ابزار دقیق (*Instrumentation*)

تجهیزات اصلی اندازه گیری و کنترل فرآیندهای صنعتی

معرفی سیستم های کنترل و ابزار دقیق.

سیستم های کنترل (Control Systems) و ابزار دقیق متناسب با کاربردشان ؛ در طیف وسیعی از سیستم های بسیار پیچیده تا نسبتاً ساده قرار گرفته اند.

برای مثال و بعنوان یکی از فرآیندهای نسبتاً ساده ؛ سیستم تنظیم خودکار سوخت موتورها را میتوان نام برد. در این سیستم ساده ؛ حسگرهائی (Sensors) وجود دارند که وضعیت موتور و شرایط کار آن ؛ نظیر فشار (Pressure) ؛ ارتفاع ؛ چرخش (Rotation) و سرعت (Speed) را مورد باز بینی قرارمیدهند.

اطلاعات حاصل از این حسگرها توسط کامپیوتر و یا وسایلی نظیر ریز کامپیوتر ، ریز پردازنده (Microprocessor) ، کنترل کننده (Controller) ، به سیگنالهای کنترل (Control Signals) تبدیل میشوند؛ و نهایتاً بصورت فرامینی باعث کنترل کار بهینه موتورها میگردند.

این فرامین؛ ترکیب سوخت و هوا ؛ مقدار سوخت ؛ و نسبت جریان سوخت و نظیر اینها را تنظیم می نمایند. لذا علیرغم تغییرات در شرایط کار موتور؛ کارآئی آن در بهترین حالت تنظیم و کنترل میگردد.

در هر سیستم کنترل و ابزار دقیق علاوه بر اجزاء اصلی کنترل (کامپیوتر؛ ریز پردازنده و غیره) حداقل سه قسمت و احتمالاً چهار قسمت موجود میباشد. این اجزاء عبارتند از :

۱. اجزاء حس کننده و یا مبدل ها (Sensors, Transducers)
۲. اجزاء اندازه گیری و آماده سازی سیگنال (Signal Conditioner)
۳. وسایل کنترل کننده و عمل کننده ها (Actuator)
۴. و احتمالاً نشانگر و ثبات

در ادامه این مبحث بشرح هرکدام از اجزاء فوق پرداخته میشود.

۱. حس کننده ها و یا مبدل ها :

معمولاً اولین قسمت سیستم کنترل خودکار؛ قسمت احساس کننده و یا حسگر میباشد که شرایط؛ حالات ؛ یا متغیرهای فرآیند را احساس کرده و متناسب با این شرایط سیگنال های خروجی متناسب با آنها ایجاد مینماید.

غالباً سیگنال خروجی این قسمت بصورت الکتریکی ؛ و قیاسی از شرایط متغیر فرآیند میباشد. برای مثال؛ خروجی حس کننده به ازاء یک پوند (Pound) فشار؛ یک ولت تغییر ولتاژ و یا به ازاء یک درجه تغییر دما یک میلی آمپر تغییر جریان میباشد. امروزه در سیستم های کنترل از مبدلهای و یا ترانسدیوسرهای مختلفی استفاده میشود. بطور نمونه میتوان حس کننده های ، حرکت و نیرو (شتاب؛ دامنه ؛ تغییر

مکان؛ نیرو ؛ گشتاور؛ فشار؛ قدر مطلق سرعت؛ سرعت؛ کشش)؛ شرایط سیال (جریان؛ فشار؛ سطح مایع)؛ رطوبت ؛ بخار هوا ؛ روشنائی ؛ پرتوزائی ؛ دما و صدا را میتوان نام برد.

نظر به اینکه امکان جمع آوری اطلاعات در خصوص انواع مبدلها و حسگرهای مختلف در یک کتاب درسی وجود ندارد. لذا انواع مهمتر و مورد نظر؛ این مبدلها در بخش های بعدی توضیح داده خواهند شد.

۲. اجزاء اندازه گیری و آماده سازی سیگنال :

اندازه گیری؛ مهمترین قسمت سیستم های کنترل و ابزار دقیق میباشد. برای مثال دما و فشار و یا بطور کلی متغیرهای فرآیند؛ مانند سرعت جریان سیال ؛ خاصیت اسیدی و بسیاری دیگر از کمیت ها اندازه گیری میشوند. اندازه گیری فقط برای فهمیدن شرایط و یا کمیت متغیر انجام نمیگیرد؛ بلکه بیشتر اوقات ؛ مقدار اندازه گیری شده با مقدار مطلوب (Set Point) مقایسه میشود تا سیگنال خطا تعیین گردد. توسط این سیگنال خطا یک عمل کننده بکار می افتد تا متغیر فرآیند را به مقدار معینی برساند و یا خروجی فرایند را کنترل نماید.

در سیستمهای کنترل معمولی ؛ نخست توسط یک حسگر شرایط یا کمیتهای متغیر فرآیند؛ به سیگنال الکتریکی یا فشارهوای معادل تبدیل میشود. معمولاً سیگنال الکتریکی که به این ترتیب تبدیل شده و سپس اندازه گیری میشوند ، در قالب اوقات جریان؛ ولتاژ؛ مقاومت؛ ظرفیت خازنی؛ ظرفیت القائی ؛ فرکانس و سرعت تکرار پالس میباشند. در سیستم های بر مبنای ریز کامپیوتر؛ فرآیند اندازه گیری ؛ شامل تبدیل مقادیر آنالوگ (مثلاً ولتاژ معادل فشار و غیره) به مقادیر عددی (دیجیتال) و برعکس نیز میباشد. بعبارت دیگر؛ چون در کامپیوترها پالسهای دیجیتالی مورد استفاده قرار میگیرد ؛ لذا در این سیستمها از مدارهای مبدل آنالوگ به دیجیتال (A/D) و مبدل دیجیتال به آنالوگ (D/A) استفاده میشود.

۳. وسایل کنترل کننده و عملگرها :

در اکثر سیستمهای کنترل ؛ آخرین مرحله از سیستم معمولاً شامل:

- یک کلید یا کنتاکت میباشد که در حالت باز و یا بسته قرار میگیرد.
- یک شیر که در حالت کاملاً باز و یا بسته و یا در یک حالت میانی میباشد.
- یک وسیلهٔ الکترومغناطیسی که توسط جریان الکتریکی تحریک شده و یک عمل مکانیکی را انجام میدهد و یا
- شامل یک موتور است که شروع به چرخش یا توقف نموده و یا جهت آن تعویض شده؛ و یا سرعت آن تغییر مییابد (گاهی اوقات از موتورهای پله ای به این منظور استفاده میشود).

مابین نخستین جزء سیستم کنترل که معمولاً حسگر بوده و عمل کنترل را شروع مینماید و آخرین قسمت آن که عملگر میباشد؛ اجزاء کنترل مختلفی قرار دارند که هرکدام عمل معینی را در سیستم انجام میدهند.

این وسایل معمولاً کلید؛ شیر؛ سیم پیچ مغناطیسی؛ رله ها ؛ لامپ های الکترونی و عناصر کنترل نیمه هادی میباشند.

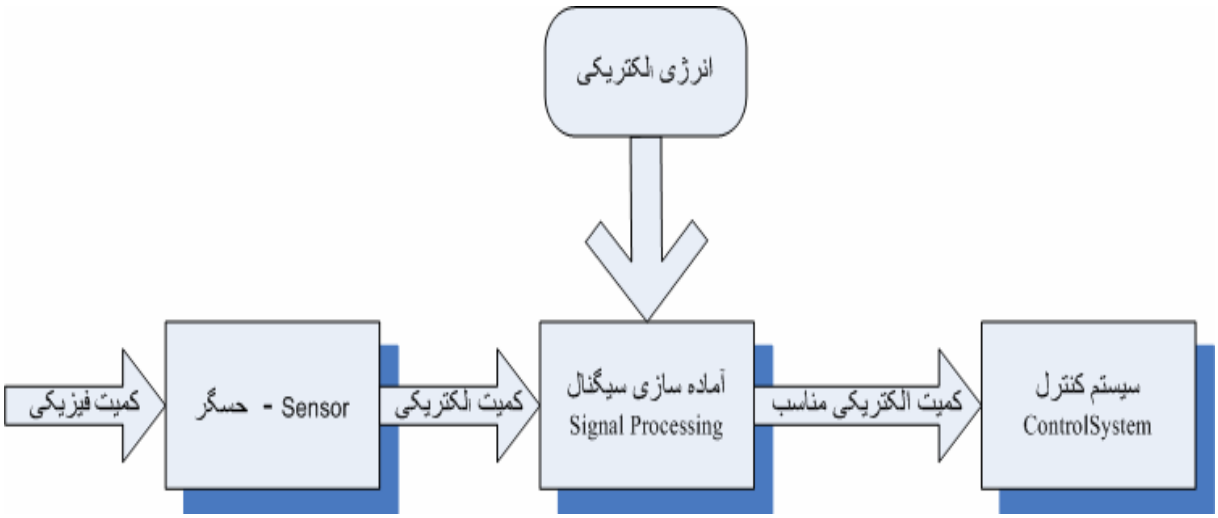
۴. نشانگر و ثبات ؛ وسایل نشان دهنده و کامپیوتر :

اصطلاح نشانگر و ثبات به وسایلی اطلاق میشود که سیگنالها را ثبت و یا نشان داده و یا باعث انتقال سیگنالی بین اجزاء مختلف سیستم میشوند. در سیستم های ساده تر و قدیمی تر؛ نشان دهنده به ؛ فشار سنج ها؛ دما سنج ها ؛ اندازه گیرهای الکتریکی و چراغ های روی تابلوهای کنترل که نشان دهنده اتفاقی در سیستم میباشند (نظیر چراغ های قرمز چشمک زن که هنگام رسیدن سطح مایع در مخزن به حد معینی روشن و خاموش میشوند) و وسایلی نظیر اینها اطلاق میشد.

اما در سیستمهای بر مبنای ریز کامپیوتر کلمه نشان دهنده معمولاً به نشانگر های دیجیتالی ؛ پایانه های تصویری؛ و ماشینهای چاپگر گفته میشود.

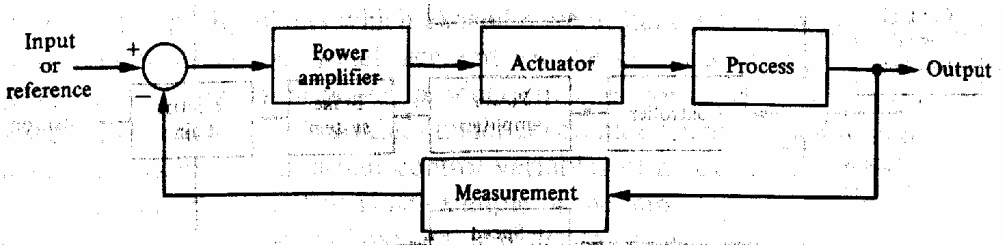
اجزاء سیستم های کنترل و ابزار دقیق

همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است؛ سیستم های اندازه گیری اصولاً شامل یک مبدل میباشند که وضعیت و یا کمیت مورد اندازه گیری (مورد سنجش) را به سیگنال قابل استفاده و معمولاً الکتریکی تبدیل مینماید. البته اصطلاحات مبدل و حسگر غالباً و اصولاً در رشته ابزار دقیق و کنترل با هم تعویض میشوند. اما از نظر تخصصی مبدل یک وسیله کاملی است که بازاء یک کمیت مورد سنجش خروجی مورد نظر را ایجاد میکند؛ اما حسگر یک جزئی از مبدل میباشد که بطور واقعی کمیت مورد سنجش را حس میکند. لذا مبدل ها یا فقط از یک حسگر تشکیل شده و یا شامل هردوقسمت حسگر و تبدیل کننده میباشند. بندرت سیگنال های خروجی حسگرها و یا مبدلها به همان صورتی که هستند مورد استفاده قرار میگیرند، بنابراین غالباً سیگنالهای خروجی مبدل، توسط مدارهای آماده سازی سیگنال پردازش شده و بصورت قابل استفاده ای در میآیند. نتیجتاً بیشتر اوقات مبدلها، شامل مدارهای آماده سازی سیگنال (Signal Conditioning Circuits) نیز میباشند.



شکل 1 - اساس یک سیستم اندازه گیری وآماده سازی سیگنال

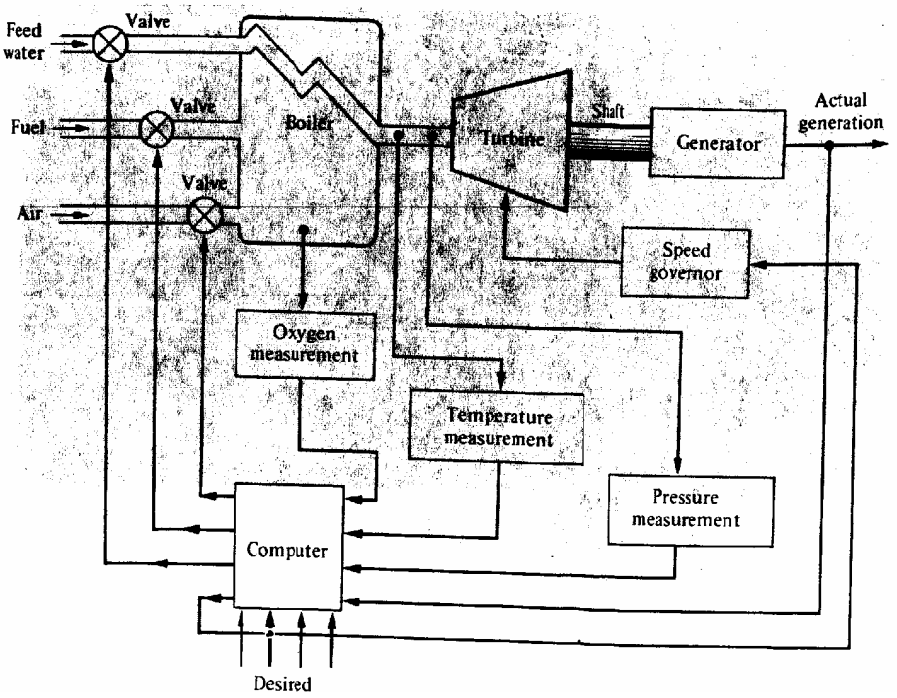
در سیستم اندازه گیری نشان داده شده در شکل فوق؛ سیگنالهای آماده شده به سیستم کنترل و ابزار دقیق که میتواند شامل یک نشان دهندهء دیجیتالی و یا آنالوگ ؛ ثبات یا چاپگر عددی نیز باشد اعمال میگردد. در نتیجه کمیت مورد سنجش به شکل قابل استفاده برای خواندن مثل درجه ؛ عدد و غیره در نشان دهنده نیز آشکار میشود. در سیستم های کنترل مشابه آنچه در شکل زیر نشان داده شده است؛ خروجی های کنترل به یک کنترل کننده و یا یک وسیلهء کنترلی دیگر اعمال میگردد. در نتیجه کنترل کننده سیگنالی را با توجه به مبنای ورودی و مقادیر حاصل از خروجی فرایند مورد نظر ایجاد میکند تا وسایل کنترل مننده فرایند ، نظیر شیرها ؛ عمل کننده ها ؛ موتورها و غیره را بکار اندازد.



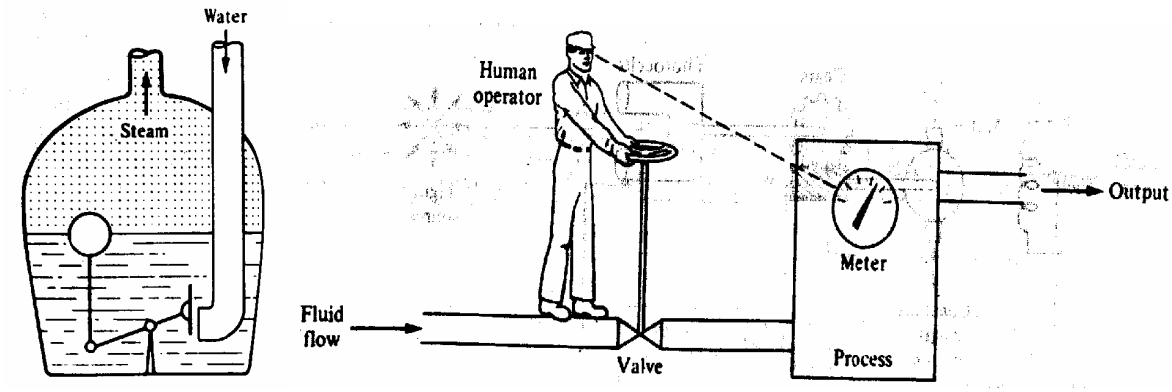
شکل 2 - سیستم کنترل مدار بسته

برای مثال در یک سیستم بسیار سادهء کنترلی (شکل 4)؛ مبدل ؛ فشار یک مخزن را اندازه گیری کرده و متناسب با آن خروجی تولید میکند که از طریق مدار آماده سازسیگنال به کنترل کننده اعمال میشود؛ سپس کنترل کننده شیری را بکار می اندازد تا فشار مخزن را کنترل نماید. فشار مخزن توسط این سیستم با حلقهء بسته تا حد معینی و در مقدار مورد نظر تثبیت میشود.

مدارهای آماده سازی سیگنال قسمتی از مبدل یا کنترل کننده بوده و یا در هر دو قسمت مدار قرار خواهند داشت



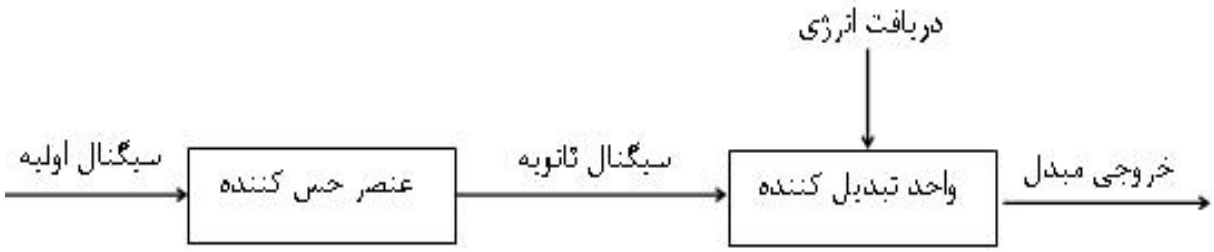
شکل 3 سیستم کنترل توربین یک نیروگاه برق



شکل 4 شکل 5 - سیستم کنترل سطح آب

سنسورها و عملگرها (Sensors and Actuators)

ترانسدیوسرو یا مبدل (Transducer) به مجموعه ای از قطعات و یا وسایلی اطلاق میشود که بتواند کمیت فیزیکی مورد نظر را دریافت و متناسب با آن کمیتی از جنس دیگر تحویل دهد . و یا وسیله ایست که یک نوع از انرژی را به نوع دیگری تبدیل مینماید. این عمل در مبدلها با دریافت انرژی از خارج از دستگاه صورت میگیرد؛ مثلاً ترانسدیوسر حرکت مکانیکی به فشار پنیوماتیک توسط تغذیه هوای فشرده تغییر مکان مکانیکی را به فشار هوائی متناسب با حرکت تبدیل مینماید و یا ترانسدیوسر حرکت مکانیکی به شدت جریان الکتریکی مستلزم دریافت انرژی الکتریکی از خارج دستگاه میباشد. شکل زیر مدار شماتیک یک ترانسدیوسر را نشان میدهد.



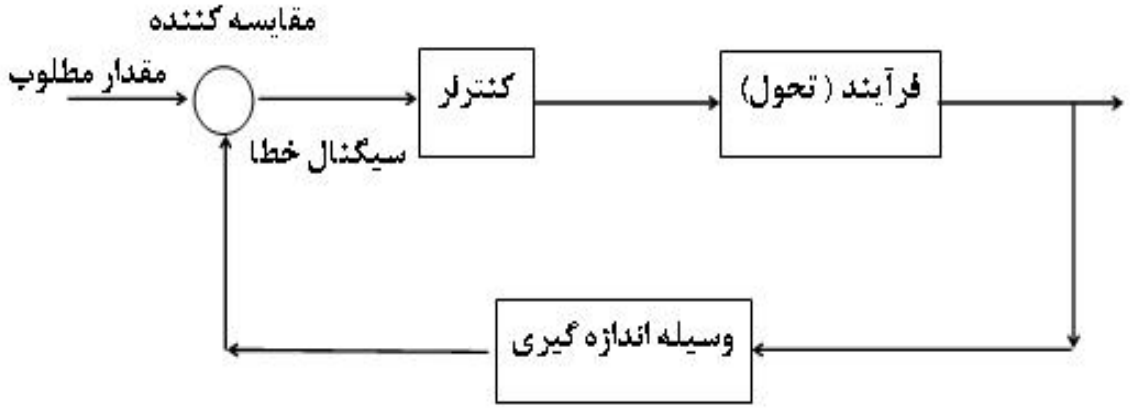
شکل 3 شکل شماتیک یک ترانسدیوسر (مبدل)

برای انتقال اطلاعات به یک ریز کامپیوتر (Microcomputer) ؛ بهترین وسیله ترانسدیوسری است که سیگنال یا کمیت ورودی را به یک سیگنال یا کمیت الکتریکی، مانند، ولتاژ، جریان، مقاوت و یا ....خروجی تبدیل نماید.

یکی از دلایل برای تبدیل سیگنالهای غیر الکتریکی به سیگنالهای الکتریکی قابلیت و امکانات وسیع موجود برای پروسس و تحلیل این گونه سیگنالها بوسیله سیستم های مدرن الکترونیکی میباشد.

ترانسدیوسر و یا مبدل یک کمیت فیزیکی و یا کمیت مورد اندازه گیری را عملاً حس کرده وآنرا به کمیتی یا سیگنالی الکتریکی و قابل اندازه گیری شدن تبدیل مینماید . (مانند ترموکوپل که درجه حرارت را به ولتاژ تبدیل میکند).

جایگاه سنسور که عملاً جزئی از سیستم اندازه گیری میباشد در یک حلقه کنترل بسته در شکل شماتیک زیر نشان داده شده است.



شکل 4 اجزا یک حلقه ساده کنترل بسته

میزان کمیت مورد نظر در خروجی فرایند (تحول) توسط عنصرحس کننده حس شده و در مقایسه کننده با مقدار مطلوب مقایسه شده و سیگنال حاصله (سیگنال خطا) به کنترلر اعمال و نتیجتاً جهت بهبود در وضعیت کنترل کمیت مورد نظر به فرایند (تحول) اعمال میگردد و آنقدر این عمل تکرار میگردد تا سیگنال خطا به صفر نزدیک شود.

تعریف عنصر حس کننده از دیدگاه ISA (Instrument Society of America) : " عنصر حس کننده بخشی از مکانیسم ترانسدیوسر (مبدل) میباشد که در اتصال با کمیت مورد اندازه گیری میباشد؛ بطوریکه هر لحظه به تغییرات حاصله در کمیت مورد نظر برای اندازه گیری پاسخ میدهد".

سنسورها معمولاً برای آشکار سازی جابجائی (Displacement) ؛ درجه حرارت ؛ کشش (Strain)؛ نیرو (Force)؛ نور (Light)؛ و غیره استفاده میشوند.

معمولاً تمام سنسورها احتیاج به مدارهای اضافی برای تولید ولتاژ و جریان دارند؛ بعنوان مثال در مورد ترمیستور (Thermistor) که مقاوت الکتریکی اش متناسب و یا بصورت تابعی از درجه حرارت تغییر میکند؛ یک مدار پل اندازه گیری مورد احتیاج است تا بتوان بوسیلهٔ آن ولتاژ متناسبی تولید نمود.

در مواردی مثل سلول های فتو الکتریک و یا فتو دیود های سیلیکانی (Silicon Photodiode) که متناسب با نور یک جریان تولید میکنند؛ یک طبقه تقویت کننده مورد احتیاج است تا جریان مورد اندازه گیری را به ولتاژی با سطح مناسب تبدیل نماید.

