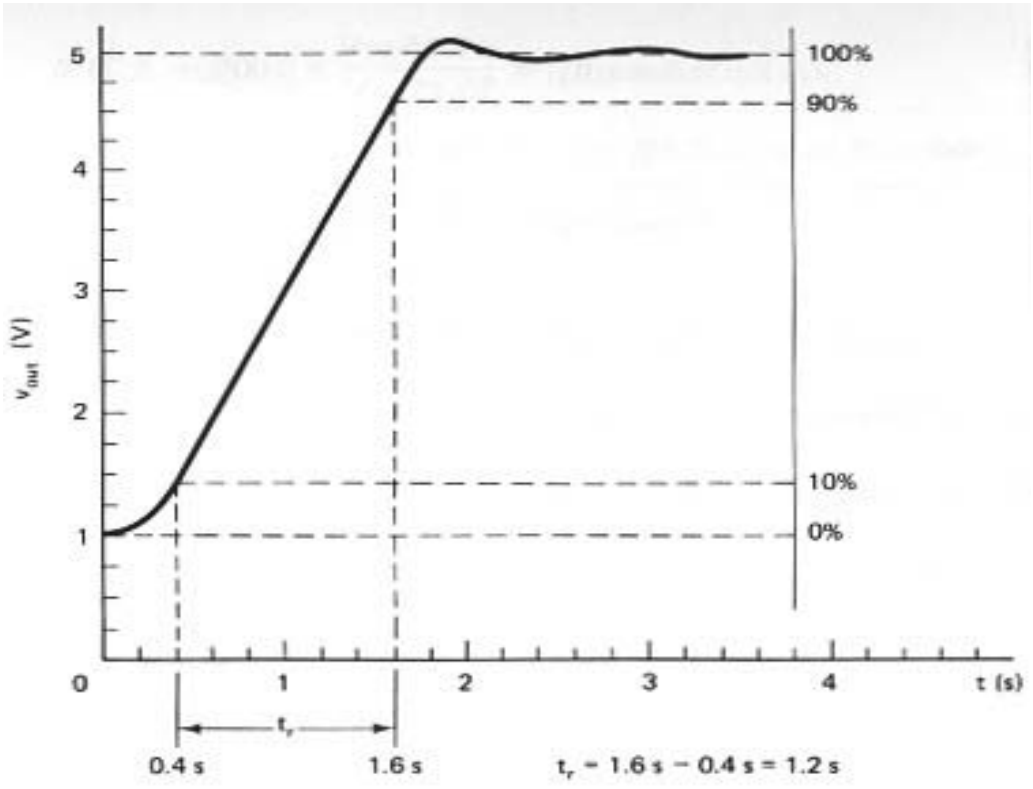
اگر ترانسدیوسر دارای مشخصه ای از نوع درجه دوم باشد، ضریب میرایی، فرکانس رزونانس و زمان پاسخ یا درصد جهش ممکن است داده شوند.

نوع دوم مشخصه‌های دینامیکی بصورت پاسخ ترانسدیوسر به ورودی سینوسی تعریف می‌شود. ممکن است منحنی پاسخ فرکانس و فرکانس قطع بالا مشخص بشوند.