غالباً کلمه سنسور (Sensor) ؛ برای وسیله ای استفاده میشود که دارای ترانسدیوسر و مدار مورد احتیاج برای تولید ولتاژ یا کمیت الکتریکی خروجی باشد. برای آشنائی بیشتر با کاربرد سنسورها میتوات موارد و یا مثالهای زیر را بطور نمونه و برای مثال ذکر نمود.:

- استفاده از مقاومت متغیر برای ثبت نوسانات یک پاندول.

- اندازه گیری درجه حرارت با استفاده از ترمومتر مقاومت پلاتینیوم (Platinium) (PT100)؛ ترموکوپل (Thermocouple) و ترمیستور(Thermistor).
- اندازه گیری نیرو با استفاده از استرین گیج های (Strain Gauge) نصب شده بر روی یک میله پلاستیکی و متصل به یک مدار پل اندازه گیری.
- اندازه گیری نور بوسیله یک فتو دیودسیلیکان (Silicon Photodiode).

عملگر ها

عملگر ها نیز یکی از مهم ترین اجزاء سیستم های کنترل بوده و در واقع نوعی ترانسدیوسر هستند که انرژی الکتریکی را به یک کمیت فیزیکی تبدیل میکند.

جدول زیر لیست بعضی از کمیت های فیزیکی و سنسور و عمل کننده مربوطه شان را ذکر کرده است.

جدول 1 مثالهائی از سنسورها و عمل کننده ها.

کمیت -Real - World Quantitiy	حسگر - Sensor	عملگر -Actuator
حرکت – Motion	Digital Encoder	Stepping motor
درجه حرارت -Temperature	ترموکوپل -Thermocouple	Resistor
کشش -Strain	Load Cell	Motor
نور -Light	Photocell	Light bulb
تصویر -Image	CCD Camera	Laser Printer
فشار – Pressure	Strain Gauge Membrane	Pump
تشعشع -Radiation (p, α, β, γ, etc.)	Geiger Counter	Cyclotron
امواج رادیوئی -Radio Wave	Radio Receiver	Radio Transmitter

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.

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،

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.

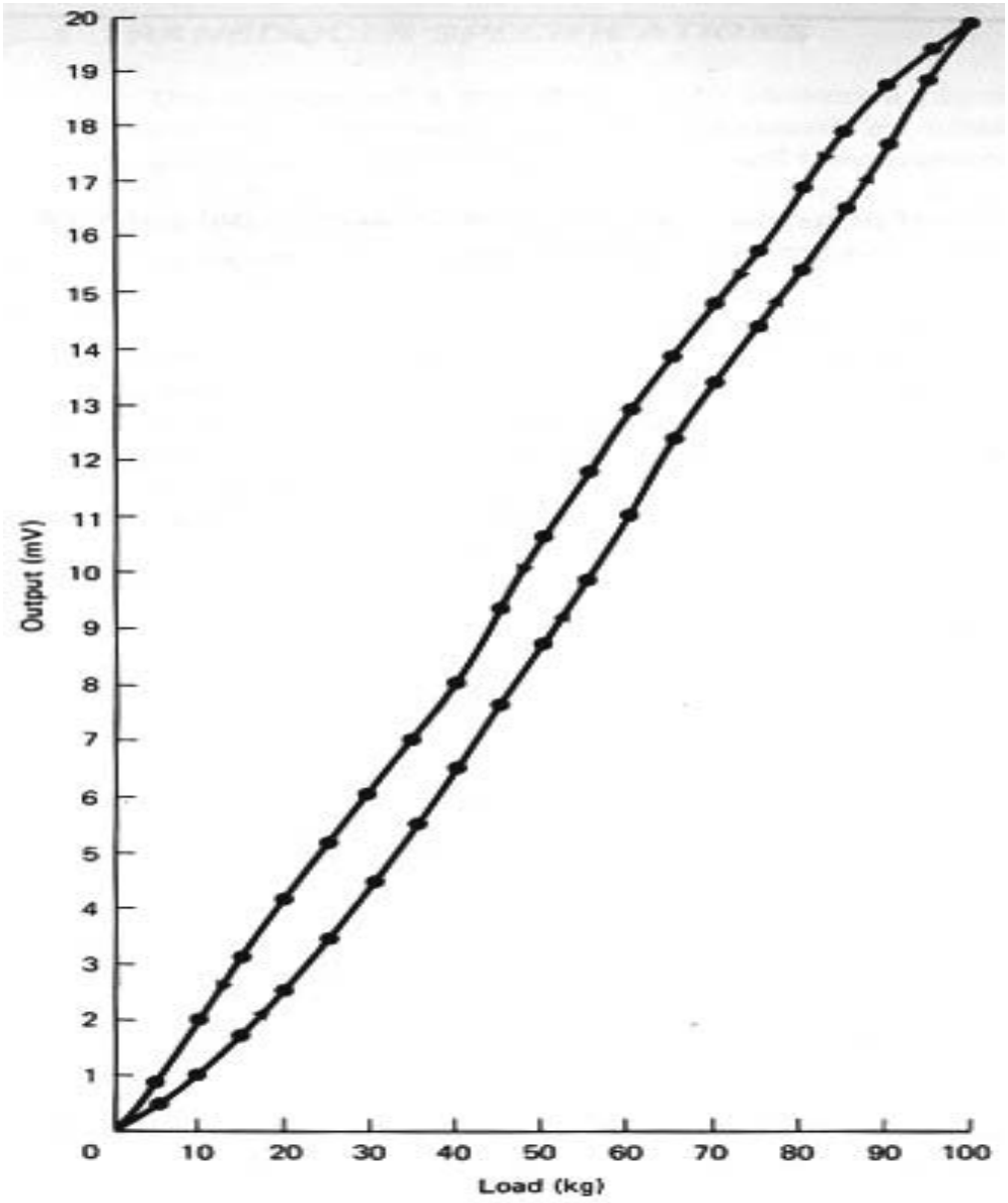
خطا اختلاف بین مقدار صحیح (درست) خروجی ترانسدیوسر و مقدار خروجی عملی آن است؛ اما معمولاً دقت بصورت درصد خطا تعریف می‌شود. سوال مهم این است که ، درصد چه چیزی؟. برای جواب به این سئوال سه پاسخ مختلف وجود دارد.

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



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.

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.

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

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.

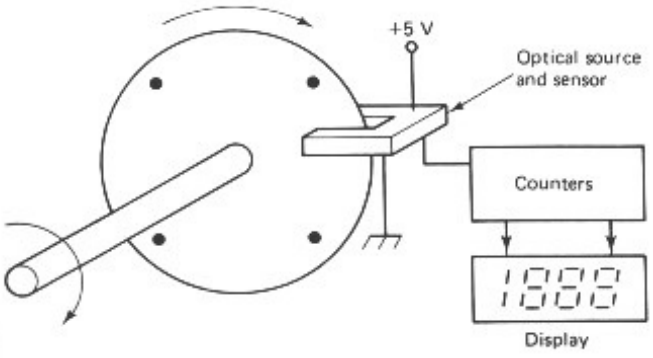
خطای خیلی مهم وقتی پیش می‌آید که، دو نوع دقت، بصورت درصدی از رنج کامل و یا بصورت درصدی از مقدار اندازه گیری شده را با هم اشتباه کنیم.

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.

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: $\frac{10\text{mV}}{^\circ\text{C}} \times 100^\circ\text{C} = 1\text{V}$

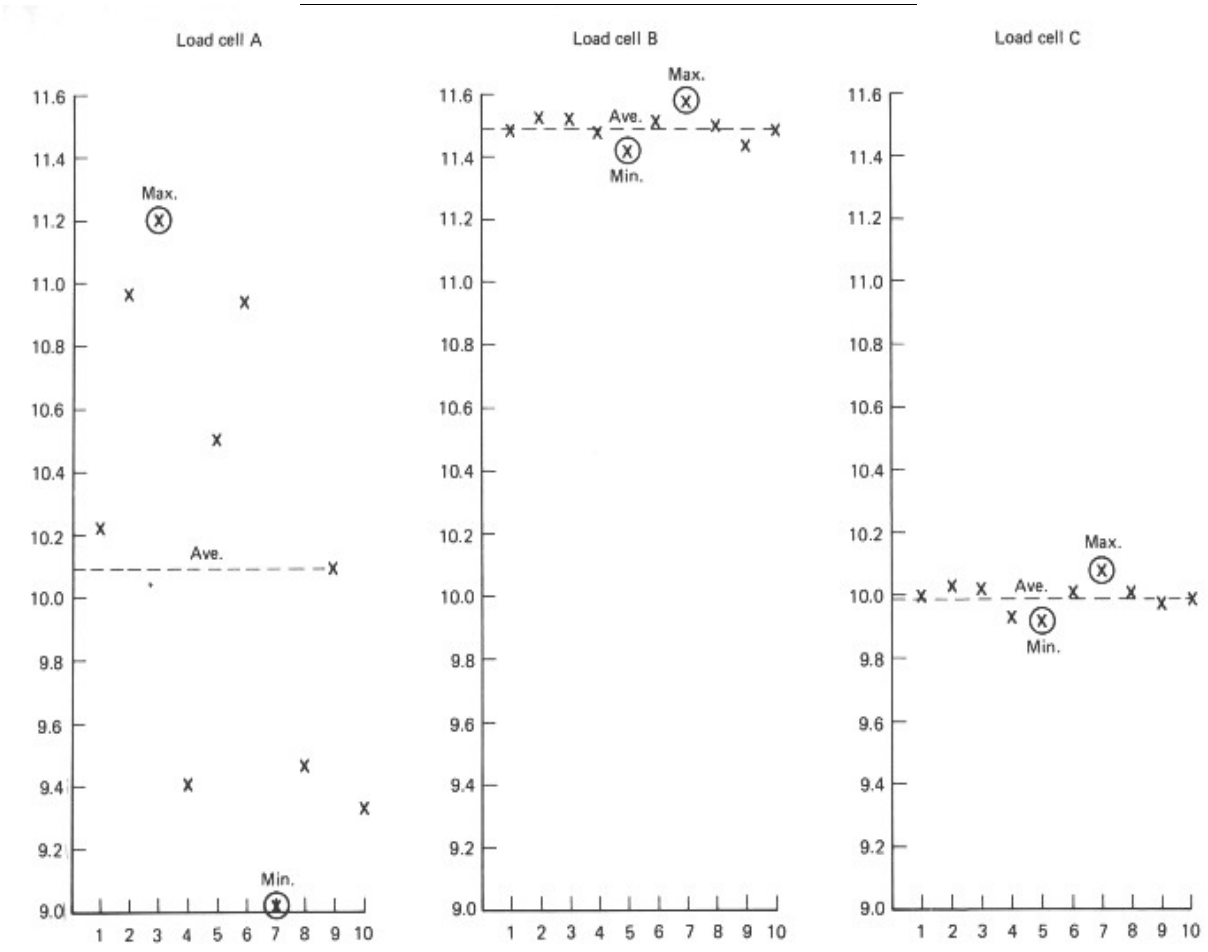
این مقدار نزدیک به دامنه ماکزیمم ورودی مبدل نمی‌باشد. بنابراین راه حل موجود، تقویت خروجی ترانسدیوسر به اندازه 5 برابر است، در این حالت در 100 درجه سانتی گراد، 5 ولت تولید می شود که با رنج کامل ورودی تطبیق می‌نماید. یک درجه سانتی‌گراد اکنون $V = 1oC * 10\ mV/oC * 5 = 50\ mV$ چون حساسیت مبدل آنالوگ به 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.

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

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

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

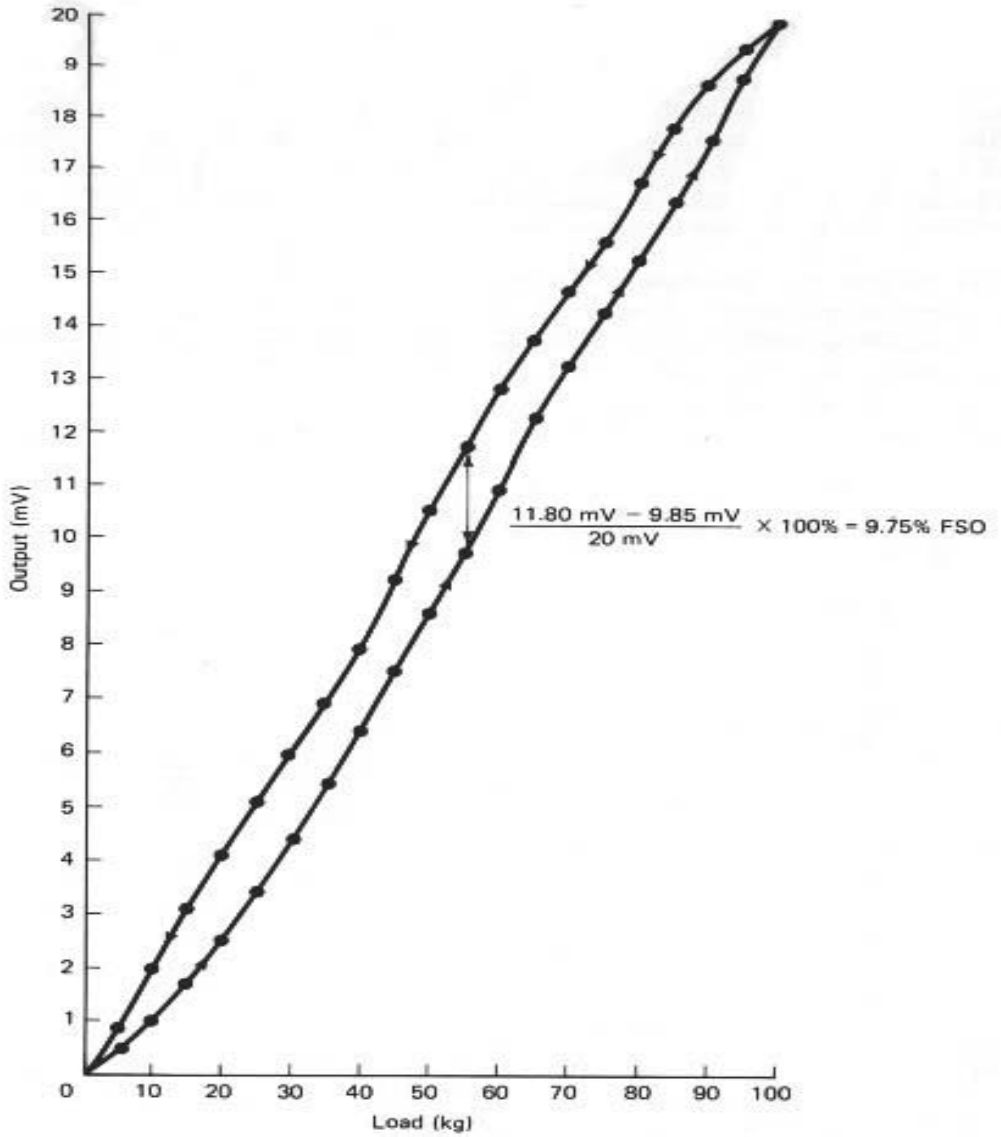
تعریف می نمایند.

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.

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

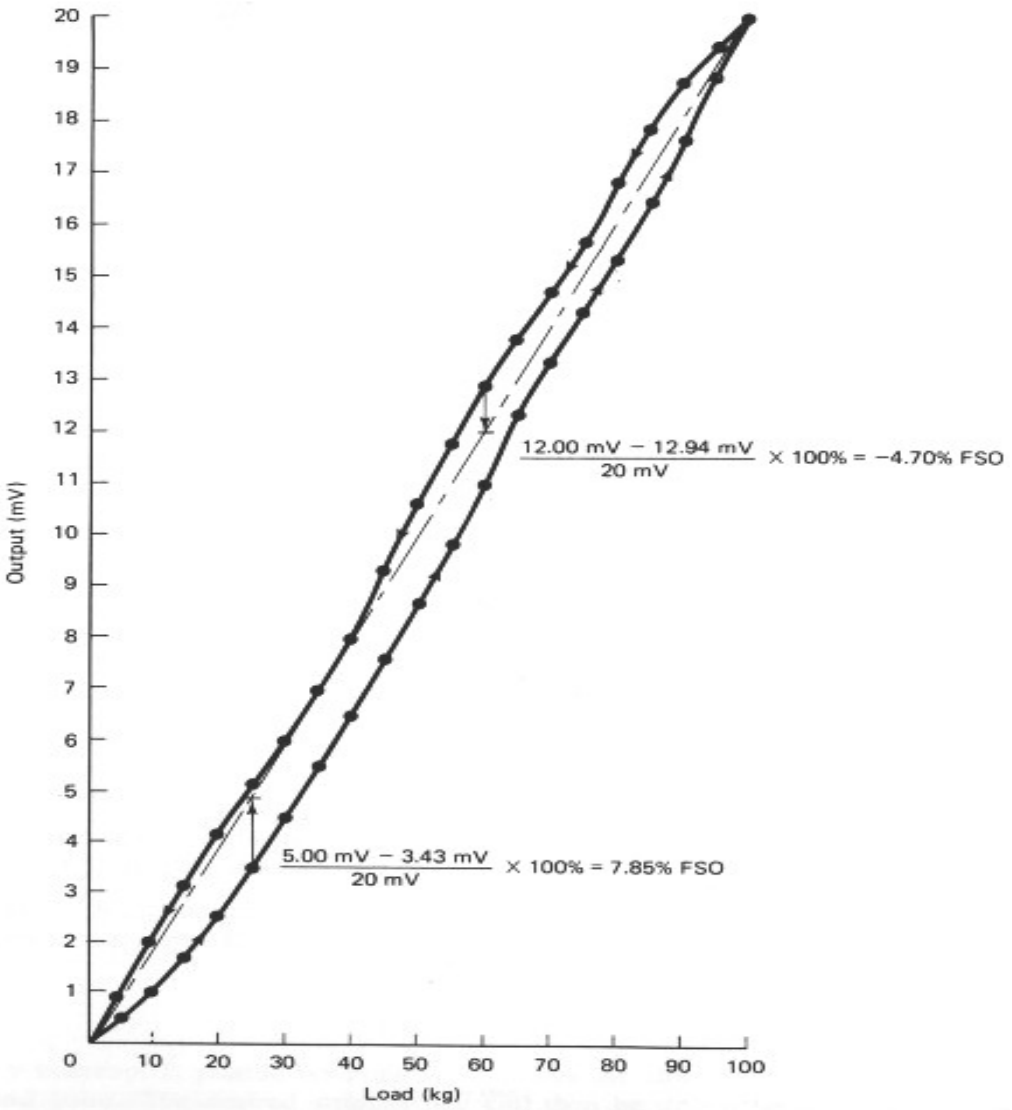
همچنین بخاطر داشته باشید که پسماند یک مشخصه استاتیکی است. داده در هر زمان برای یک نقطه برداشته می‌شود آ نهم وقتی که خروجی ترانسدیوسر بحالت پایدار خودش رسید. اینرسی و اصطکاک یا زبری باعث اثر مشابهی می‌شوند که مشابه پسماند به نظر می‌رسد. بنابراین اگر ورودی را تغییر دهید و اجازه ندهید خروجی به حالت پایدارش 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.

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).

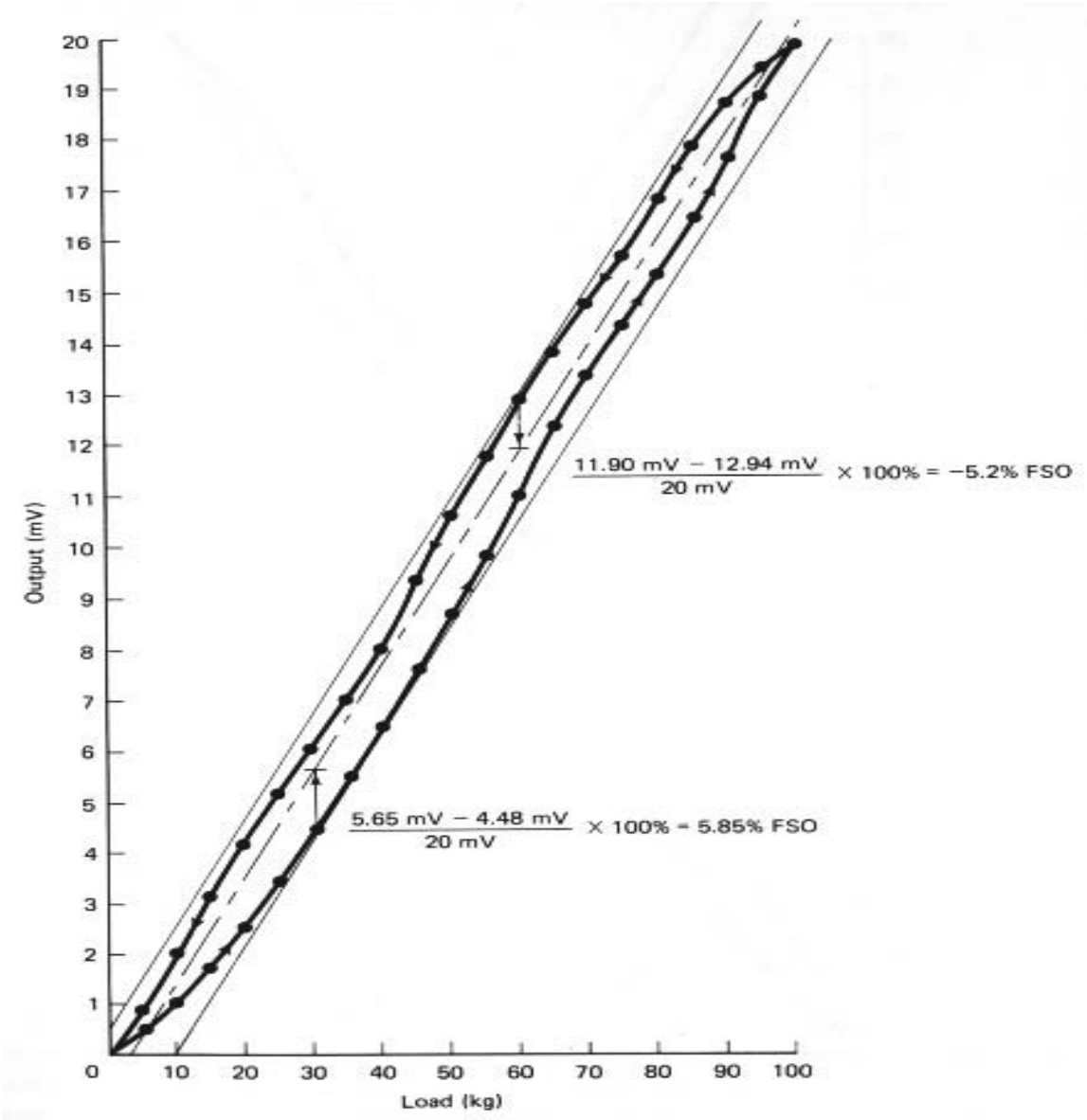
برای حالت خطی بودن نقاط انتهائی، یک خط مستقیم بین دو نقطه انتهائی منحنی کالیبراسیون رسم می‌کنیم. اگر از مقادیر تئوری صفر و درجه بندی کامل ورودی و خروجی استفاده شود، عدد نتیجه شکل خطی تئوری نامیده می شود.

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

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

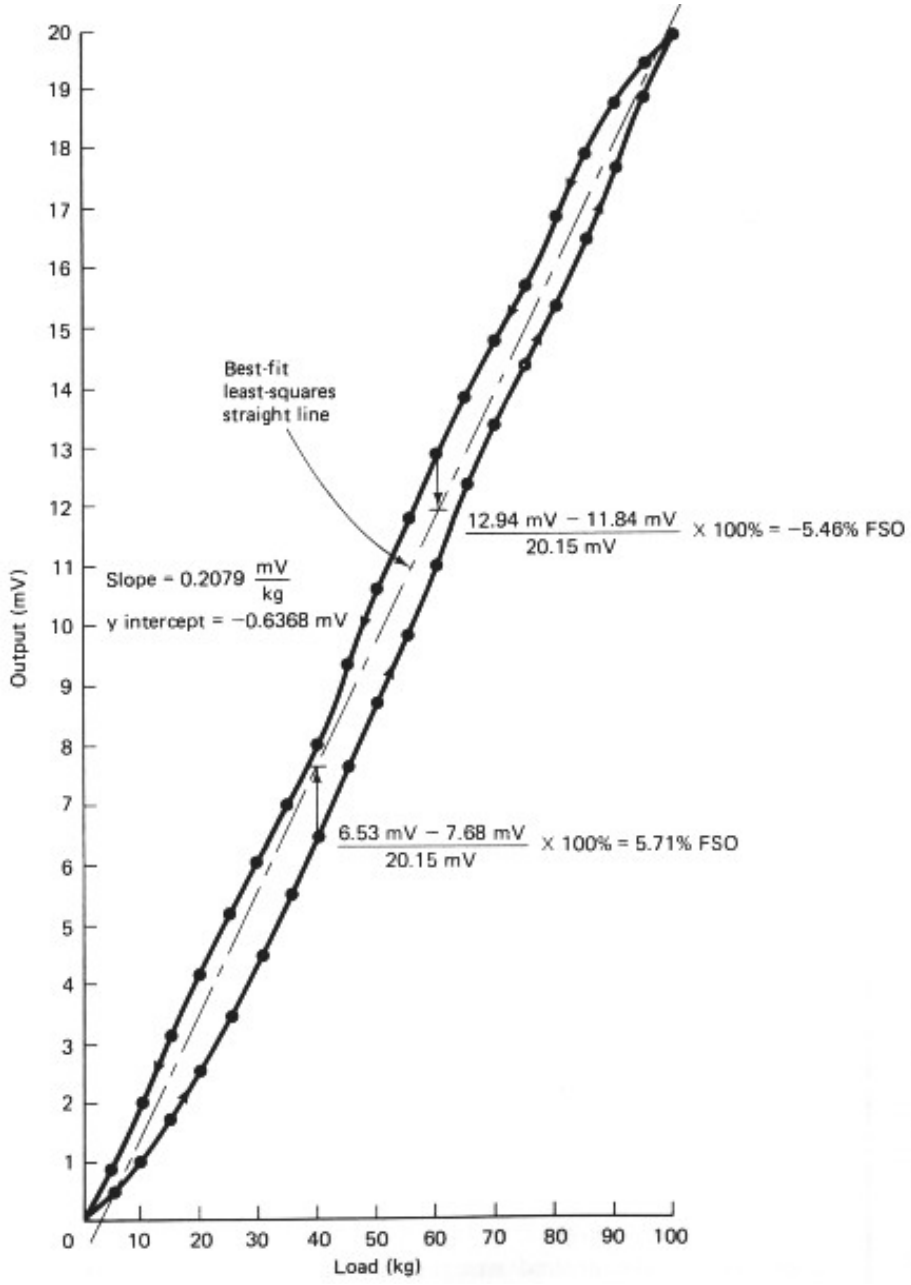
خطی بودن کمترین مربعات، توسط یک خط مستقیم که از روش آماری بدست آمده اندازه گیری می‌شود. این خط مستقیمی است که مجموع مجذور فاصله‌ها (خطا) از آن کمترین و یا مینیمم است. با داشتن یک مجموعه ازجفت x,y ها که داده‌های کالیبراسیون هستند (ورودی محور x و خروجی محور y است)، می‌توانید معادله خط مستقیمی را محاسبه 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

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

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:

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

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.

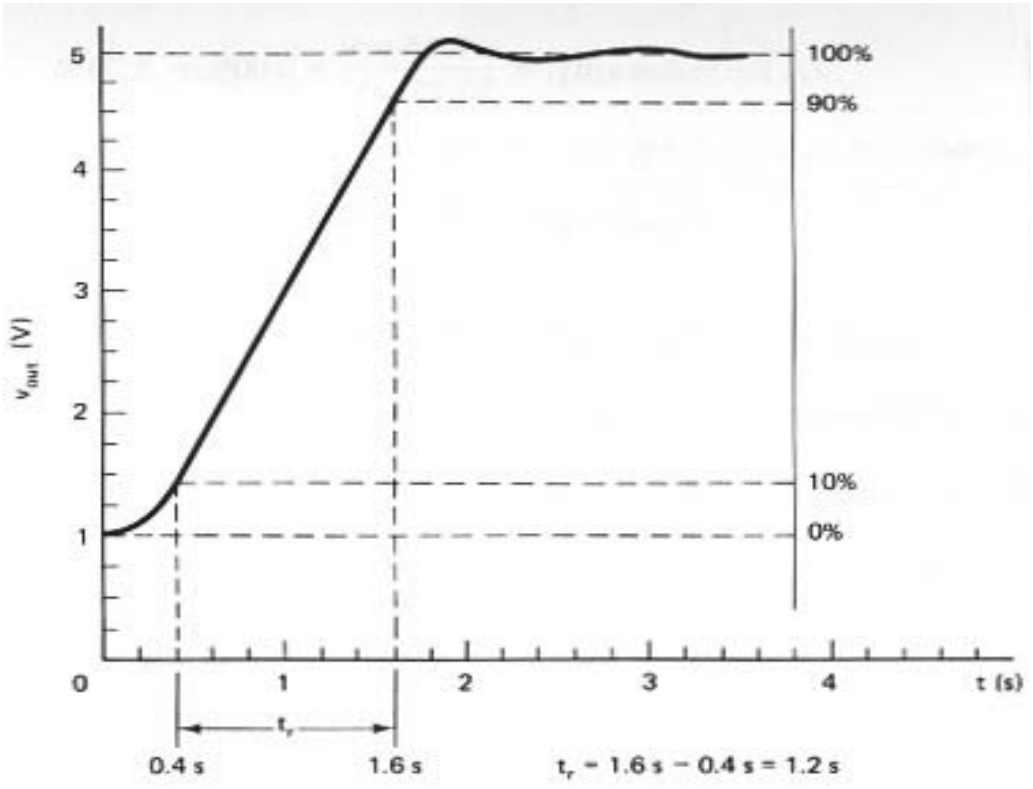
عملکرد دینامیکی یک ترانسدیوسر را می‌توان به دو طریق تشریح نمود. پاسخ ترانسدیوسر به تغییر پله در ورودی‌اش، بوسیله زمان جهش، ثابت زمانی، و زمان مرده تعریف می شود.

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.

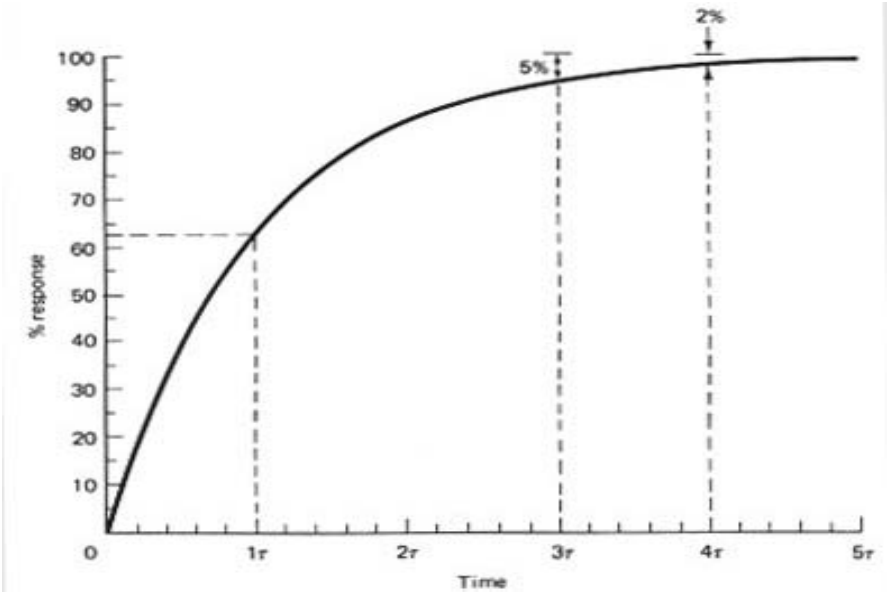
پاسخ المانهای درجه اول و درجه دوم دارای پارامترهای کلیدی زیر هستند.

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.



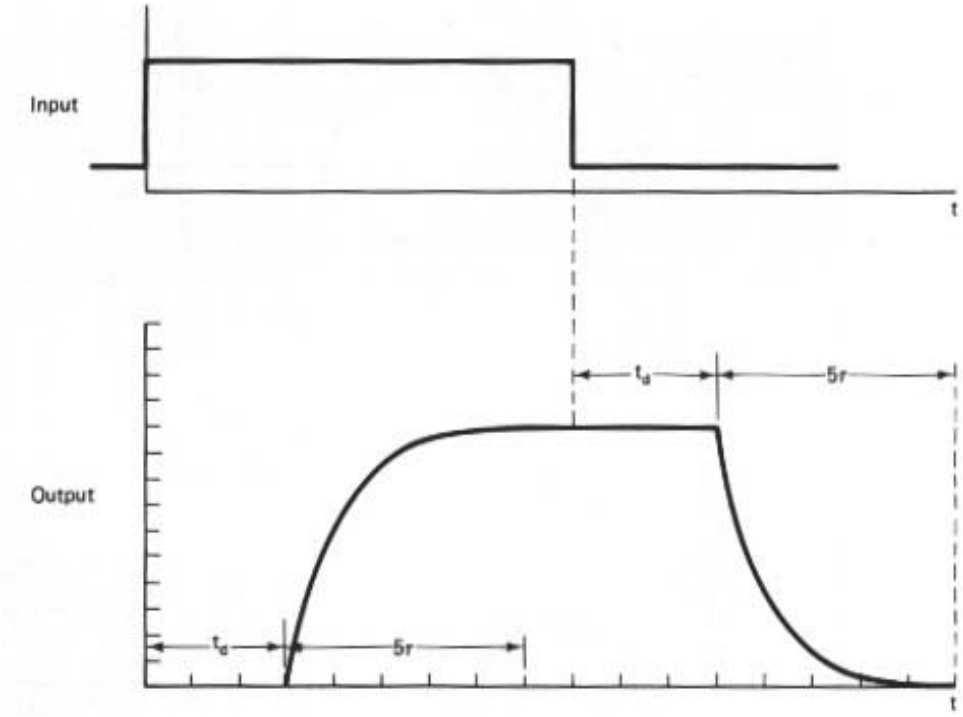
شکل ۸ - زمان جهش

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

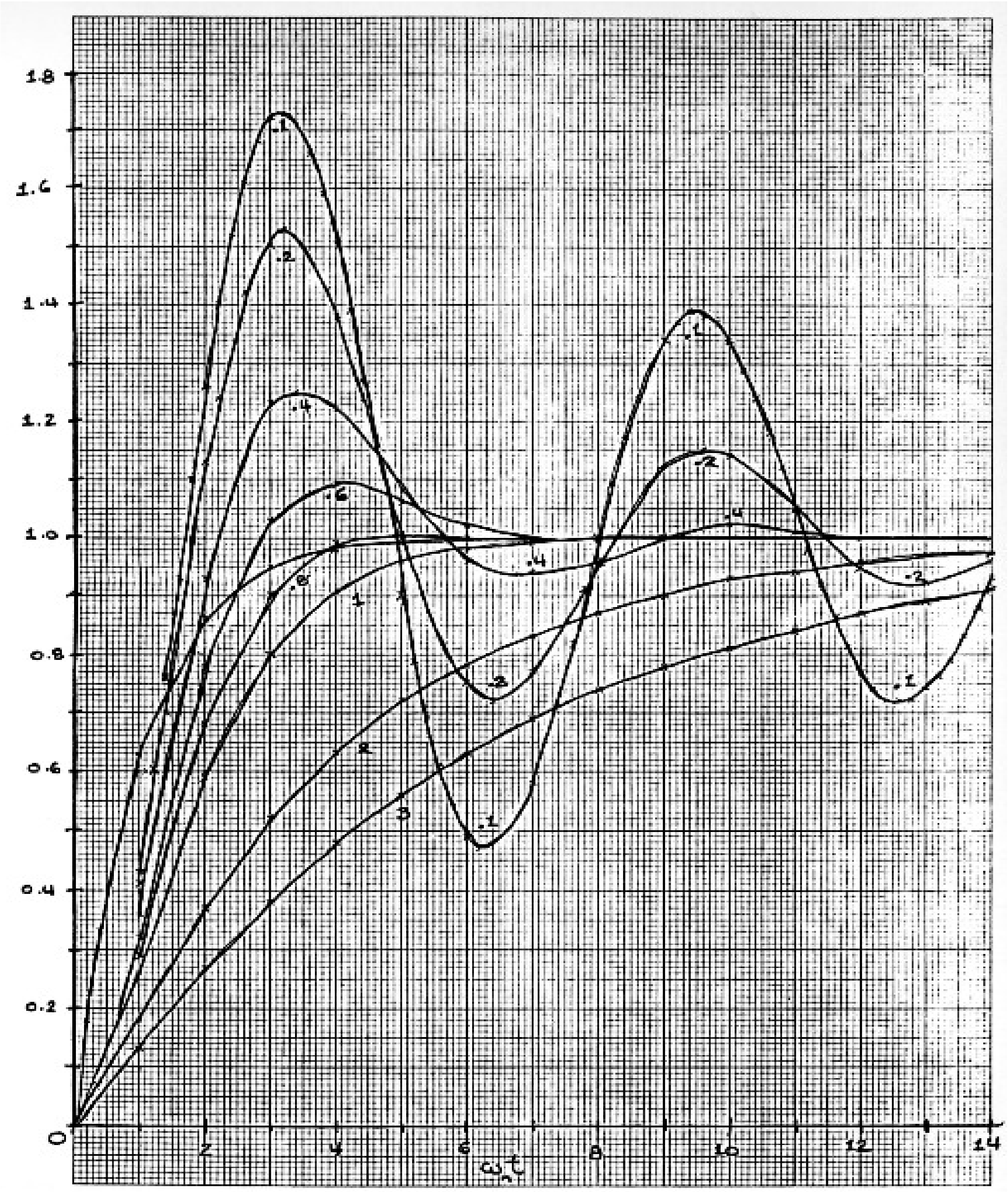
زمان مرده مدت زمانی است که طول می‌کشد تا پس از اعمال تغییر پله به ورودی، خروجی ترانسدیوسر شروع به تغییر کند. پاسخ ترانسدیوسر به همراه زمان مرده و ثابت زمانی (درجه اول) در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



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:



شکل ۱۱- پاسخ پله (نرمالیزه شده)

$\xi > 1$ آنگاه خیلی میرا

$\xi = 1$ آنگاه میرایی بحرانی

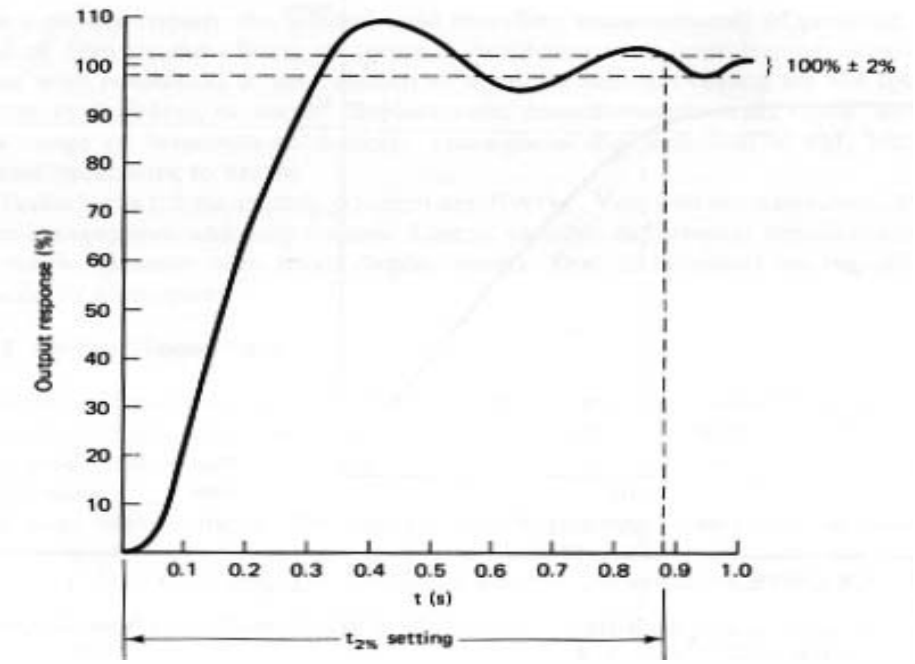
$\xi < 1$ آنگاه زیر میرا

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:

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

این مقدار مستقیماً به ضریب میرایی ربط دارد.

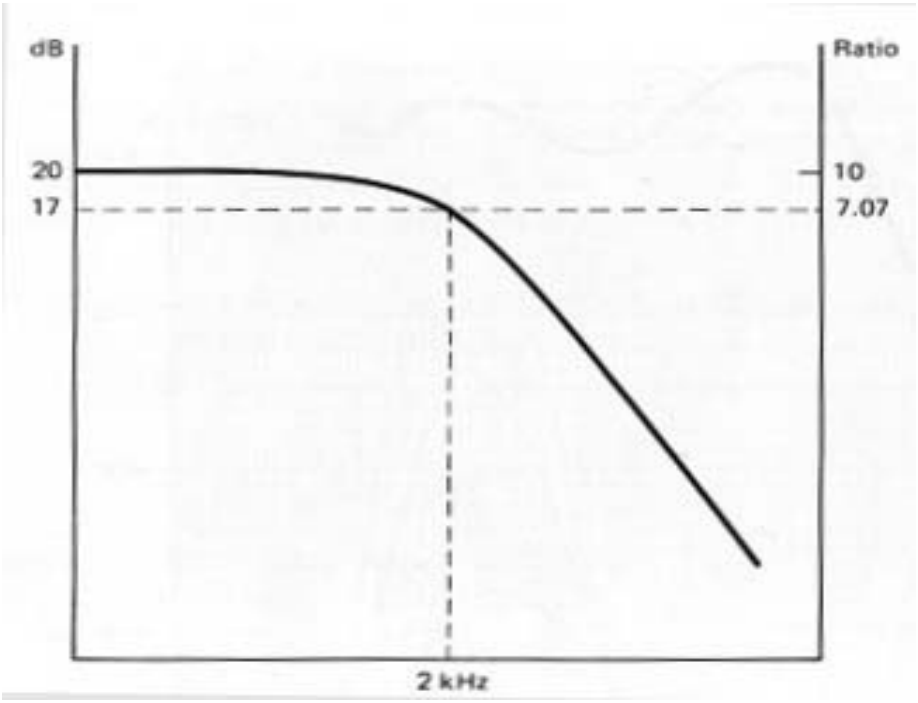
اما چه مدت بایستی صبر کرد تا ترانسدیوسر خروجی مفیدی بدهد؟ زمان پایدار شدن به شما نشان خواهد داد. زمان پایداری 2% عبارت است از زمانی که طول می‌کشد تا پس از اعمال ورودی پله، خروجی ترانسدیوسر پایدار شده و در یک محدوده $\pm 2\%$ مقدار نهائی‌اش قرار گیرد. این موضوع در شکل ۱۲ رسم شده است.



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.



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.

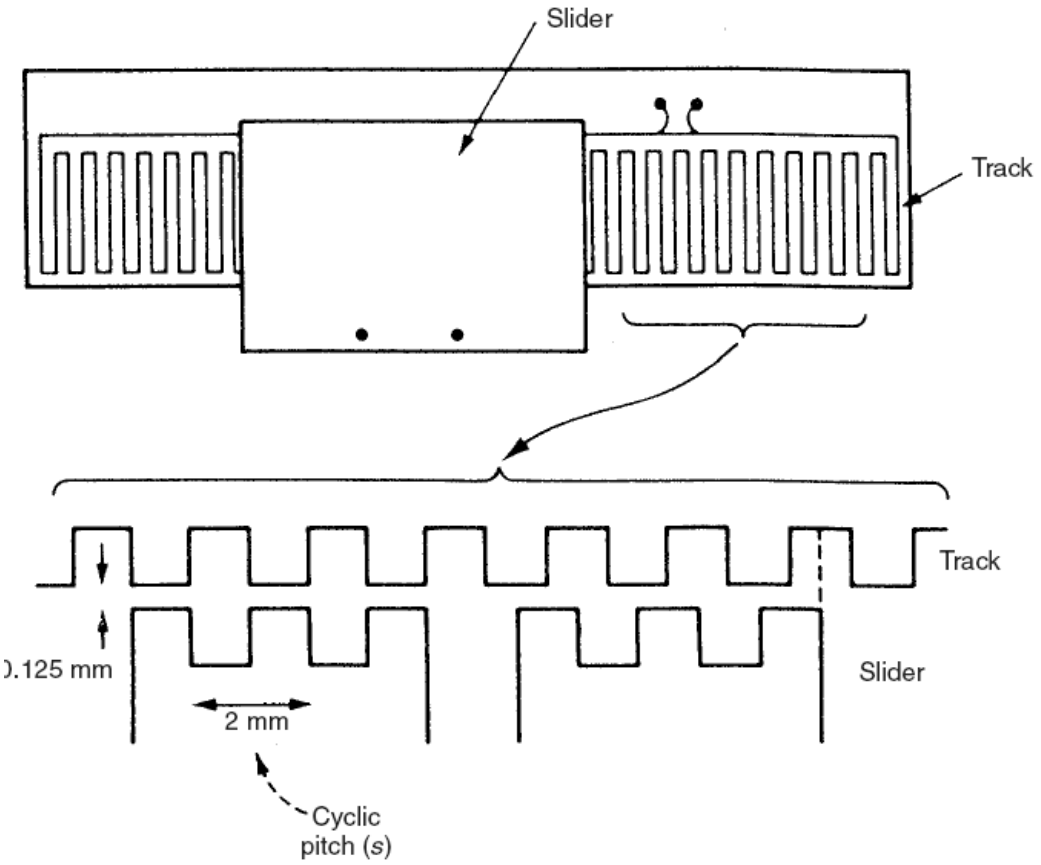
ترانسدیوسرهای موقعیت

تعیین موقعیت یک جسم در غالب سیستم های کنترل از اهمیت زیادی برخودار است. بعنوان مثال دستگاههای اتوماتیک نصب قطعات با استفاده از روبات ها، نیاز به تعیین دقیق موقعیت دارند. دستگاههای تراش، فرم دادن و سوراخ کردن قطعات ماشین همانند حرکت هد یک دیسک درایو کامپیوتر و یا حرکت قلم در یک دستگاه رسم احتیاج به کنترل و بنابراین اندازه‌گیری موقعیت دارند. کنترل ضخامت یک فیلم و یا مقدار افزایش ابعاد یک قطعه در اثر حرارت، احتیاج به اندازه‌گیری موقعیت با قدرت تشخیص خیلی کمتر از یک میلی متر دارد. بررسی فوندانسیون یک ساختمان چند طبقه نیز احتیاج به اندازه گیری جابجائی با دقت های مشابه اما در بازه چند صد متر خواهد داشت. در جهان تکنیک، دانستن موقعیت، یک پارامتر بسیار مهم بشمار می‌آید.