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

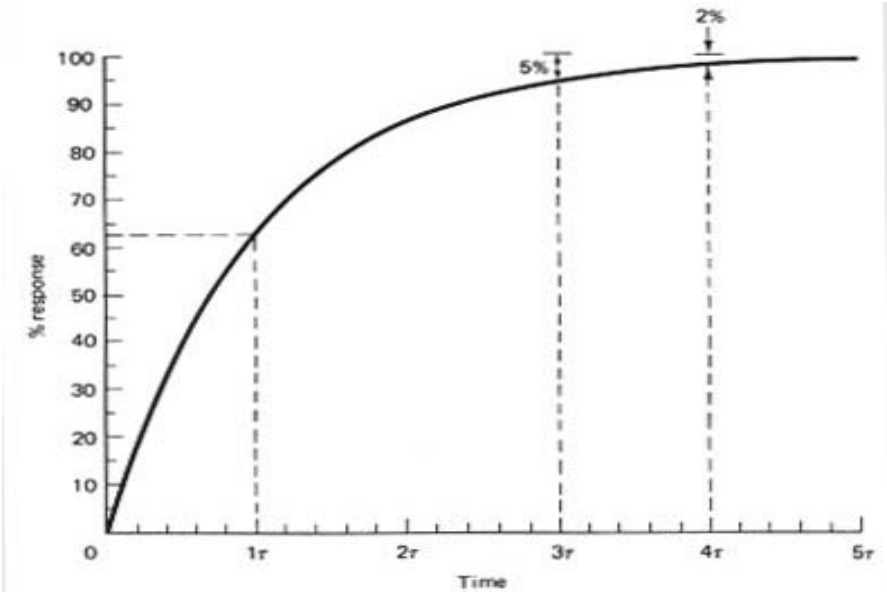
www.jozve.org

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

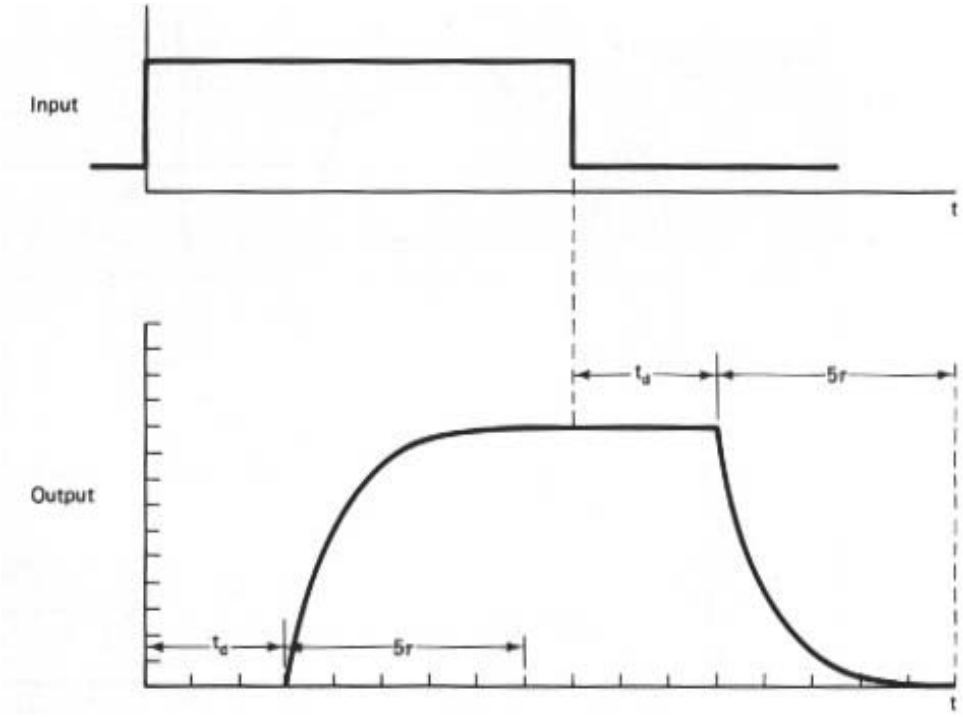
ثابت زمانی معمولاً برای المانهای درجه اول بکار برده می‌شود و عبارت است از زمانی که خروجی به 63.2% مقدار ماکزیمم ممکن برسد. پس از سه ثابت زمانی معمولاً خروجی در 5% مقدار نهایی و پس از ۴ ثابت زمانی در 2% مقدار نهایی‌اش است. پاسخ معمولاً پس از ۵ ثابت زمانی کامل در نظر گرفته می‌شود. این موضوع در شکل ۹ رسم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



شکل ۹ – ثابت زمانی

www.jozve.org

زمان مرده مدت زمانی است که طول می‌کشد 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.