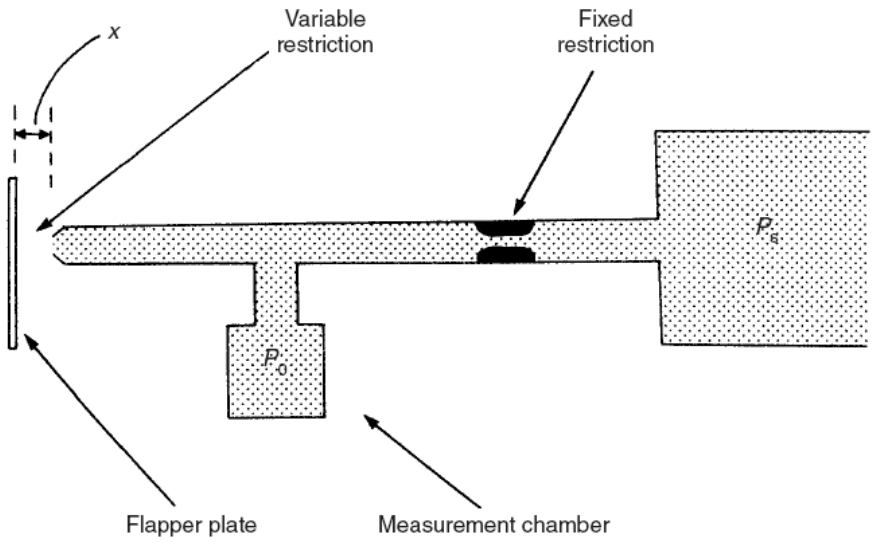
تکنیکهای اندازه‌گیری موقعیت متفاوت هستند. در این درس با سه تکنیک آشنا خواهید شد. اول پتانسیومترها که ارزان قیمت بوده و استفاده از آنها آسان است، دوم ترانسفورمرهای دیفرانسیلی خطی (LVDT) که برای آشکار سازی جابجائی‌های خیلی کوچک مورد استفاده هستند، و سوم اینکودرهای نوری که دارای عمر خیلی بالایی بوده و در عین حال بسادگی به کامپیوتر متصل می‌شوند.

بررسی اصول کار و موارد استفاده انواع و روشهای مختلف دیگر تعیین موقعیت که تعدادی از آنها در زیر نمایش داده شده اند بعهده دانشجویان خواهد بود

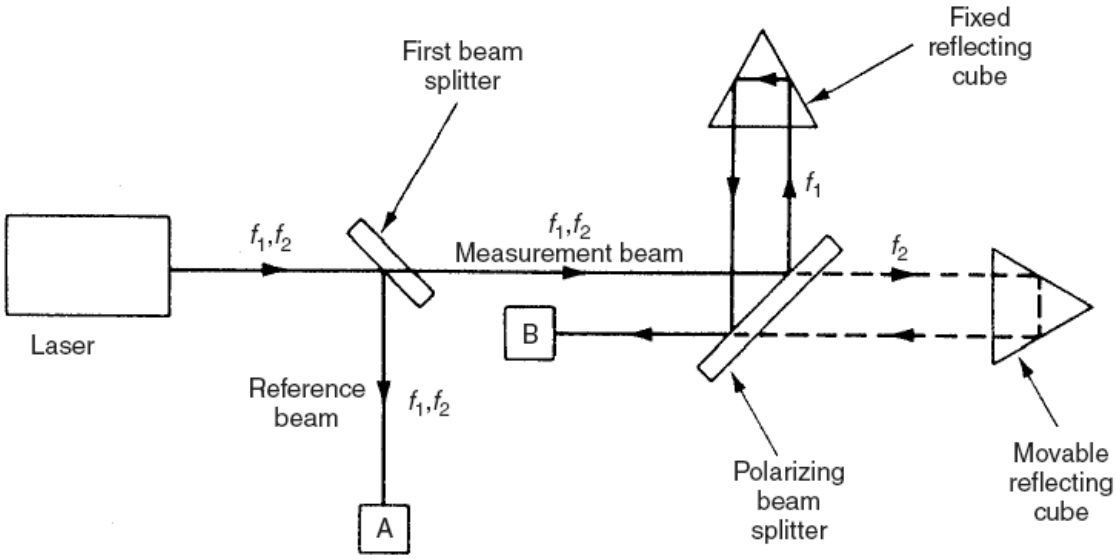
- ***The linear inductosyn***



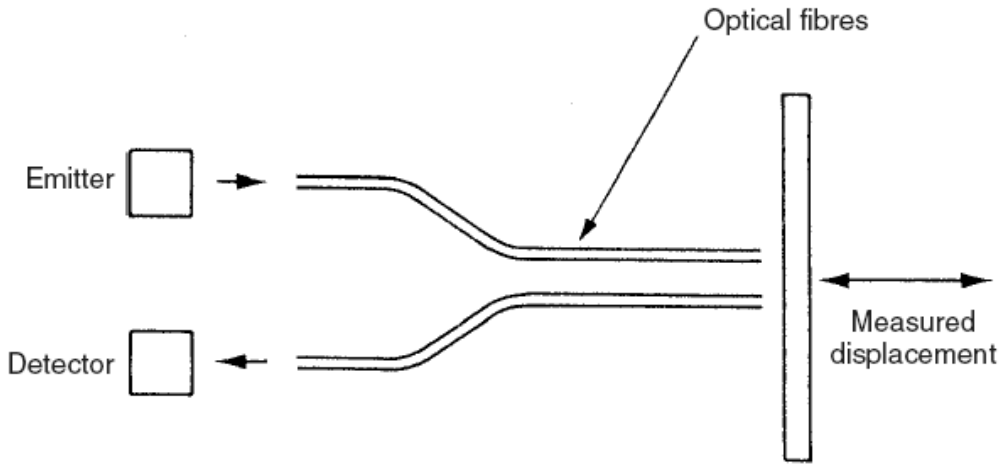
- ***The nozzle flapper displacement transducer***



- ***Laser interferometer***



- ***Fotonic sensor***

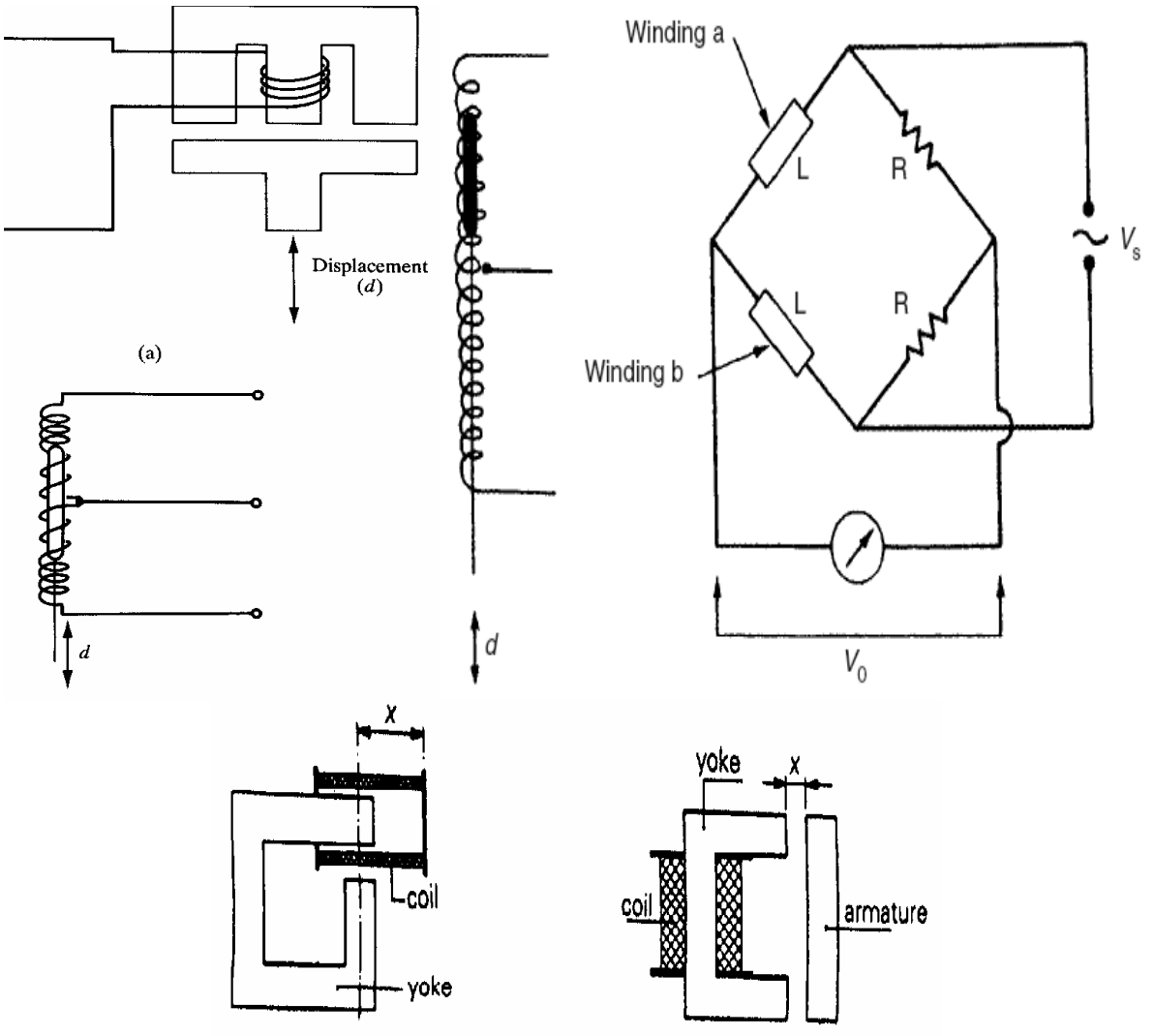


- **ترانسدیوسر تغییر مکان بروش القائی (*Variable Inductance Transducer*)**

اصول کار سنسورهاو یا ترانسدیوسرهای القائی در شکل های زیر بوضوح نشان داده شده است. این نوع وسیله در دو نوع ساخته میشود و دارای یک عدد سیم پیچ هستند.

در حالت ویا مورد اول سیم پیچ به دور محور وسطی قاب E شکل پیچیده شده است و حرکت صفحه مقابل قاب فوق میزان فلوی مغناطیسی حاصله در آنرا تغییر میدهد و موجب تغییر جریان عبوری در سیم پیچ میگردد.

در حالت و یا مورد دوم سیم پیچ به دو قسمت مساوی تقسیم شده است و هسته آهنی در بین این سیم پیچ حرکت میکند؛ که در حالت وسط خروجی صفر است. در حقیقت دو قسمت تقسیم شدهٔ سیم پیچ دو بازو و یا دو عضو از یک پل مغناطیسی را تشکیل میدهند.



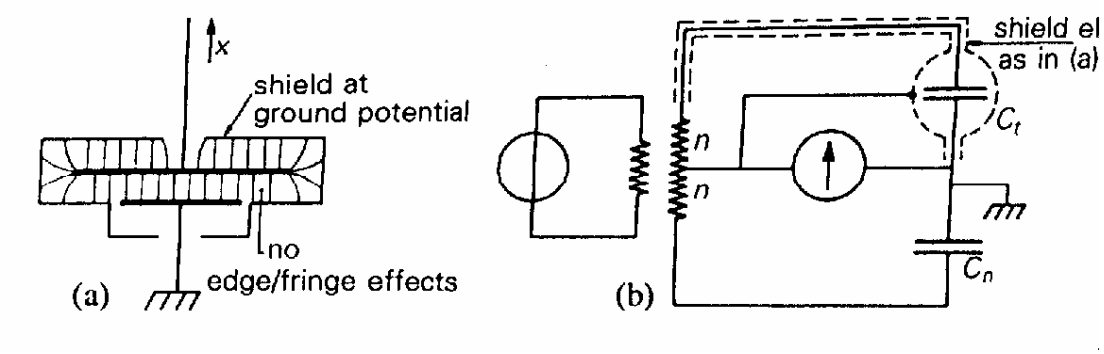
ترانسدیوسر القائی

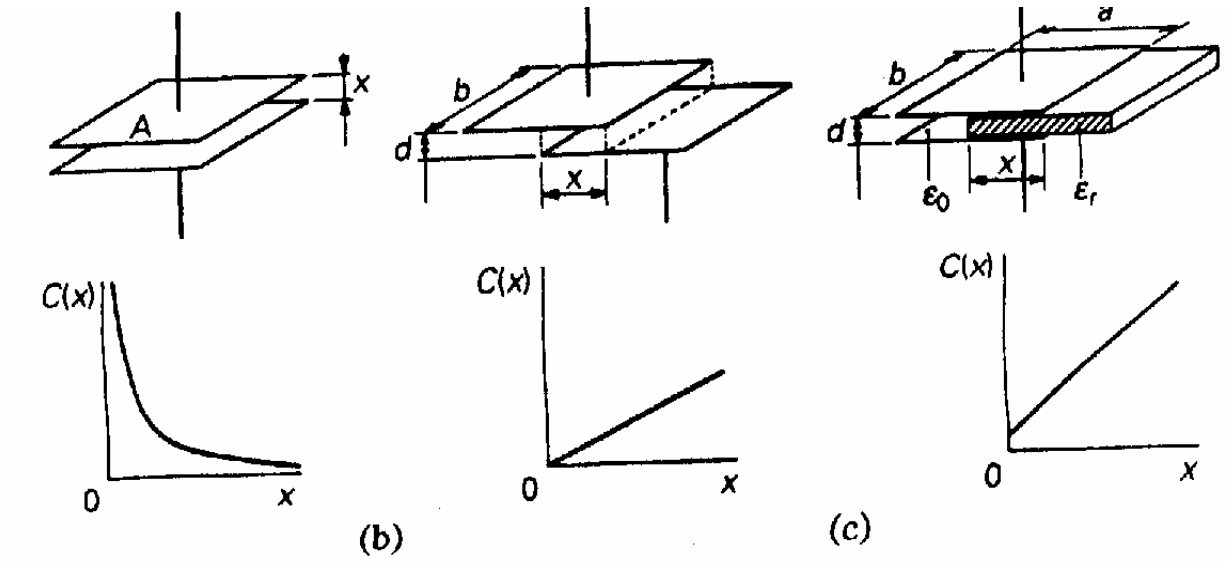
ترانسدیوسر تغییر مکان بروش ظرفیت متغیر (خازنی)

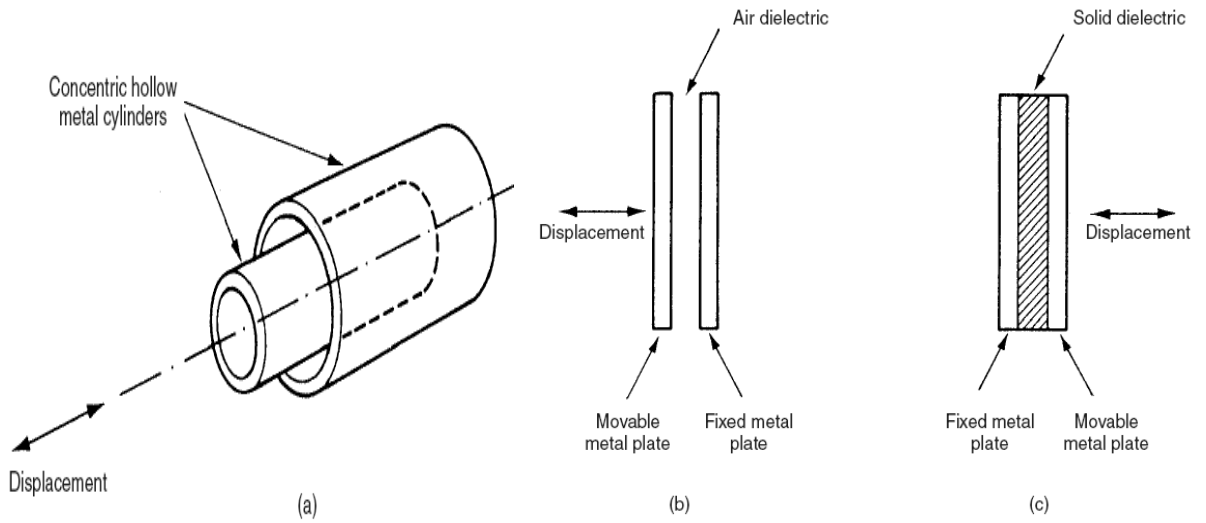
اصول کار سنسورهاو یا ترانسدیوسرهای خازنی در شکل های زیر بوضوح نشان داده شده است (Variable Capacitive Transducer) . همانگونه که در شکلها مشخص شده میزان تغییر مکان جسم مورد

نظر به یک صفحه (جوشن) خازن اعمال میشود و نتیجتاً میزان ظرفیت با تغییر مکان صفحه خازن تغییر میکند.

در نمونه اول تغییر مکان جسم مورد نظر به سیلندر داخلی خازن اعمال میگردد. در نمونه دوم تغییر مکان به صفحه متحرک خازن اعمال شده.







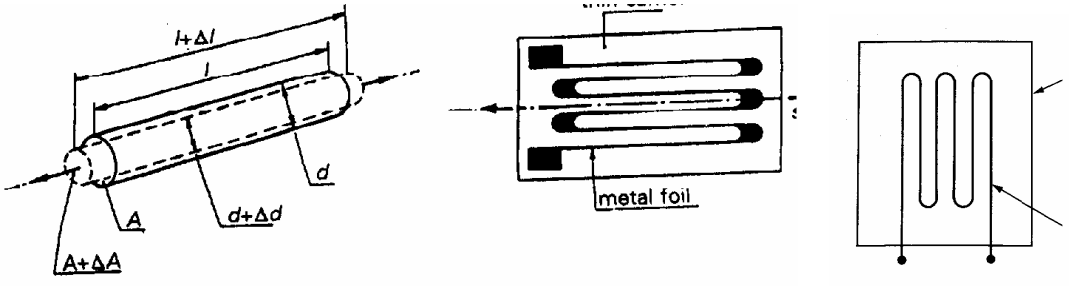
ترانسدیوسر خازنی

- **استرین گیج (*Strain Guage*)**

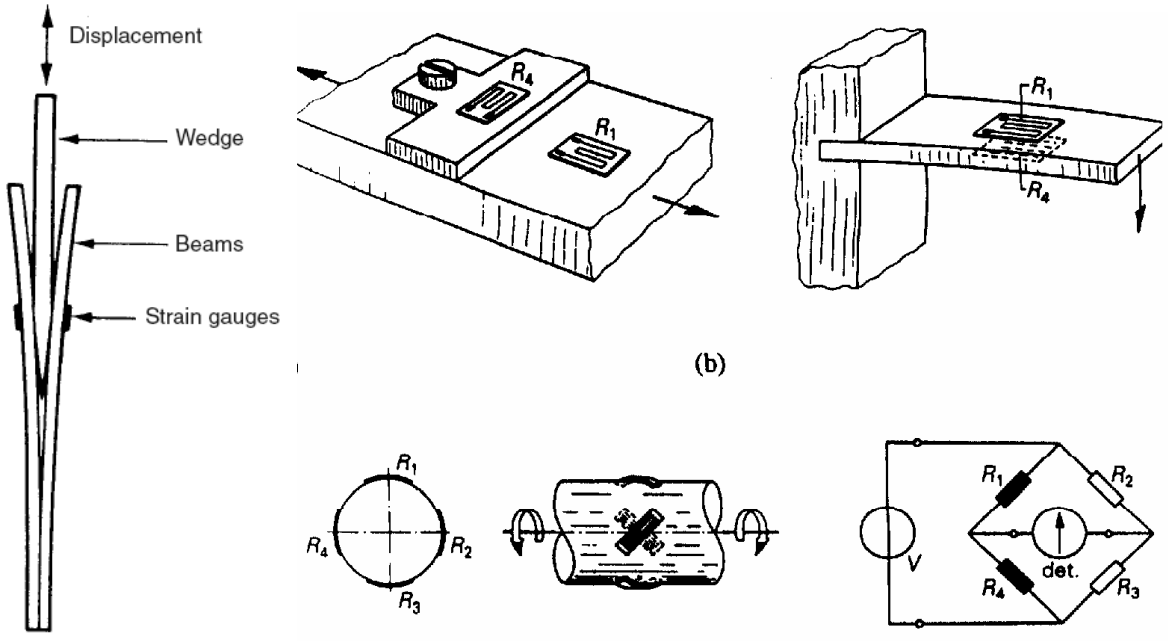
استرین گیج ها در حقیقت مقاومتی هستند که بواسطه اعمال کشش تغییر مقاومت الکتریکی در آنها پدید میاید. فاکتوری تحت عنوان گیج رابطه بین ورودی و خروجی این وسایل را تعیین میکند که بصورت زیر تعریف شده؛ که در آن ΔR میزان تغییرات در مقاومت و ΔS تغییرات در کشش استرین گیج میباشد. استرین گیج ها بر روی یک صفحه قابل انعطاف چسبانیده میشوند و کاربرد وسیعی در صنعت دارند.

$$Gauge\ factor = \frac{\Delta R}{\Delta S}$$

شکل اول نمایانگر استرین گیج میباشد. استرین گیج ها عمدتاً برای تعیین تغییر مکان های کوچک بکار میروند که نحوه نصب و استفاده از انها در شکل دوم نشان داده شده ؛ برای تعیین تغییر مکانهای زیاد مکانیسم ارائه شده در حالت سوم مورد استفاده قرار میگیرد. در این حالت تغییر مکان بیک گوه (Wedge) منتقل و با جدا شدن دو میله تعبیه شده از یکدیگر تغییر مقاومت استرین گیج های تعبیه شده بر روی میله ها میزان تغییر مکان اعمال شده به دستگاه را مشخص میکند.



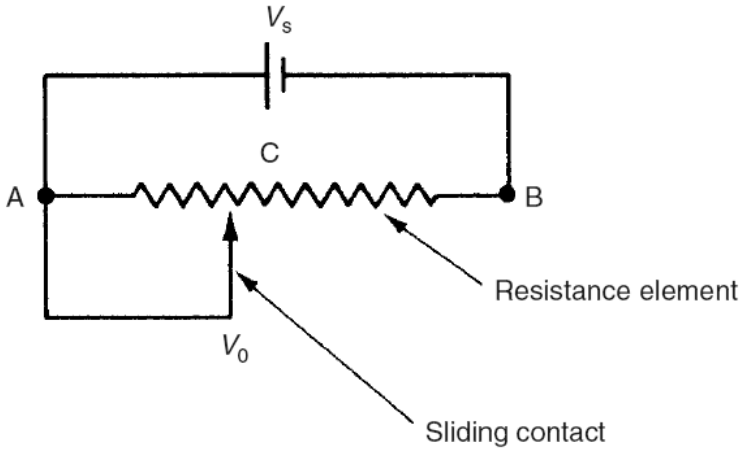
استرین گیج



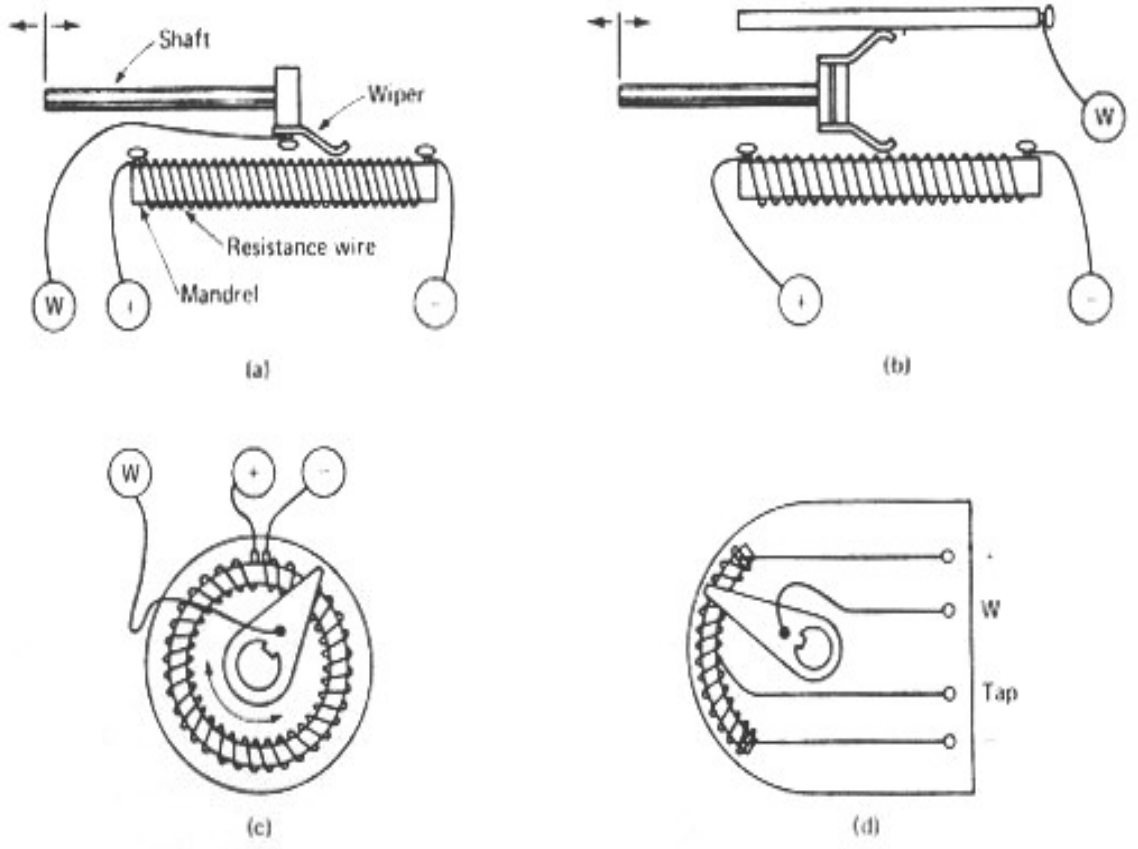
نحوه استفاده از استرین گیج برای اندازه گیری تغییر مکانهای کوچک و تغییر مکانهای بزرگ

پتانسیومترها

پتانسیومترهایی که برای اندازه‌گیری جابجائی استفاده می شوند، از نظر شکل مشابه آنهائی هستند که ممکن است برای تنظیم هر وسیله الکتریکی و یا الکترونیکی مورد استفاده قرار داده باشید. هر چند برای تولید پتانسیومترهای مورد استفاده در اندازه‌گیری جابجائی دقت فوق‌العاده بیشتری انجام می‌شود.



پتانسیومترهای خطی برای اندازه‌گیری جابجائی خطی و پتانسیومترهای دورانی برای اندازه‌گیری جابجائی دورانی در دسترس هستند. شکل ساختمانی آنها بصورت شکل زیر است. جابجایی زاویه‌ای حتی با رنج کامل 10^o نیز در دسترس است. یک پتانسیومتر تک دور قابلیت اندازه‌گیری دقیق تا 357^o را دارد.



شکل ۱۴ - انواع ترنسدیوسرهای موقعیت پتانسیومتری

پتانسیومترهای چند دور می‌توانند تا ۳۵۰۰° گردش را اندازه‌گیری کنند. این امکان با استفاده از مقاومت حلزونی شکل در بدنه بوجود می آید. جاروب کن پتانسیوتر دور و بالای قسمت حلزونی شکل حرکت می کند.

قسمت مقاومتی پتانسیومتر می‌تواند از سیم‌پیچ مقاومتی باشد. یک سیم خیلی نازک از جنس پلاتینیوم یا نیکل بدقت بر روی یک قرقره پیچیده می‌شود. همان طور که ذغال از یک حلقه به یک حلقه دیگر حرکت داده می‌شود، مقاومت بین این ذغال و طرفین مقاومت تغییر می‌کند. کوچکترین تغییر قابل تشخیص در موقعیت (قدرت تفکیک) وقتی اتفاق می‌افتد که ذغال از یک حلقه به حلقه بعدی تغییر مکان بدهد.بنابراین رابطه ریاضی قدرت تفکیک بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\text{قدرت تفکیک پذیری} = \frac{\text{جابجایی در رنج کامل}}{\text{تعداد دور سیم پیچها}}$$

مثال ۱۰ – لازم است موقعیت یک صفحه را اندازه بگیریم. این صفحه حداکثر ۰,۸ متر حرکت می‌کند و موقعیت آن تا 0.1cm بایستی معلوم بشود. قسمتی از مکانیزمی که صفحه را به حرکت در می‌آورد میله ای است که ۲۵۰° می‌چرخد البته در صورتی که صفحه از یک وضعیت انتهایی به وضعیت انتهایی دیگر جابجا شود. یک پتانسیومتر کنترل با مشخصات ماکزیمم دوران ۳۰۰° و ۱۰۰۰ دور سیم‌پیچ موجود است. آیا می‌توان از این وسیله استفاده کرد؟

حل ـ میله یک تبدیل

$$\frac{250^\circ}{0.8\text{m}} = 312.5^\circ/\text{m or } 3.125^\circ/\text{cm}$$

را می‌دهد. قابلیت تشخیص 0.1cm برای صفحه مساوی با

$$0.1\text{ cm} \times 3.125\ ^\circ/\text{cm} = 0.3125\ ^\circ$$

درجه قدرت تفکیک مورد نیاز می‌شود. بنابراین بایستی پتانسیومتر از این قابلیت برخوردار باشد. قابلیت تشخیص پتانسیومتر عملا

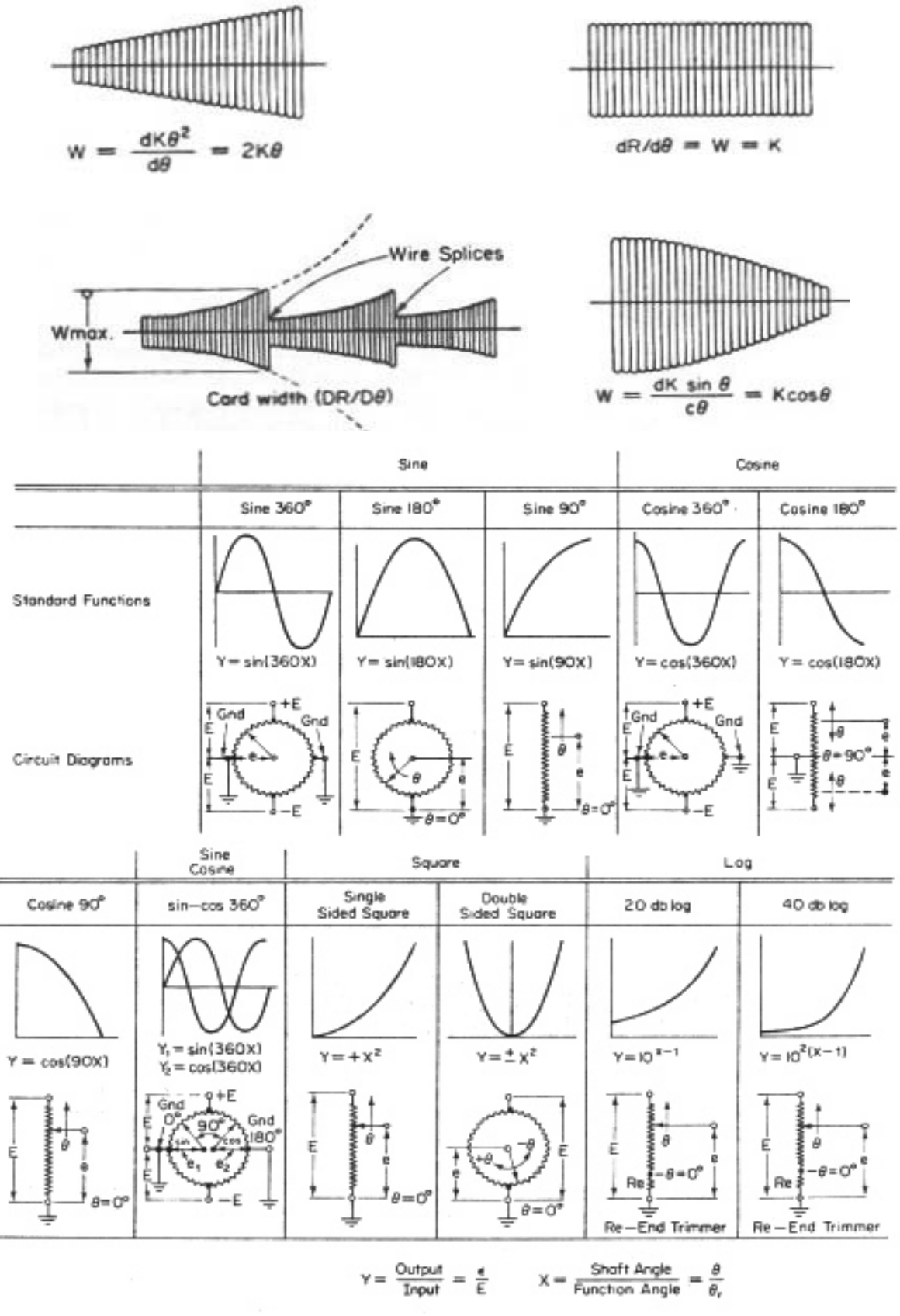
$$\frac{300^\circ}{1000} = 0.300^\circ$$

است. پس پتانیومنتر یک گردش 0.3° را می‌تواند تشخیص دهد که قدرت یا قابلیت تشخیص بهتری از مقدار لازم 0.3125° است. بنابراین پتانسیومتر کار می‌کند.

اگر شکل بدنه قرقره که بر روی آن سیم‌پیچی انجام شده است یکنواخت باشد، رابطه ای خطی مابین موقعیت ذغال و ولتاژ خروجی بدست می‌آید. هر چند چنانچه شکل بدنه تغییر کند تابع انتقال غیر خطی مشابه با آنچه که در شکل زیر دیده می‌شود بوجود خواهد آمد.

توابع استاندارد متعددی موجود هستند، همچنین می‌توان رابطه مورد نظر را برای رابطه بین ولتاژ و موقعیت تولید کرد. از این روابط غیر خطی می‌توان برای جبران غیر خطی بودن عمل اندازه‌گیری و یا بوجود آوردن یک تابع خاص برای روش کنترل بدون استفاده از روابط ریاضی، الکترونیک و یا کامپیوتر استفاده نمود.

توابع استاندارد در شکل زیر نشان داده شده‌اند. در حین ملاحظه این دیاگرامها توجه داشته باشید که آنچه مشاهده می‌کنید ولتاژ خروجی و رابطه آن با تغییرات پیوسته پتانسیومتر از یک انتها به انتهای دیگر است.



شکل – توابع مقاومتی برای پتانسیومترهای غیر خطی

پتانسیومترهای پیوسته دارای بدنه ای از فیلم کربن، فیلم فلزی، پلاستیک هادی و یا فلز سرامیکی هستند. این پتانسیومترها مزایای متعددی نسبت به نوع سیم‌پیچی‌شده دارند. اول اینکه، قابلیت تشخیص آنها خیلی بیشتر است، زیرا تعداد محدودی سیم‌پیچ دور یک قرقره نیست. چون ذغال در طول یک مسیر صاف یا هموار حرکت می‌کند (از یک دور به دور دیگر نمی پرد)، خوردگی، حرکت‌های بی‌مورد و نتیجتاً خرابی کمتری دارد. سرعت ماکزیمم چرخش پتانسیومترهای سیم‌پیچ‌شده حدود ۳۰۰ دور در دقیقه است. بالاتر از آن، نویز حاصل از حرکت و جابجایی ذغال ممکن است بیش از حد شود. یک پتانسیومتر پیوسته را می‌توان تا سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه چرخانید.

لازم است تعدادی از مشخصه‌های متفاوت الکتریکی را برای فهم و انتخاب پتانسیومتر بدانیم. این مشخصه‌ها عبارتند از: قدرت تفکیک پذیری (جابجایی، ولتاژ،از نظر تئوری) قابلیت خطی بودن، پیوستگی (بر مبنای پایه، بر مبنای صفر، غیر وابسته)، تلرانس مقاومت، موقعیت سرها، توانایی قدرت، نویز، گشتاورهای راه‌اندازی و چرخش، ممان اینرسی. مشخصه‌ی ac ، جابجایی الکتریکی بیش از حد. در بخش اول در مورد قابلیت تفکیک پذیری و خطی بودن صحبت شد. چون بیشتر پتانسیومترها برای تولید ولتاژ استفاده می‌شوند،اهمیت دقت مقاومت آنها به اندازه اهمیت داشتن دقت ولتاژ ارائه شده توسط پتانسیومتر نیست. هر چند، بایستی توانایی قدرت و توان، درجه حرارت محیط کار و حرارت داخلی ایجاد شده به دقت ملاحظه شوند. روابط و نقش این پارامترها در مثال زیر نشان داده شده‌است.

مثال - یک پتانسیومتر کنترلی دارای مشخصات زیر است:

۱۵۰Ω ، 1W به ازای هر یک درجه بالاتر از 65^oC، $10\ mW/^oC$ از توانایی اش کم می شود، مقاومت گرمایی $30^oC/W$ ، آیا می‌توان از آن در ولتاژ ۱۰ ولت تغذیه و درجه حرارت محیط تا ۸۰ درجه سانتیگراد استفاده کرد.

حل ـ قدرت تلف‌شده بوسیله پتانسیومتر مساوی است با:

$$P = \frac{E^2}{R} = \frac{(10V)^2}{150\Omega} = 667mW$$

حرارت واقعی پتانسیومتر بستگی به درجه حرارت محیط و افزایش حرارت در نتیجه توان تلف شده در پتانسیومتر دارد. (گرم شدن خودی).

$$T_{pot} = T_{ambient} + P\theta = 80°C + (667\ mW)(30°C/W) \quad = 80°C + 20°C = 100°C$$

مقدار توان تلف شده مجاز، بایستی به ازای هر درجه بالاتر از 65^oC ، $10\ mW$ کم شود.

$$\begin{aligned} P_{allowed} &= P_{rated} - (T_{pot} - 65°C)(10mW/°C) \\ &= 1W - (100°C - 65°C)(10mW/°C) \\ &= 1W - 350mW = 650mW \end{aligned}$$

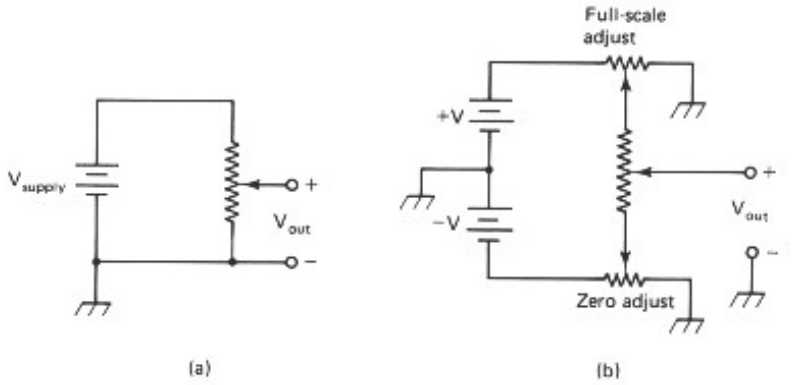
درنگاه اول به نظر می‌رسد که قدرت تلف شده توسط پتانسیومتر خیلی کمتر از 1W قدرت نامی‌اش است. ولی وقتی که توان مجاز را به دلیل افزایش درجه حرارت و به حساب آوردن خودگرم شدن کاهش می

دهیم، حداکثر مقدار مجاز آن 650 mW به دست می‌آید که کمتر از ۶۶۷mW می‌شود. در نتیجه این پتانسیومتر قابل استفاده نیست.

ممکن است نویز بوسیله ماده استفاده شده در ساختمان پتانسیومتر تولید شود. چندین مکانیزم با هم ترکیب می‌شوند، هر چند تمام آنها یا بستگی به حرارت و یا بستگی به جریان دارند. برای مینیمم نمودن نویز تولید شده، می‌بایست ولتاژ منبع را تا حد امکان کاهش داد. نویز همچنین به علت پرش ذغال نیز تولید می‌شود. پتانسیومترهای پیوسته را می‌توان سریع‌تر چرخانید و نویز کمتری از پتانسیومترهای سیمی تولید می‌کنند. پتانسیومترهای سیم‌پیچی‌شده، از خود خاصیت سلف سری و ظرفیت خازنی بین سیم‌پیچ ها نشان می دهند. در فرکانس ۶۰HZ این راکتانس ممکن است چندین مگااهم باشد. اما اگر پتانسیومتر را با موج سینوسی در فرکانس ۱۰KHZ تغذیه کنید، این راکتانس به چندین کیلواهم کاهش می‌یابد. اگر از تحریک ac استفاده می‌کنید، هر دو کمیت فرکانس و مقاومت پایه را در کمترین مقدار عملی اش نگه دارید.

جابجایی الکتریکی بیش از حد Electrical overtravel در حقیقت به این واقعیت اشاره دارد که ممکن است ترمینالها دقیقا در دو طرف بدنه قرار نداشته باشند. این بدین معنی است که وقتی ذغال به ترمینال رسید، ممکن است شافت باز هم چرخانده شود،اما ولتاژ خروجی تغییری نخواهد کرد.

چندین طریق برای اتصال پتانسیومترها در مدارهای کنترلی موجود است. ساده‌ترین روش ولتاژ تغذیه ترتیبی است که زمین مشترکی بین ورودی و خروجی موجود باشد. این موضوع در شکل زیر (a) نشان داده شده است. در این حالت در صورت پائین آورده شدن کامل ذغال، ولتاژ خروجی صفر نیز قابل دسترسی خواهد بود. همچنین امکان دست یافتن به ولتاژ منبع در صورت قرار گرفتن ذغال در انتهای بالائی نیز وجود دارد. ترکیب شکل (b) برای مواقعی مفید است که ذغال به دو انتهای پتانسیومتر برده نشود. تنظیم صفر، اجازه می‌دهد تا ولتاژ صفر در هر موقعیتی از پتانسیومترها قابل دسترسی باشد. به همین ترتیب، تنظیم ولتاژ رنج کامل، امکان تنظیم ولتاژ خروجی را در هر سطح دلخواهی، وقتی که ذغال در بالاترین مقدار خودش است می‌دهد. در این حالت خاص، تکرار تنظیمات برای تنظیم دقیق تر مورد نیاز است زیرا این تنظیم‌ها بهم وابسته هستند.



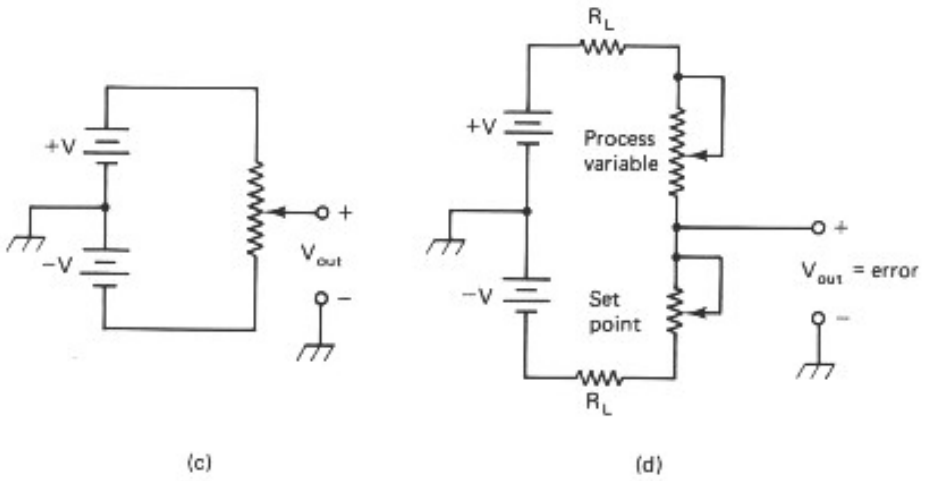
شکل - اتصالات پتانسیومتر (a) ساده (b) قابل تصحیح

تغذیه هر دو سر پتانسیومتر مانند شکل (c)، مقدار صفر ولتاژ را در وسط پتانیومتر تولید می کند. تصحیح این مدار تولید سیگنال خطا نسبت به زمین می نماید که در کنترلر ها قابل استفاده است. مدار (d) را

ملاحظه کنید. مقدار مطلوب ، پتانسیومتری است که بر روی پانل کنترل قرار داده می‌شود. متغیر پروسه پارامتر است که اندازه گیری شده. مقدار خطا بصورت زیر تعریف می‌شود:

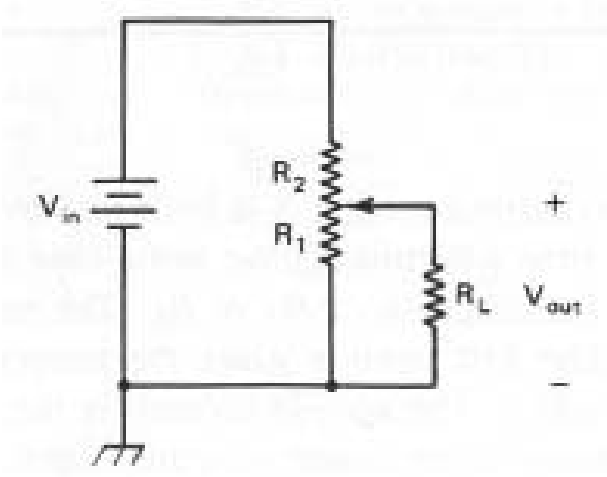
خطا = مقدار مطلوب − متغیر پروسه

چنانچه مقدار مطلوب (SP) و متغیر پروسه (PV) در موقعیت مشابهی باشند هیچ ولتاژ خطائی درخروجی ظاهر نشده و ولتاژ خروجی صفر می‌شود. اگر ذغال پتانسیومتر مقدار مطلوب، بطرف بالا حرکت داده شود، مقاومتش افزایش یافته و این امر باعث مثبت شدن V_{out} خواهد شد. پروسه یافرآیند بایستی پاسخ داده و ذغال پتانسیومتر متغیر پروسه را به مقدار متناسبی بالا ببرد که در این حالت V_{out} مجدداً صفر خواهد شد. حالت عکس آن وقتی اتفاق می‌افتد که مقدار مطلوب کم شود. مقاومت‌های R_L برای این اضافه شده‌اند که مقدار جریان را وقتی هر دو مقاومت صفر می‌شوند، محدود نماید.



شکل - اتصالات پتانسیومتر (c) دو انتهایی (d) خروجی خطا

در آنچه تا بحال گفته شد، فرض بر حالت بی باری بود. اما در عمل ترانسدیوسر پتانسیومتر موقعیت، در هر زمانی باید باری را تغذیه نماید. این بار می‌تواند یک حالت غیر خطی چندین برابر بدتر از خاصیت غیر خطی خود ترانسدیوسر ایجاد کند. شکل زیر را در نظر بگیرید.



شکل - بارگذاری پتانسیومتر

با فرض حالت بی‌باری خروجی مطلوب مساوی‌است با

$$V_{desired} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{in}$$

اما در حالتی که R_L با R_1 موازی باشد، باید اثر آن نیز در نظر گرفته شود:

$$V_{actual} = \frac{[R_1 R_L /(R_1 + R_L)]V_{in}}{[R_1 R_L /(R_1 + R_L)] + R_2}$$

و پس از ساده‌سازی ریاضی

$$V_{actual} = \frac{R_1 R_L}{R_1 R_L + R_1 R_2 + R_2 R_L} V_{in}$$

مثال – مطلوبست بدست آوردن منحنی مشخصه خروجی و محاسبه قابلیت خطی بودن یک پتانسیومتر ۱ کیلواهمی که یک بار ۵ کیلو اهمی را از طریق یک منبع ۱۰ ولتی تغذیه می‌نماید.