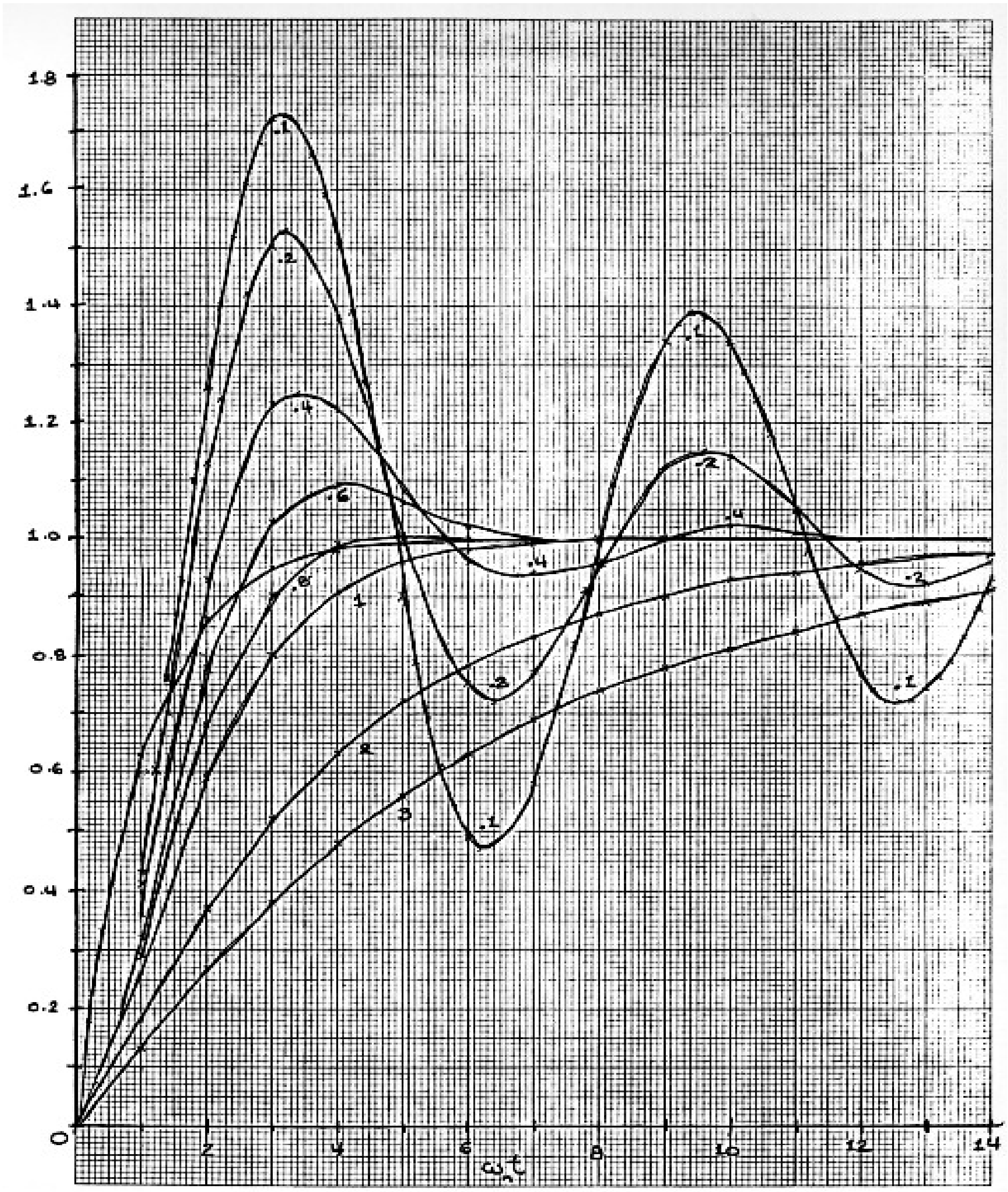


شکل ۱۰ – پاسخ زمانی یک ترانسدیوسر دارای ثابت زمانی و زمان مرده

المانهای درجه اول معمولاً بوسیله ثابت زمانی‌شان مشخص می‌شوند مانند شکل ۹ . پاسخ دینامیکی ترانسدیوسرهای با تابع انتقال درجه دوم بوسیله ضریب میرایی و فرکانس رزونانس تعریف یا مشخص می‌شوند. ضریب میرائی و فرکانس روزنانس شکل پاسخ زمانی یک ترانسدیوسر درجه دوم را به یک پله در ورودی مشخص می‌کنند.

به شکل ۱۱ توجه کنید. محور عمودی % پاسخ است. تمام منحنی‌ها 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:

www.jozve.org



شکل ۱۱- پاسخ پله (نرمالیزه شده)

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

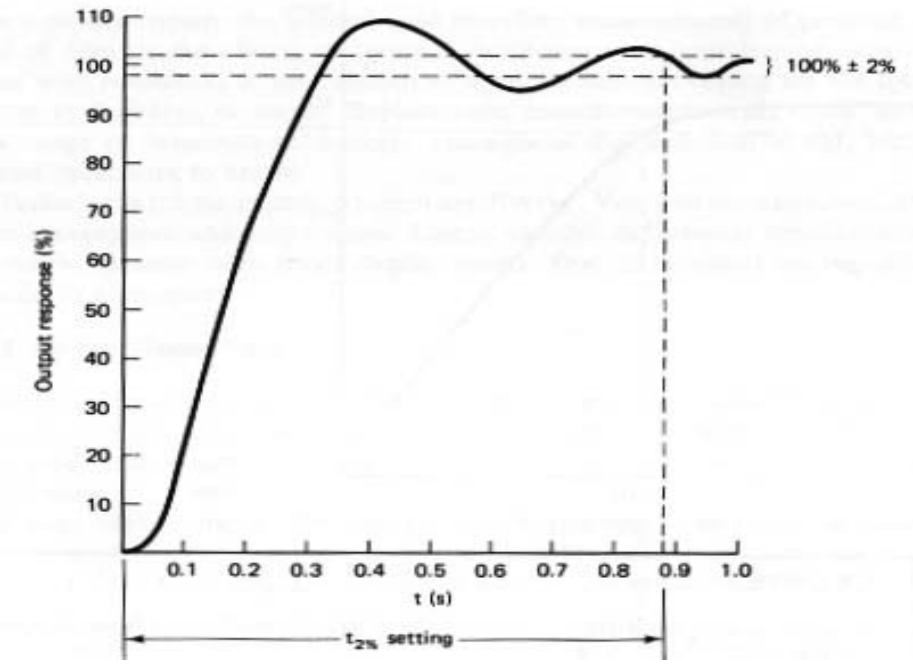
اورشوت در حالت زیر میرایی ترانسدیوسر اتفاق می‌افتد. درصد اورشوت اندازه ای است از پیک اولیه، البته چنانچه آنرا با مقدار شرایط پایدار مقایسه کنیم:

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

www.jozve.org

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 می‌کشد تا پس از اعمال ورودی پله، خروجی ترانسدیوسر پایدار شده و در یک محدوده $\pm 2\%$ مقدار نهائی‌اش قرار گیرد. این موضوع در شکل ۱۲ رسم شده است.

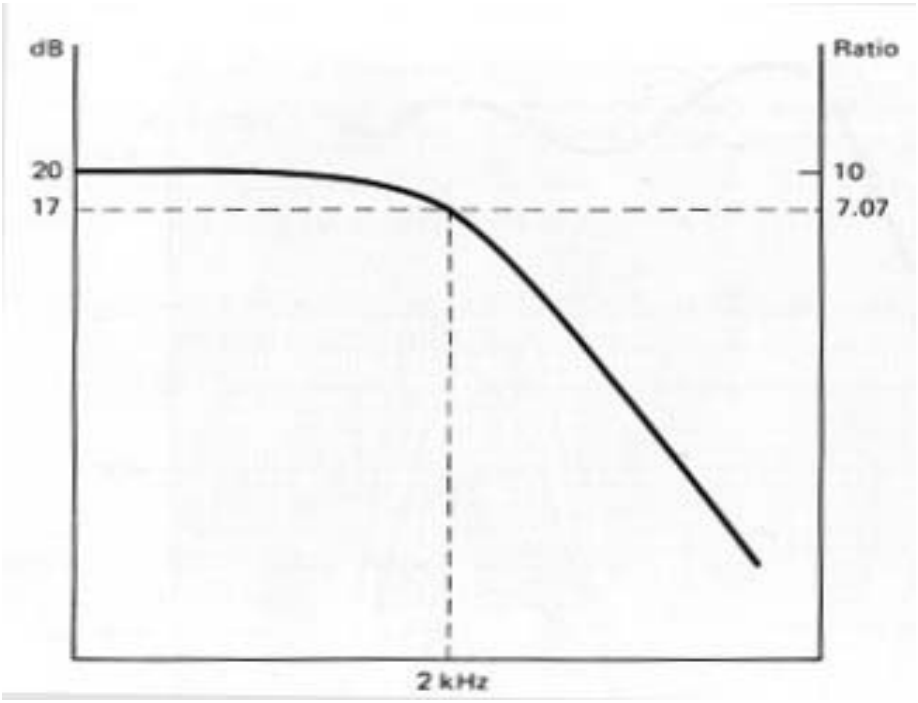


شکل ۱۲- زمان قرار

پاسخ فرکانسی و فرکانس قطع بالا دو مشخصه دیگر هستند که پاسخ ترانسدیوسر را به یک موج سینوسی در ورودی‌اش می‌دهند.

برای یک ترانسدیوسر نسبتاً خطی، ورودی سینوسی، خروجی سینوسی ایجاد می کند. همچنانکه فرکانس بالا می‌رود 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 می‌شود. بنابراین با افزایش فرکانس، دامنه خروجی کمتر و کمتر می شود. این کاهش دامنه خروجی با افزایش فرکانس ورودی را پاسخ فرکانسی می‌گویند 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 می‌شود.

www.jozve.org



شکل ۱۳- منحنی پاسخ فرکانسی

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

محور افقی به صورت لگاریتمی مدرج شده نه خطی، تا بتوان فرکانس وسیع‌تری را نمایش داد. فرکانس قطع (high frequency cutoff) (f_h) فرکانسی است که در آن بهره ترانسدیوسر به مقدار 0.707 مقدار اولیه‌اش در فرکانس کم پایدار، افت می‌کند. 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 می‌باشد، غالباً فرکانس قطع را به زمان جهش بوسیله رابطه زیر مربوط می‌کنند. $t_r = \frac{0.35}{f_h}$

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 کهدر 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.

www.jozve.org