حل_ مقادیر مطلوب و واقعی را می‌توان با استفاده از معادله‌های فوق برای گام‌های ۵۰ اهمی ذغال (R_1) محاسبه کرد. حتی برای باری ۵ برابر مقاومت پتانسیومتر، خطایی بیش از ۲/۵٪ بوسیله بار تولید می‌شود.(شکل زِیر)

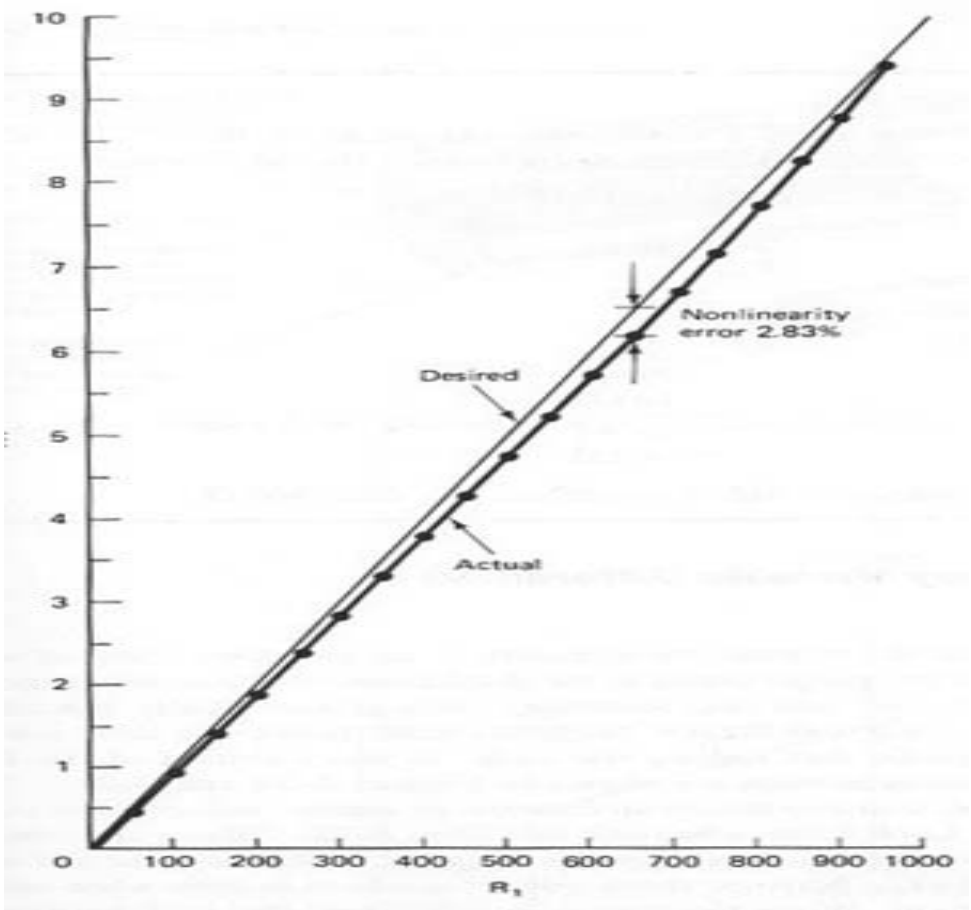
رابطه فوق را می‌توان توسط کامپیوتر پی‌در پی برای مقادیر متفاوتی از R_1 و R_2 حل کرده و در هر مرحله بدترین حالت غیر خطی بودن را محاسبه نمود. این راه را برای مقادیر مختلف R_L نیز می توان حل کرد. نتیجه این تکرارها در جدول فوق نشان داده شده است. ردیف اول خاصیت غیر خطی بودن نهائی در اثر بارگذاری را بصورت درصدی از مقدار کل می‌دهد. ردیف دوم نسبت مقاومت بار به مقاومت کل پتانسیومتر را که برای رسیدن به این حد غیر خطی بودن لازم است، نشان می‌دهد.

جدول - اثرات بارگذاری بر غیر خطی بودن پتانسیومتر

$\frac{R_L}{R_P}$	خطا (٪)
۱,۲۶۳	۱۰
۲,۷۴۲	۵
۱۴,۵۹	۱
۲۹,۴۱	۰,۵
۱۴۷,۹	۰,۱
۲۹۶,۱	۰,۰۵

جدول - رفتار غیر خطی یک پتانسیومتر ناشی از بار گذاری مثال فوق

R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	$V_{desired}$ (V)	V_{actual} (V)	درصد انحراف از رنج کامل
0	0	0.0	0	0
50	950	0.5	0.4953	0.05
10	900	1.0	0.9823	0.18
150	850	1.5	1.4627	0.37
200	800	2.0	1.9380	0.62
250	750	2.5	2.4096	0.90
300	700	3.0	2.8791	1.21
350	650	3.5	3.3477	1.52
400	600	4.0	3.8168	1.83
450	550	4.5	4.2878	2.12
500	500	5.0	4.7619	2.38
550	450	5.5	5.2406	2.59
600	400	6.0	4.7252	2.75
650	350	6.5	6.2171	2.83
700	300	7.0	6.7179	2.82
750	250	7.5	7.2289	2.71
800	200	8.0	7.7519	2.48
850	150	8.5	8.2886	2.11
900	100	9.0	8.8409	1.59
950	50	9.5	9.4106	0.89
1000	0	10.0	10.0000	0



شکل - غیرخطی بودن یک پتانسیومتر بوسیله بارگذاری ، مثال فوق

مثال – موقعیتی، بایستی بوسیله یک پتانسیومتر با خاصیت غیر خطی کمتر از ۰٫۵٪ وقتیکه یک بار ۱۰ کیلواهمی تعدیه می شود اندازه‌گیری شود. مطلوبست محاسبه اندازه پتانسیومتری که بایستی مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از جدول فوق برای غیر خطی بودن ۰٫۵٪ باید:

$$\frac{R_L}{R_P} = 29.41$$

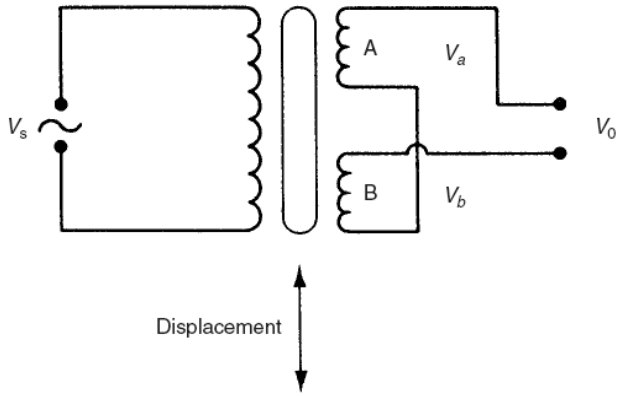
باشد. بنابراین:

$$R_P = \frac{R_L}{29.41} = \frac{10K\Omega}{29.41} = 340\Omega$$

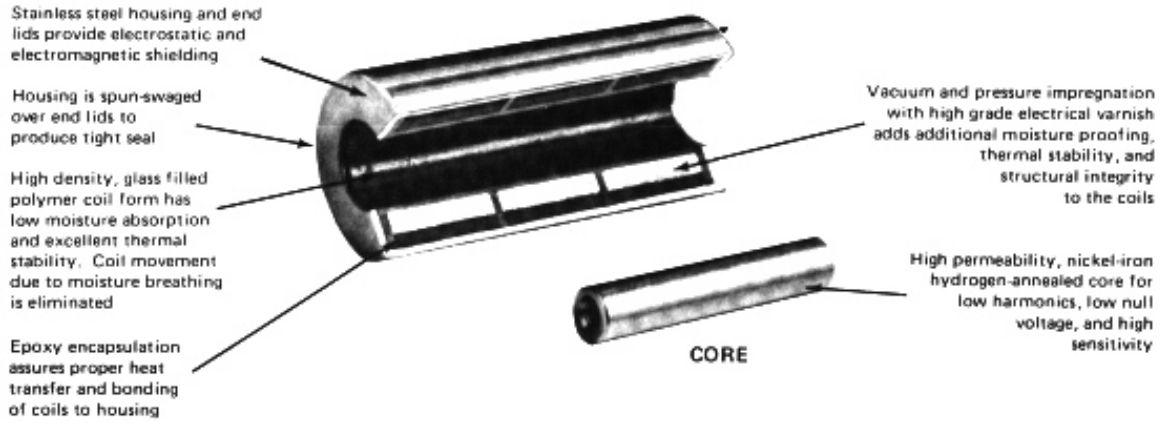
پس باید پتانسیومتری انتخاب کنید که مقاومت آن کمتر از 340Ω باشد.

ترانسفورماتور دیفرانسیلی متغیر خطی و دورانی

Linear and Rotary Variable Differential Transformers

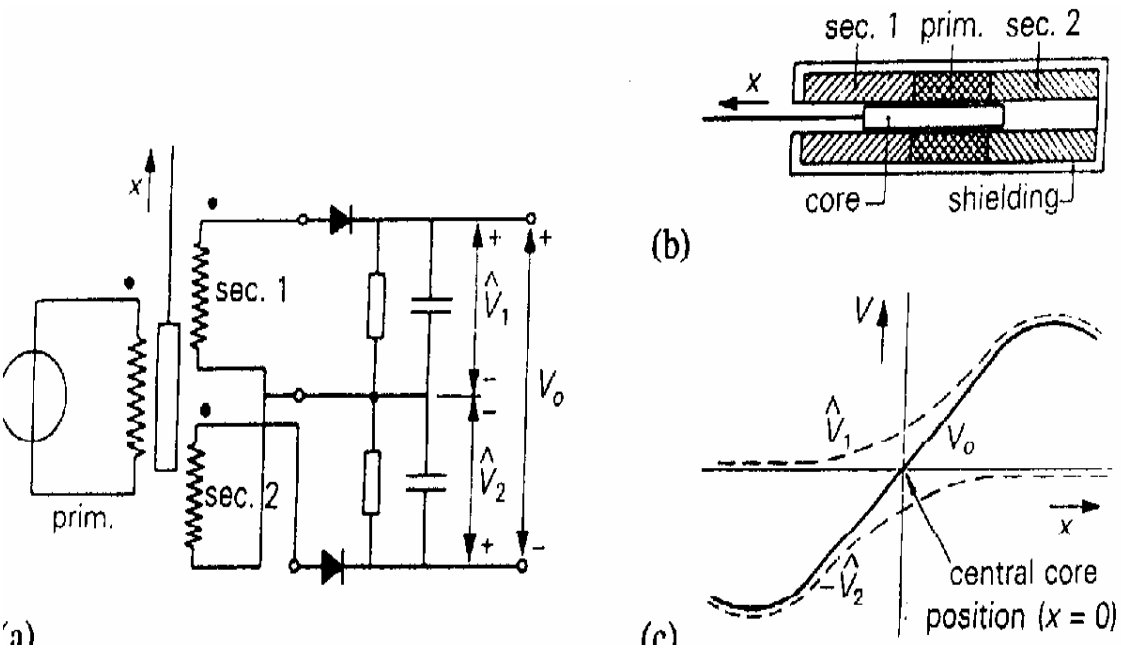


LVDT (ترانسفورماتور دیفرانسیلی متغیر خطی) وسیله الکترومکانیکی است که خروجی الکتریکی متناسب با جابجائی یک هسته مجزای متحرک بدست می‌دهد. این وسیله شامل یک سیم‌پیچ اولیه و دو سیم‌پیچ ثانویه است که بصورت متقارنی به فرم استوانه قرار گرفته‌اند. یک هسته متحرک مغناطیسی میله مانند در داخل این هسته تولید مسیری برای لینک شدن شار مغناطیسی به سیم‌پیچ‌ها می شود. سطح مقطع یک LVDT و ترسیمی از مشخصه خروجی آن در شکلهای ۲۰زیر نشان داده شده‌اند.

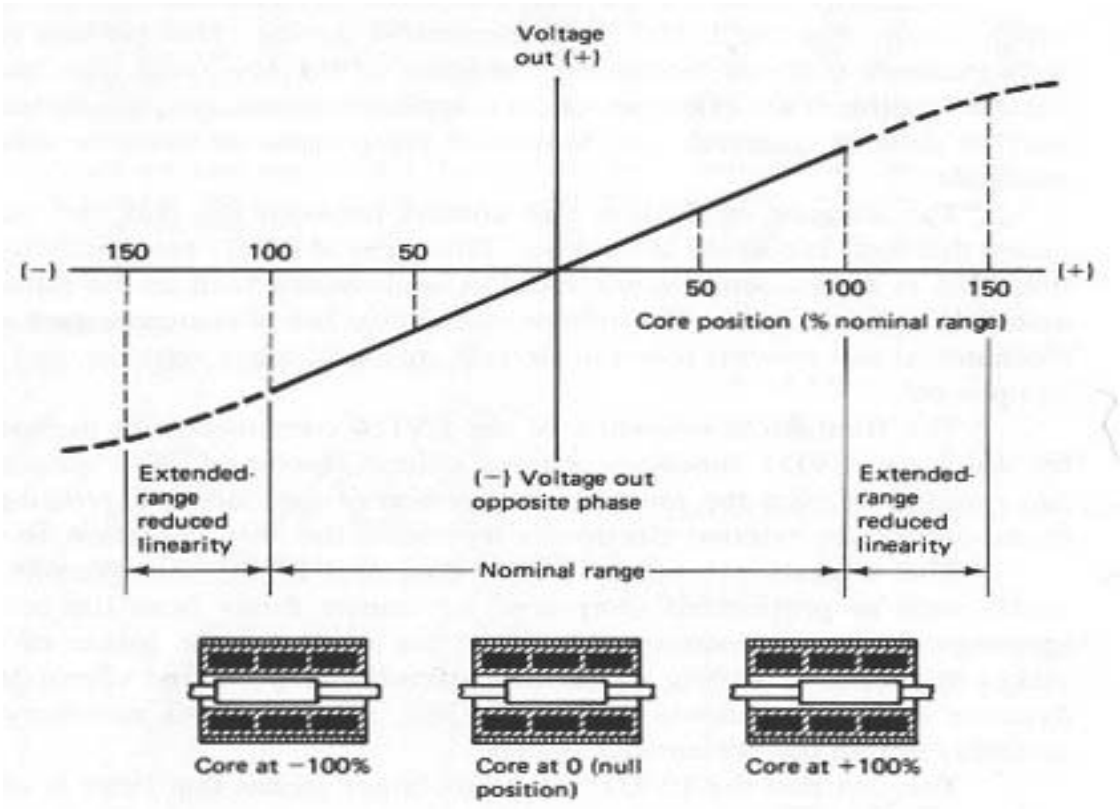


شکل – نمای برش خورده LVDT

چنانچه سیم‌پیچ اولیه بوسیله یک منبع ac خارجی تحریک شود، ولتاژی در دو سیم پیچ ثانویه القاء خواهد شد. به شکل زیر توجه کنید.



این دو با پلاریته مخالف بهم متصل شده‌اند. بنابراین ولتاژ خالص خروجی ترانسدیوسر تفاضل این دو ولتاژ می‌باشد که وقتی هسته در مرکز یا موقعیت صفر قرار گرفته باشد صفر است. وقتی هسته از حالت صفر جابجا شود ولتاژ القاء شده در سیم پیچ که هسته بطرف آن حرکت می‌کند، افزایش می‌یابد، در صورتیکه ولتاژ القاء شده در کویل دیگر کاهش می‌یابد.



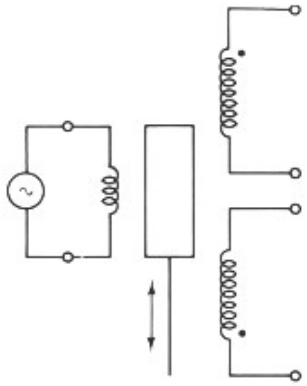
شکل – ترسیم دامنه و جهت ولتاژ خروجی LVDT به صورت تابعی ازموقعیت هسته مرکزی

این عمل باعث تولید ولتاژ خروجی تفاضلی می‌شود که بصورت خطی با موقعیت هسته تغییر می‌کند. فاز این ولتاژ خروجی وقتی هسته از یک طرف ناحیه صفر به طرف دیگر حرکت کند، ناگهان باندازه 180^{o} تغییر می‌یابد.

مشخصات معمولی یک ترانسدیوسر LVDT معمولی در شکل زیر ارائه شده است. توجه کنید که محدوده کامل جابجائی از ۰,۰۵۰ تا ۱۰,۰۰اینچ می‌باشد. قابلیت خطی بودن رنج کامل ۰,۲۵٪ به آن امکان می دهد تا مقادیری تا حدود ۰,۰۰۰۱۲۵ اینچ را اندازه‌گیری نماید. هر چند، پاسخ دینامیکی (که به دقت مشخص نشده) بایست بسیار آهسته‌تر از 2.5 kHz سیگنال تحریک باشد.

LVDT دارای مزایای فراوانی است که آنرا برای کاربردهای وسیعی قابل استفاده می‌سازد. بعضی از این مزایا فقط اختصاص به LVDT داشته و در ترانسدیوسرهای دیگر وجود ندارد . این مزایا با این دلیل است که LVDT یک ترانسفورماتور الکتریکی با یک هسته مجزا و بدون اتصال است.

در حالت عادی، هیچ اتصال فیزیکی مابین هسته متحرک و ساختمان کویلها وجود ندارد. بنابراین LVDT یک وسیله بدون اصطکاک است. این امر، اجازه می‌دهد تا LVDT برای مصارفی که در آن می توان یک هسته سبک را اضافه نمود ولی نباید اصطکاکی در کار باشد، مورد استفاده قرار گیرد. دو مثال از یک چنین کاربردهائی عبارتند از آزمایش انحراف دینامیکی و لرزش مواد ارزشمند و آزمایش کشش مواد خیلی انعطاف پذیر.



شکل - شکل شماتیک LVDT

اصطکاک و اتصال بین سیم پیچ و هسته در LVDT بدین بنابراین LVDT اصولاً یک وسیله با عمر مکانیکی بی‌نهایت است (چیزی که خورده وخراب شود وجود ندارد). این مشخصه در کاربردهائی که آزمایش عمر یا پیری قطعات یا سازه‌ها را انجام می‌دهند، یک احتیاج است. عمر بی‌نهایت مکانیکی همچنین برای مکانیزم‌های مطمئن و سیستم‌های مورد استفاده در هواپیما، موشک‌ها، فضاپیماها و تجهیزات صنعتی مهم کاربرد دارد.

خاصیت کار بدون اصطکاک LVDT و ترکیب آن با اصول القاء است که قابلیت تفکیک پذیری LVDT را حقیقتا بی‌نهایت می سازد. این بدین معنی است کهLVDT می‌تواند به هر حرکت ناچیز هسته نیز عکس‌العمل نشان داده و تولید خروجی نماید. و تنها قابلیت نمایش وسایل الکترونیکی خارجی است که بر قدرت تشخیص و تفکیک پذیری محدودیت می‌گذارد.

مجزا بودن هسته LVDT از سیم‌پیچ‌های آن این امکان را فراهم می آورد تا ایزولاسیون بوسیله مواد عایق غیر مغناطیسی که سیم‌پیچ‌ها را عایق می‌کنند، برای محیط‌های تحت فشار، با مواد خورنده یا مایعات اسیدی بوجود بیاید. این موضوع همچنین باعث می‌شود که دیگر نیازی به شیلد کردن قسمت متحرک نبوده باشد. و فقط یک لایه محافظ استاتیکی برای مجزا کردن تجهیزات در سیستم‌های تحت فشار لازم باشد.

HR SERIES—GENERAL APPLICATIONS

- OPTIMUM PERFORMANCE FOR THE MAJORITY OF APPLICATIONS
- LARGE CORE-TO-BORE CLEARANCE – 1/16 INCH (1.6 mm) RADIAL

The HR high reliability series of LVDT's is suitable for most general applications. The HR series features large core-to-bore clearance, high output voltage over a broad range of excitation frequencies, and a magnetic stainless steel case for electromagnetic and electrostatic shielding.

GENERAL SPECIFICATIONS

Input Voltage . . . . . 3 V rms (nominal)
Frequency Range . . . 50 Hz to 10 kHz
Temperature Range . . -65°F to +300°F (-55°C to +150°C)
Null Voltage . . . . . Less than 0.5% full scale output
Shock Survival . . . . . 1000 *g* for 11 milliseconds
Vibration Tolerance . 20 *g* up to 2 kHz
Coil Form Material . . High density, glass- filled polymer
Housing Material . . . AISI 400 series stainless steel
Lead Wires . . . . . 28 AWG, stranded copper, Teflon-insulated, 12 inches (300 mm) long (nominal)

PERFORMANCE SPECIFICATIONS AND DIMENSIONS (2.5 kHz)

LVDT MODEL NUMBER	NOMINAL LINEAR RANGE	LINEARITY ±PERCENT FULL RANGE				SENSITIVITY mV Out/ Volt In Per	IMPEDANCE Ohms		PHASE SHIFT	WEIGHT Grams		DIMENSIONS A (Body)	DIMENSIONS B (Core)
	Inches	50	100	125	150	.001 In.	Pri.	Sec.	Degrees	Body	Core	Inches	Inches
050 HR	±0.050	0.10	0.25	0.25	0.50	6.3	430	4000	-1	32	4	1.13	0.80
100 HR	±0.100	0.10	0.25	0.25	0.50	4.5	1070	5000	-5	48	6	1.81	1.30
200 HR	±0.200	0.10	0.25	0.25	0.50	2.5	1150	4000	-4	60	8	2.50	1.65
300 HR	±0.300	0.10	0.25	0.35	0.50	1.4	1100	2700	-11	77	10	3.22	1.95
400 HR	±0.400	0.15	0.25	0.35	0.60	0.90	1700	3000	-18	90	15	4.36	2.95
500 HR	±0.500	0.15	0.25	0.35	0.75	0.73	460	375	-1	109	18	5.50	3.45
1000 HR	±1.000	0.25	0.25	1.00	1.30*	0.39	460	320	-3	126	21	6.63	4.00
2000 HR	±2.000	0.25	0.25	0.50*	1.00*	0.24	330	330	+5	168	27	10.00	5.30
3000 HR	±3.000	0.15	0.25	0.50*	1.00*	0.27	115	375	+11	225	28	12.81	5.60
4000 HR	±4.000	0.15	0.25	0.50*	1.00*	0.22	275	550	+1	295	36	15.64	7.00
5000 HR	±5.000	0.15	0.25	1.00*	—	0.15	310	400	+3	340	36	17.88	7.00
10000 HR	±10.00	0.15	0.25	1.00*	—	0.08	550	750	-5	580	43	30.84	8.50

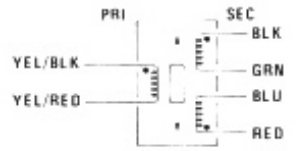
*Requires reduced core length

ORDERING INFORMATION

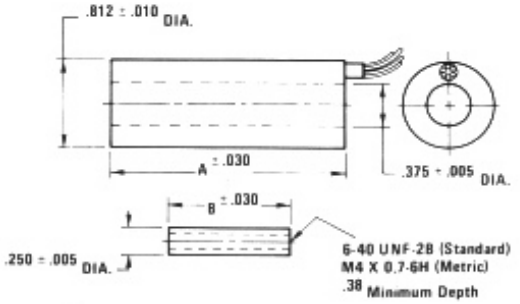
(Fold out page 32 for instructions on how to use this chart.)

OPTION NO.	002	003	006	010	020	120	200
MODEL NO.	5.0 kHz FREQUENCY	10.0 kHz FREQUENCY	METRIC THREAD CORE (NOTE 1)	TEFLON BORELINER	SMALL DIAMETER CORE (NOTE 2)	10 FOOT (3m) LEADS MILDLY RADIATION RESISTANT (NOTE 3)	0.1% LINEARITY
050 HR	A	A	N	B	B	E	F
100 HR	A	A	N	B	B	E	F
200 HR	A	A	N	B	B	E	F
300 HR	X	X	N	B	B	E	X
400 HR	A	A	N	B	B	E	F
500 HR	A	A	N	B	B	E	F
1000 HR	A	A	N	B	B	E	F
2000 HR	D	D	N	B	X	E	F
3000 HR	X	X	N	B	X	E	X
4000 HR	X	X	N	B	X	E	X
5000 HR	D	D	N	B	X	E	F
10000 HR	D	D	N	B	X	E	F

Note 1: See outline drawing for metric thread size
Note 2: Consult factory for mass, dimensions, and thread size
Note 3: Withstands 10^{12} NVT total integrated flux



CONNECT GRN TO BLU FOR DIFFERENTIAL OUTPUT

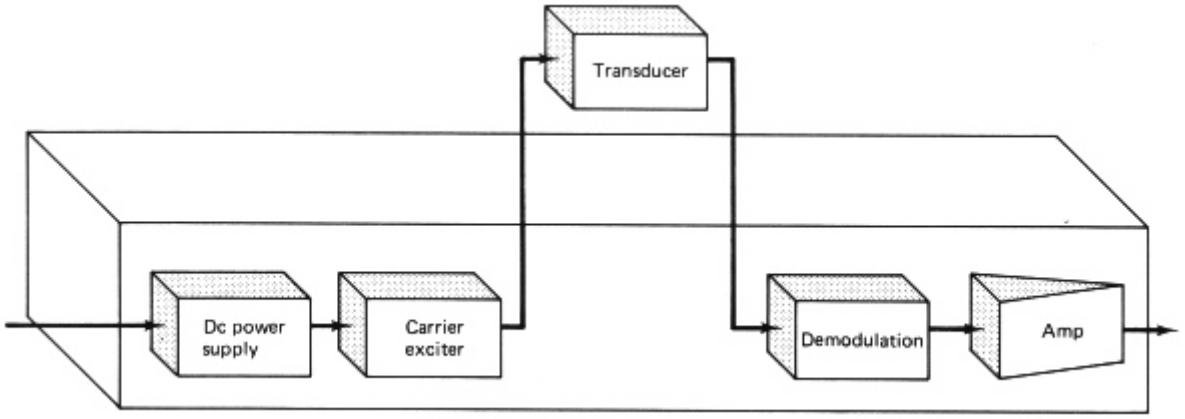


شکل - مشخصات LVDT

این حقیقت که LVDT یک ترانسفورماتور است بدین معنی است که ایزولاسیون کاملی بین ورودی تحریک سیم‌پیچ اولیه و خروجی سیم‌پیچ‌های ثانویه نیز موجود است. این موضوع باعث عدم نیاز به تقویت کننده‌های ایزوله کننده می باشد و نتیجتاً ایزولاسیون زمین سیگنال از زمین تحریک را در وسایل اندازه‌گیری با بازدهی بالا و حلقه‌های کنترلی، میسر می سازد.

وسایل الکترونیکی مورد استفاده با ترانسدیوسرهای از نوع LVDT بایست دارای چندین قابلیت همزمانی داشته باشند تا ترانسدیوسر بدرستی کار کند. بلوک دیاگرام شکل زیر این قابلیت‌ها را که برای اندازه‌گیری با استفاده از انواع LVDT مورد نیاز است، نشان می‌دهد. LVDT نیاز به یک تقویت کننده ولتاژ ac ثابت در فرکانسی دارد که به سادگی در دسترس نیست. این بدین معنی است که یک اسیلاتور با فرکانس مناسب باید به تقویت کننده‌ای متصل شود که دارای تنظیم دامنه خروجی باشد.

خروجی یک LVDT معمولاً دارای دامنه خیلی کم است و مستقیماً قابل بکار اندازی برای کارهای معمولی نیست. از این رو لازمست که خروجی LVDT را تقویت کنیم. بعضی اوقات این عمل در دو طبقه انجام می‌شود، یک تقویت کننده ac قبل از دمدوله کننده و یک تقویت کننده dc پس از آن.

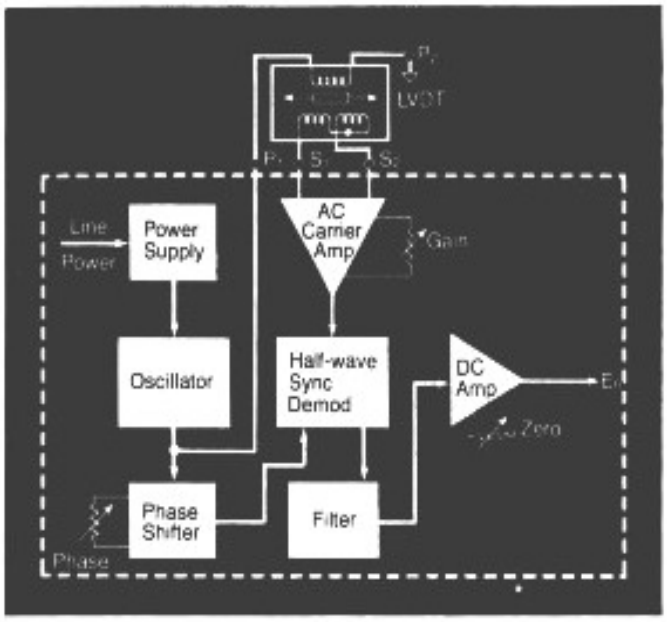


شکل - اجزا ترانسدیوسر LVDT

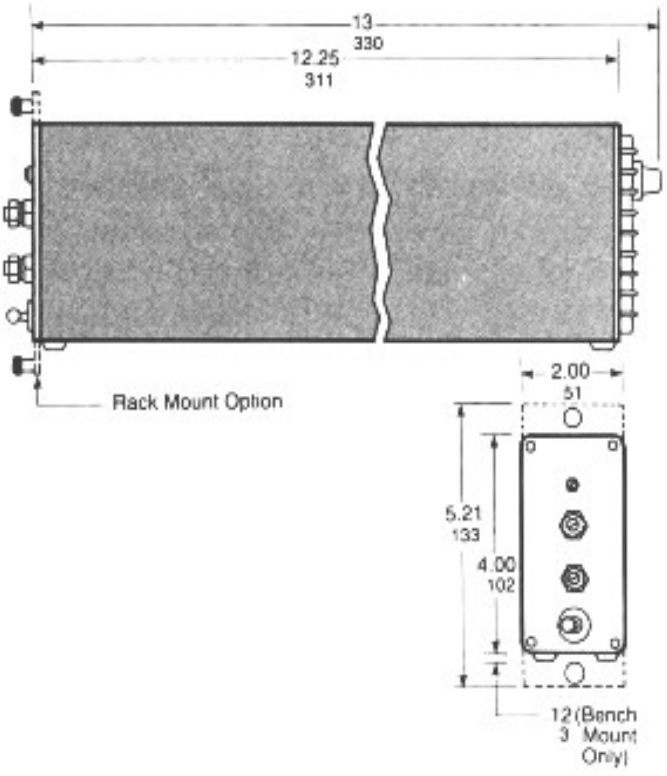
بیشتر نمایش دهنده‌ها، با ولتاژ dc کار می‌کنند. بنابراین خروجی ac تقویت شده، باید به یک dc فیلتر شده تبدیل شود و سپس می‌توان از آن در نمایش‌گرهای معمولی dc استفاده کرد. علاوه بر این برای استفاده از پلارتیه فازی یک LVDT احتیاج به استفاده از یک دمدولاتور سنکرون می باشد. بعد از بیشتر دمدولاتورها یک یا چند طبقه فیلتر پائین گذر وجود دارد. تمام مدارهای الکترونیکی احتیاج به یک منبع تغذیه dc پایدار برای کار صحیح دارند.

خوشبختانه شما نیاز به ساختن این چنین وسیله‌ای ندارید. چند نوع وسیله جانبی مربوط به LVDT موجودند. شکل زیر مثالی از این انواع است. اگر ترجیح می‌دهید که خودتان سیستم خود را بسازید، شرکت سیگنتیکس Signetics یک آی‌سی یا مدار مجتمع NE/SE5520 را تولید کرده ، که دارای یک ژنراتور سینوسی فرکانس متغیر ، تقویت کننده اولیه، تقویت کننده سیگنال ثانویه، دمولاتور سنکرون و تقویت کننده موج dc دمدوله شده است. اصول کار و کاربرد این مدار مجتمع در شکلهای زیر نشان داده شده است.

Block Diagram



Dimensions
(millimeters in blue)



Specifications

Power Requirements
115 V AC ±10%, 50-400 Hz (220 V AC optional)

Line Voltage Regulation
±10% fluctuation produces less than ±0.1% of full scale change in output

Transducer Excitation
3.5 V rms sine wave nominal, 25 mA maximum (internally adjustable from 2 to 5 V rms)

Excitation Frequency
CAS-025 — 2.5 kHz
CAS-100 — 10 kHz

Input Impedance
100 kilohms

Sensitivity
425 mV rms input produces full scale output at maximum gain (may be increased or decreased 6× internally)

Full Scale Output
±10 V DC, 20 mA maximum

Non-linearity and Hysteresis
±0.05% of full scale output maximum

Output Impedance
Less than 2 ohms

Output Noise and Ripple
15 mV rms maximum

Frequency Response (-3 dB)
CAS-025 — 250 Hz
CAS-100 — 1000 Hz

Stability
±0.05% of full scale output after 30-minute warm-up

Thermal Coefficient of Sensitivity
Less than ±0.02% of full scale output per °F (±0.04% F.S. output per °C)

Zero Suppression
±30% of full scale output (±100% optional)

Phase Shift Range
±60° (internal adjustment provides ±60° additional)

Operating Temperature Range
30°F to 130°F (0°C to 55°C)

Weight
3¾ pounds (1.7 kg)

Please refer to Pages 16 and 17 for optional features and ordering information.

شکل - بسته صنعتی LVDT

Preliminary

DESCRIPTION

The NE/SE5520 is a signal conditioning circuit for use with Linear Variable Differential Transformers (LVDT). The chip includes a low distortion amplitude stable sine wave oscillator with programmable frequency to drive the primary of the LVDT; a synchronous demodulator to convert the LVDT output amplitude and phase to position information; and an output amp to provide gain and filtering.

FEATURES

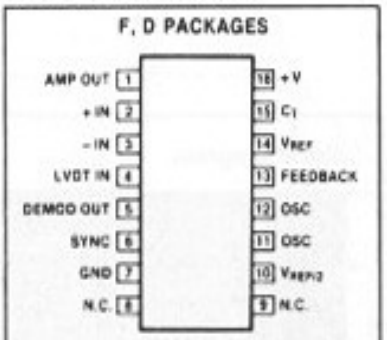
- Oscillator frequency: 1kHz to 20kHz
- Low distortion < 5%
- Capable of ratiometric operation
- Single supply operation 5 to 25V or dual supply ±5 to ±12V
- Low power consumption

APPLICATIONS

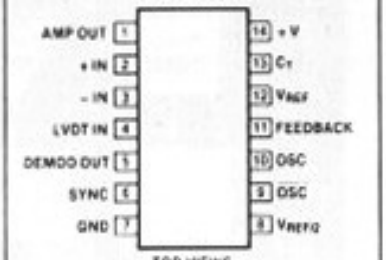
- LVDT signal conditioning
- RVDT signal conditioning

PIN CONFIGURATION

F, D PACKAGES



N PACKAGE



TOP VIEWS

ORDER NUMBERS

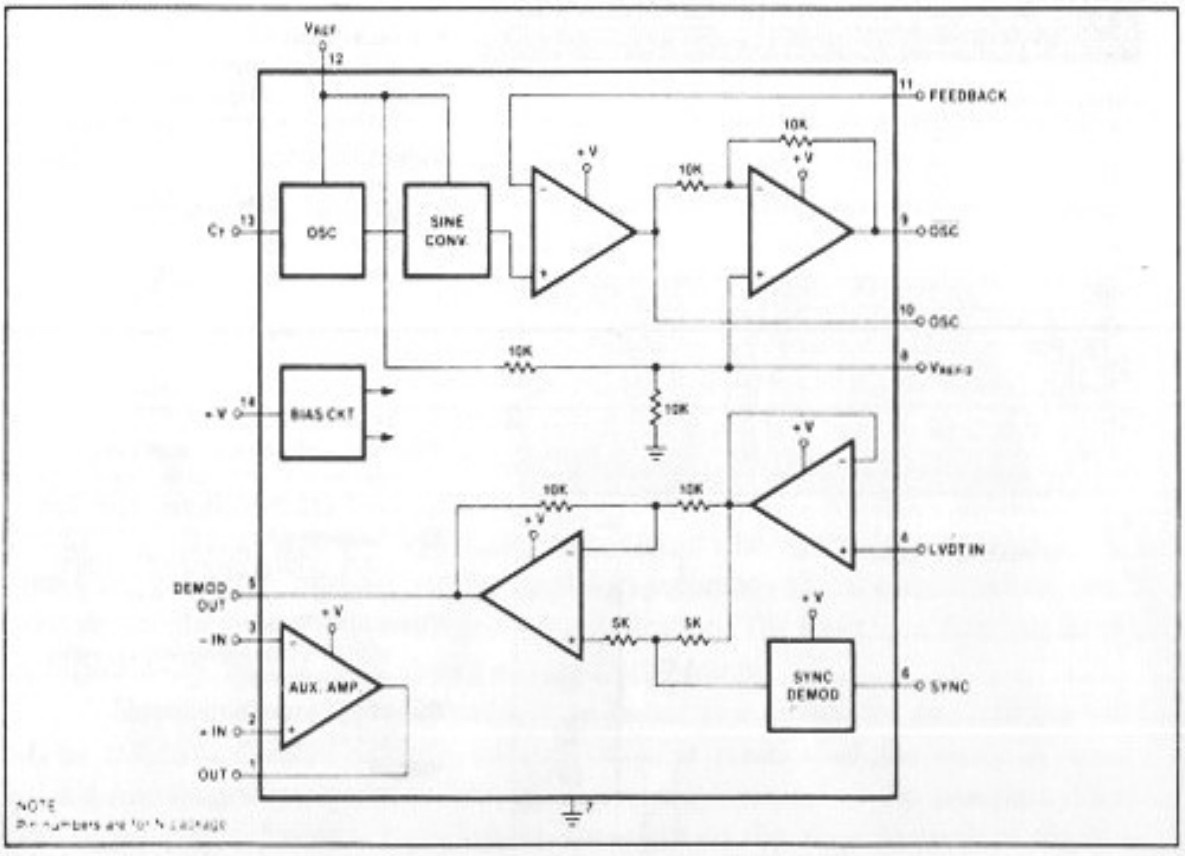
NE5520D, NE5520F, SE5520F (16-Pin)

NE5520N (14-Pin)

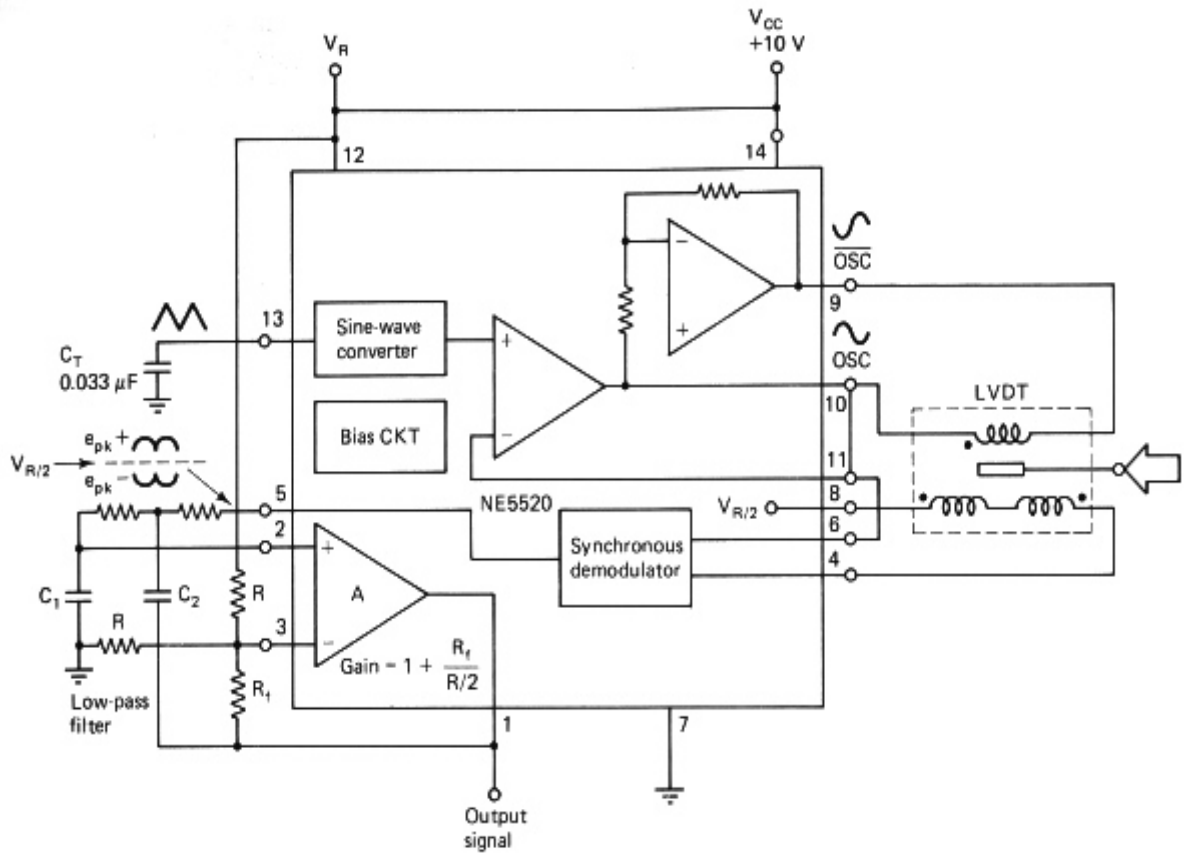
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

PARAMETER	RATING	UNIT
Supply voltage	+ 30	V
Split supply voltage	(± 15)	V
Operating temperature range		
SE5520	- 55 to + 125	°C
NE5520	0 to + 70	°C
Storage temperature range	- 65 to 150	°C

BLOCK DIAGRAM

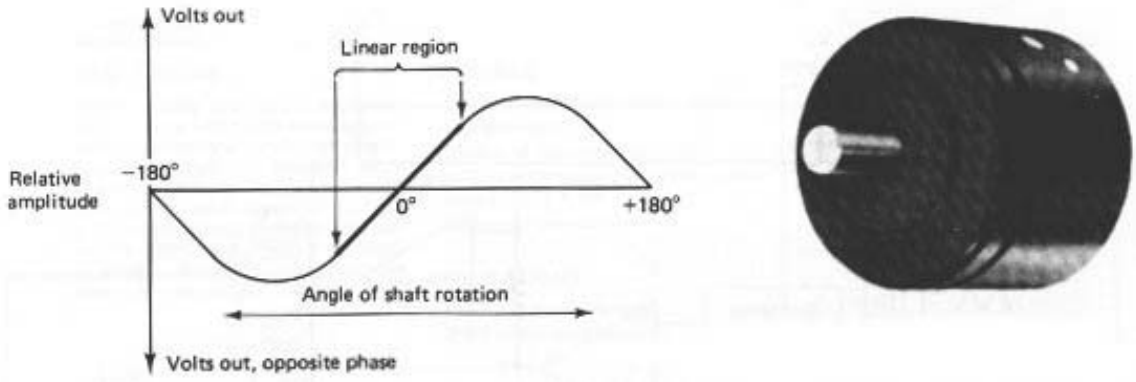


شکل – Signetic NE/SE با یک LVDT



شکل - استفاده از NE 5520 برای یک LVDT

ترانسفورماتور دیفرانسیل متغیر دورانی، وسیله ای است که تولید ولتاژی می‌نماید که دامنه‌اش بطور خطی، با موقعیت زاویه‌ای محور آن متناسب است. یک روتور فرومغناطیسی با شکل مخصوص تقریبا همان کار هسته معمولی را انجام می‌دهد. هیچ حلقه لغزانی که تولید اصطکاک مکانیکی نماید یا نویز الکتریکی القاء کند، موجود نیست، چون کوپل بین سیم‌پیچ‌های ثابت و روتور فقط الکترومغناطیسی است. یک بلبرینگ دقیق محور را حمایت نموده و تنها المان تولید اصطکاک است. اگر چه RVDT قادر به چرخش پیوسته است، اما غالبا در رنج $\pm 40^O$ کار می‌کنند. در این بازه، خطی بودن بهتراز ٪۰,۵ $\pm$ جابجائی یا گردش کامل است. هر چند در جابجائی‌های دورانی کمتر، قابلیت خطی بودن به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. بعنوان مثال، خطی بودن برای یک جابجائی $\pm 5^O$ درجه بهتر از ٪۰,۱ گردش کامل آن است.



شکل - منحنی خروجی RVDT

حد بالای عملی یک RVDT تقریباً $60^{O}\pm$است. قدرت تشخیص و تفکیک پذیری این وسیله ذاتا بی‌نهایت است. برای دوران‌های کوچک قابلیت تشخیص و تفکیک پذیری درصدی کوچک از درجه معمولی است. خروجی RVDT درشکل 28 داده شده است.

در عمل، فقط یکی از دو محدوده خطی در کارخانه کالیبره می شود. مکان صفر که مربوط به این محدوده کالیبراسیون کارخانه می شود،بر روی بدنه و محور به دقت علامت گذاری می گردد. مشابه LVDT، ولتاژ خروجی RVDT، اختلاف فاز 180^{O} را در اطراف زاویه صفر نشان می‌دهد.

RVDT احتیاج به ولتاژ ac برای تحریک سیم‌پیچ اولیه‌اش دارد. ولتاژ ac در ثانویه متناسب با زاویه محور خواهد بود. نوعی از RVDT که با ولتاژ ac تحریک می‌شود، بطور داخلی آنرا به حامل ac برای تحریک سیم‌پیچ اولیه تبدیل می‌نماید. یک دمدولاتور انتگرالی و فیلتر، ولتاژ ثانویه سیم پیچ را به سیگنال خروجی هموار dc تبدیل می‌کنند که نهایتاً تقویت می‌شود. مشخصات عمده در جدول زیر آمده است.

GENERAL SPECIFICATIONS — AC-RVDT'S

Input voltage . . . . . 3 V rms (nominal)
Input frequency . . . . . 400 Hz to 20 kHz
Operating temperature . . . . . -65°F to +300°F (-55°C to +150°C)
Bearings . . . . . ABEC class 7
Temperature coefficient of sensitivity . . . . . .02%/°F (.04%/°C) over range 20°F to 160°F (-5°C to 75°C)

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

RVDT MODEL	LINEARITY PERCENT OF RANGE ±30°	±40°	±60°	SENSITIVITY mV/V/°	IMPEDANCE Pri.	Sec.	PHASE ANGLE Degrees
(@2.5 kHz)							
R30A	0.25	0.5	1.5	2.3	125	500	+35
R36A	0.5	1.0	3.0	1.1	750	2000	+4
(@10 kHz)							
R30A	0.25	0.5	1.5	2.9	370	1300	+3
R36A	0.5	1.0	3.0	1.7	2500	5400	-17

GENERAL SPECIFICATIONS — DC-RVDT'S

Input voltage . . . . . ± 15 V DC, 30 ma
Operating temperature . . . . . 0°F to 160°F (-18°C to +75°C)
Survival temperature . -65°F to 300°F (-55°C to +150°C)
Temperature coefficient . . . . . .04%/°F (.08%/°C)
Bearings . . . . . ABEC class 7

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

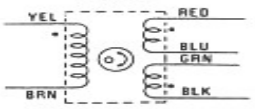
RVDT MODEL	LINEARITY PERCENT OF RANGE ±30°	±40°	±60°	SCALE FACTOR mV/degree	IMPEDANCE Ohms	-3dB RESPONSE Hz
R30D	0.25	0.5	2.0	125	<100	500

MECHANICAL SPECIFICATIONS

RVDT MODEL	MOMENT OF INERTIA Pound-Inch-Second²	MAXIMUM TORQUE Unbalance Inch-Ounces	Friction	MAXIMUM LOAD Radial* Pounds	Axial	WEIGHT Grams	SERVO MOUNT BU-ORD
R30A	0.53×10^{-6}	.004	.015	8	10	36	11
R30D	0.53×10^{-6}	.004	.015	8	10	53	11
R36A	1.62×10^{-6}	.012	.015	25	25	255	15

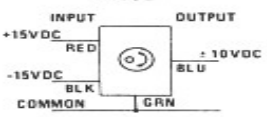
*Shaft end

R30A

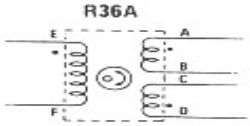


CONNECT GRN TO BLU FOR DIFFERENTIAL OUTPUT

R30D



R36A



CONNECT (B) TO (C) FOR DIFFERENTIAL OUTPU

Source: Schaevitz Engineering.

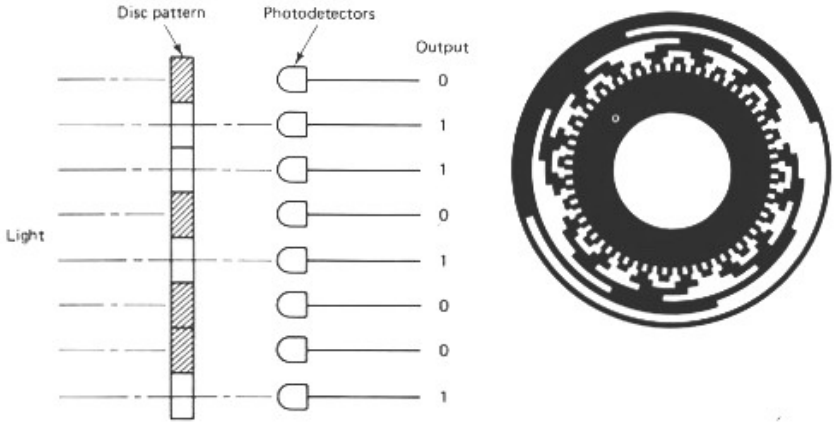
جدول مشخصات RVDT

اینکودرهای نوری

دو نوع جامع اینکودر نوری درحالت کلی وجود دارد: افزایشی Incremental و مطلق Absolute. در اینکودر افزایشی، بازاء چرخش روتور به اندازه مشخصی، یک پالس در خروجی تولید می‌شود. اینکودر مطلق "یک کلمه" در خروجی می فرستد که در آن کد مشخصی برای هر موقعیت از محور وجود دارد.

اینکودر مطلق در شکل زیر شان داده شده است. کد خروجی از طریق مسیرهای مجزائی که بر روی دیسک اینکودر موجودند و آشکار سازهای نوری مربوط به خود، تولید می‌شوند. خروجی این آشکار سازهای نوری متناسب با الگوی کد روی دیسک یا وضعیت مشخص محور high یا low خواهند بود.

اینکودرهای مطلق برای کاربردهائی استفاده می شوند که وسیله برای مدت طولانی ای از زمان، متوقف می نماید و یا با سرعت کمی حرکت می‌کند. بعنوان مثال کنترل سطح، تلسکوپها، جرثقیل‌های بزرگ و غیره.

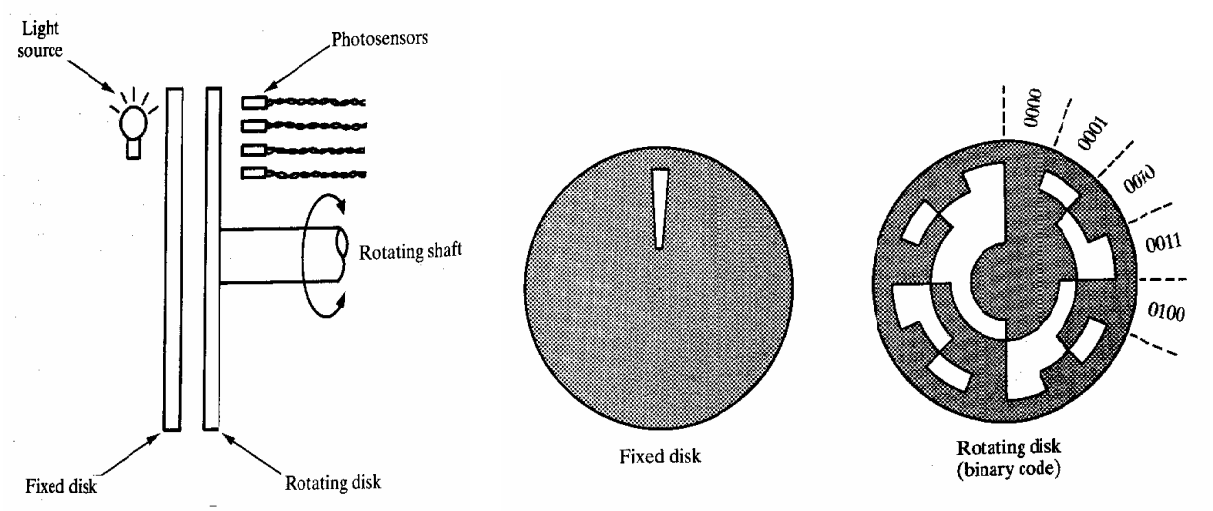


شکل - اینکودر مطلق هشت بیتی

اینکودرهای مطلق قادر به استفاده از چندین هزار کد مختلف هستند، اما معمول‌ترین آنها کد گری Gray code و باینری و یا BCD می‌باشند.

این وسیله دارای چندین محدودهٔ علامت دار هم مرکز؛ مرتبط با موقعیت و زاویه واقعی است . خروجی این دستگاه بر خلاف نوع قبلی بصورت مقادیر عددی باینری (Binary Number) و مرتبط با موقعیت مطلق و واقعی محور آن بوده و دارای کاربردهای وسیعی از جمله اندازه گیری وضعیت چرخش مفاصل در بازوهای روباتهای صنعتی میباشد.

اصول عملکرد این وسیله مشابه نوع قبلی و تفاوت آن در ترتیب قرار گرفتن منافذ دیسک متحرک میباشد. منافذ دیسک متحرک در چهار مسیر (Track) و یا بیشتر تعبیه میگردند و سنسورهای نوری در صورتیکه چهار مسیر در دیسک متحرک تعبیه شده باشد در چهار نقطه در پشت دیسک متحرک قرار میگیرند.
اگر پترن بصورت کدهای باینری باشد. مشابه با پترن سمت چپی نشان داده شده در شکل زیر ؛ و یک شعاع نوری از دیودهای منتشر کننده نوری حاصل و سلول های فتو الکتریک یا فتو دیودها در مقابل دیودهای نوری و در سمت دیگر پترن قرار گرفته باشند؛ موقعیت زاویه ای بصورت یک سری صفر ویک و وابسته به اینکه نور از پترن رد شده یا نه ظاهر میشود.

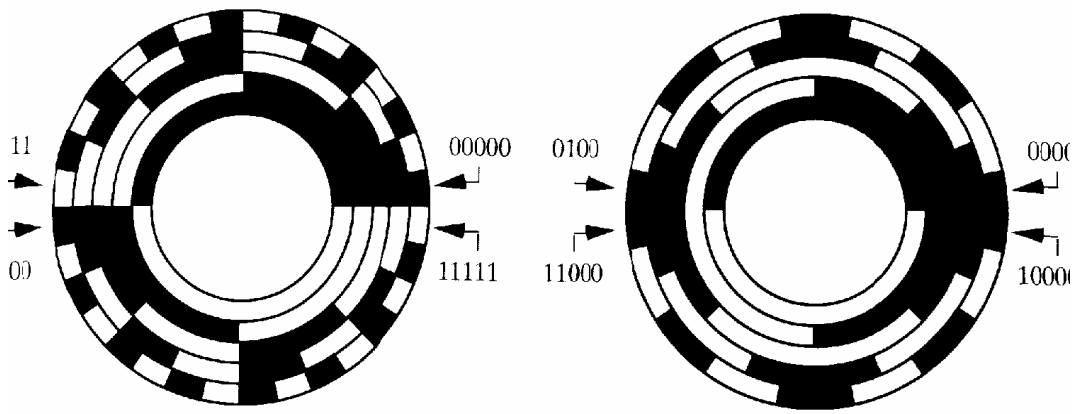


هرچند چندین بیت میتوانند در یک جابجائی تغییر کنند؛ (بطور مثال مابین وضعیت های 01111 و 10000) و چون هیچ راهی برای اطمینان از اینکه تمام بیت ها دقیقاً در یک لحظه سویچ کرده باشندوجود ندارد؛ این امکان هست که در بین حالتها کد غیر صحیحی خوانده شود. اضافه کردن یک بیت زمانی اضافی به پترن ؛ پالسی برای همزمان کردن خواندن اطلاعات بداخل بافر و در زمان پایداری ؛ تمام بیت ها را تولید خواهد کرد.

اینکودرهای مطلق قادر به استفاده از چندین هزار کد مختلف هستند، اما معمول‌ترین آنها کد گری (Gray code) و باینری و یا BCD می‌باشند.

معمول است که برای غلبه بر مسئلهٔ فوق پترن را بصورت کد گری (Gray Code) مرتب کنیم که در این صورت فقط یک بیت در هر زمان عوض میشود. با کد گذاری گری تمام بیت ها صحیح بوده و در هر زمان میتوان آنها را خواند؛ هر چند در این صورت نیاز به مداری برای تبدیل کد گری به باینری داریم ؛ معمولاً این مدار دارای داده های مطمئنی در طول عمل تبدیل نبوده و فقط بعد از کامل شدن عمل تبدیل ؛ بایستی خوانده شود. در هر دو حالت 00000در سمت راست و کد ؛ با حرکت در جهت مخالف عقربه های ساعت اضافه میشود.

در شکلهای زیر مثال اینکودر 5 بیتی داده شده؛ اینکودرهای 10 تا 20 بیتی و یا اینکودرهای با تعداد بیت افزون تر نیز وجود دارند.



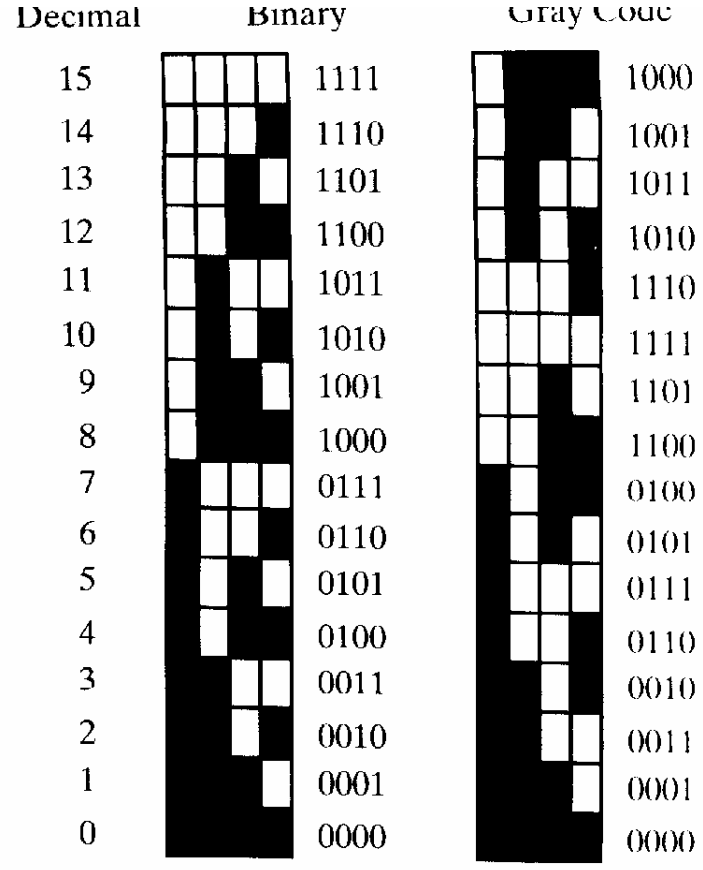
پترن اینکودر های نوری

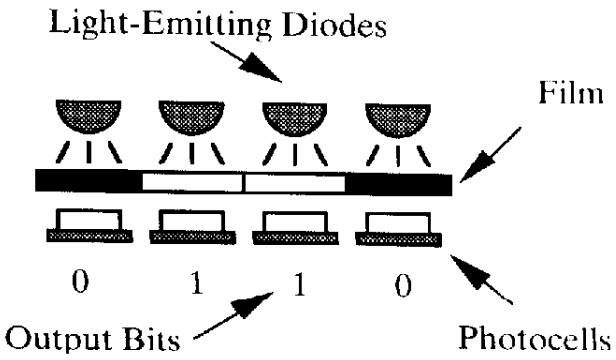
این وسایل خیلی گران تر از پتانسیومترهای توضیح داده شده در قسمت های قبل است.؛ اما ؛ از این گونه وسایل بطور وسیعی در کاربردهای با نیاز به دقت بالا استفاده میشود. بعضی از کاربرد های اینکودرها عبارتند از ماشینهای تراشکاری NC و CNC و تلسکوپهای رادیوئی و نوری .

بر خلاف اینکودر موقعیت واقعی اینکودر موقعیت نسبی در صورت قطع برق موقعیت را از دست داده و دقت آن در صورت اتفاق خطا در هر بیت از دست میرود.

اینکودر دیجیتالی خطی:

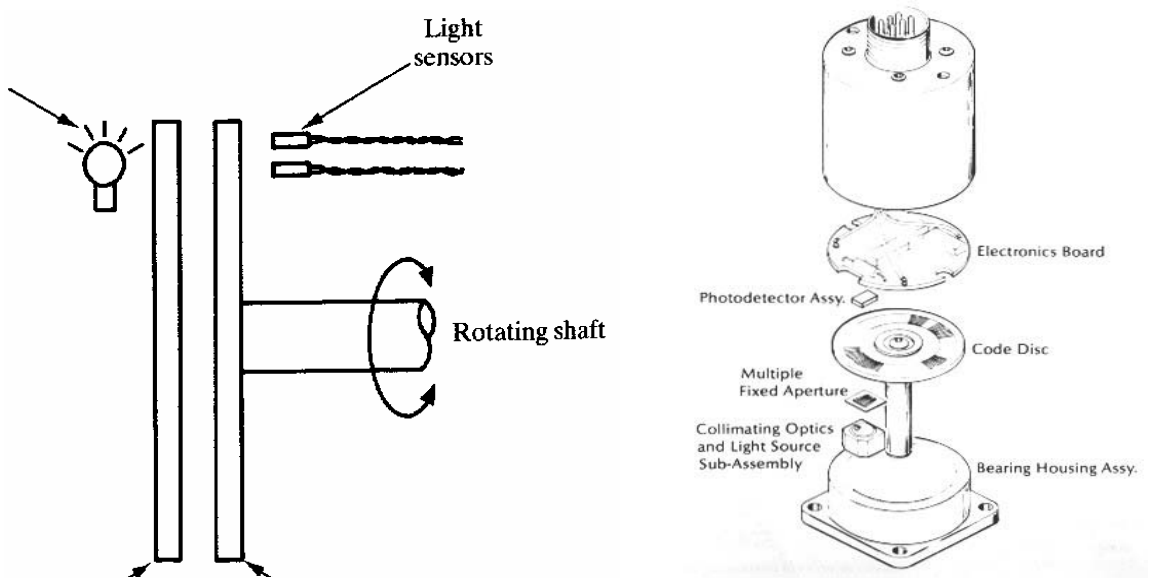
نوع با حرکت خطی اینکودر دیجیتالی درشکلهای زیر نمایش داده شده است؛ که در یک کولیس دیجیتالی دستی دقیق استفاده شده است. دراین مدار مبدل کد گری به BCD ؛و نمایش گر دیجیتال با واحد متریک نیز وجود دارد. محل نصب منتشر کننده ها و سنسورهای نوری در شکلهای زیر نمایش داده شده اند.



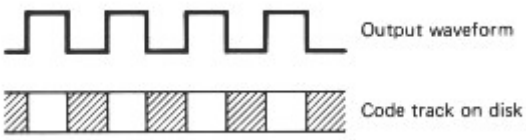


پترن اینکودر های خطی

اینکودر افزایشی، یک سری پالس یکنواخت و پشت سر هم متناسب با چرخش مکانیکی مورد نظر تولید می‌نماید. بطور مثال، اگر بخواهیم چرخش مکانیکی محور را به ۱۰۰۰ قسمت تقسیم کنیم، می‌توان از اینکودری استفاده کردکه ۱۰۰۰ سیکل موج مربعی بازاء هر دور چرخش ایجاد نماید. با استفاده از یک شمارنده برای شمارش این سیکلها، می‌توانیم بفهمیم که محور چقدر چرخیده است. عدد ۱۰۰ معادل 36°، ۱۵۰ معادل 54° و غیره خواهند بود. تنها محدودیت موجود، ظرفیت حافظه شمارنده خواهد بود. تعداد سیکلها در هر دور چرخش نیز، بوسیله فاصله فیزیکی علائم روی دیسک چرخان و کیفیت نور مورد استفاده محدود می‌شود. شکل 3_30 قطعات جدا شده یک اینکودر نوری را نشان می دهد. نوع ساده‌تر اینکودرهای افزایشی، اینکودر دورسنج است. شکل موج و مسیر کدگذاری شده دیسک متحرک درشکل 31 نمایش داده شده اند. این نوع اینکودر بعضی اوقات اینکودر افزایشی تک کدی نامیده می‌شود، زیرا فقط یک خروجی داشته و قادر به تشخیص جهت نیست. خروجی آن معمولاً موج مربعی است.



شکل - اینکودر افزایشی نوری

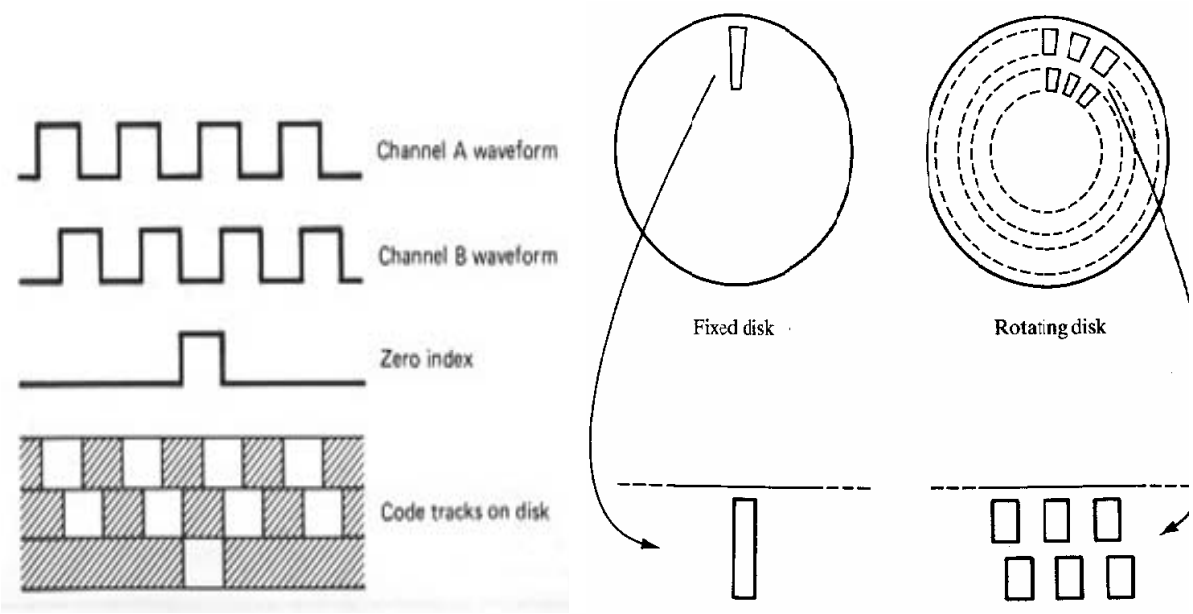


خروجی اینکودر تاکومتر و تک شیار

اطلاعات مربوط به سرعت با اندازه‌گیری زمان بین پالسها و یا شمارش تعداد پالسها در یک زمان معین، میسر است. وقتی زمان بین پالسها اندازه‌گیری می‌شوند، اینکودر باید قادر به تولید دقیق لبه به لبه پالسها باشد. هر گونه عدم دقت باعث می‌شود که سیستم سروُ دائماً خطائی را اندازه‌گیری نماید که نتیجه عدم یکنواختی الگوی دیسک است.

غالب اینکودرهای افزایشی برای اندازه‌گیری موقعیت، از دو کانال خروجی که با هم 90° اختلاف فاز دارند استفاده می‌کنند. شکل موج‌های خروجی و علائم روی دیسک برای یک چنین اینکودری در شکل زیز نشان

داده شده است. این امر ما را قادر می سازد لبه‌ها را بشماریم و وضعیت کانال دوم را در مدت این انتقال، بررسی کنیم. با استفاده از این اطلاعات می توان محاسبه‌کرد که آیا A جلوتر از B است یا خیر و در نتیجه جهت چرخش رابدست آورد.



شکل - خروجی های اینکودر مربعی و شیارهای آن

داشتن اطلاعات مربوط به جهت چرخش به دلیل وجود لرزش ذاتی سیستم‌ها، مهم می باشد. در صورتی که اینکودر تک کانال (دورسنج) بر روی لبه از حرکت بایستد، یک خطا در شمارش روی می دهد. چنانچه لرزش باعث شود که سیستم در طول این لبه به عقب و جلو بچرخد، شمارنده آن را به عنوان یک لبه خواهد شمرد هر چند که سیستم متوقف باشد. با استفاده از خروجی دوم یا کانال دوم، و اندازه‌گیری لبه‌ها و رابطه آنها با وضعیت کانال مخالف، می‌توانیم اطلاعات دقیقی از جهت بدست آوریم.

وقتی سیگنال دوم کد گشایی شود، می‌توان پالسی‌هائی تولید نمود که مدت آنها ثابت و در لبه‌های یک سیکل اتفاق بیافتند. این پالسها رامی‌توان در جهت حرکت عقربه های ساعت و یا خلاف آن به یک شمارنده بالا_پائین شمار و یا پورت ورودی یک کنترل برنامه‌ریزی‌شونده، اعمال نمود. بسیاری از تولید کنندگان شمارنده و کامپیوتر، مداری برای آشکارسازی کانال دوم بصورت قسمتی از الکترونیک‌شان دارند. این مدار Antijitter هم نامیده می شود. به این ترتیب می توان از ۲ کانال عمود بر هم بدون هیچ آماده‌سازی قبلی استفاده نمود.

مدار Antijitter درشکل زیر نشان داده شده است. وضعیت کانال A وقتی B روی می دهد، مشخص می کند که آیا B باعث شمارش بالا و یا شمارش پائین شده است. ورودی Z برای صفر کردن شمارنده درهر سیکل است.

مطالب ارائه شده توسط تولید کننده را قبل از اتصال هر اینکودر نوری دقیقا مطالعه نمایید. باید برای اینکودر یک ولتاژ و زمین مناسب تهیه شود. خروجی‌های اینکودر معمولاً کلکتور باز هستند. صفر منطقی مساوی با اتصال به

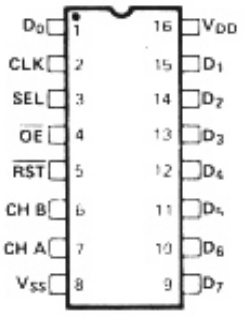
HEWLETT PACKARD

QUADRATURE DECODER/ COUNTER INTERFACE IC

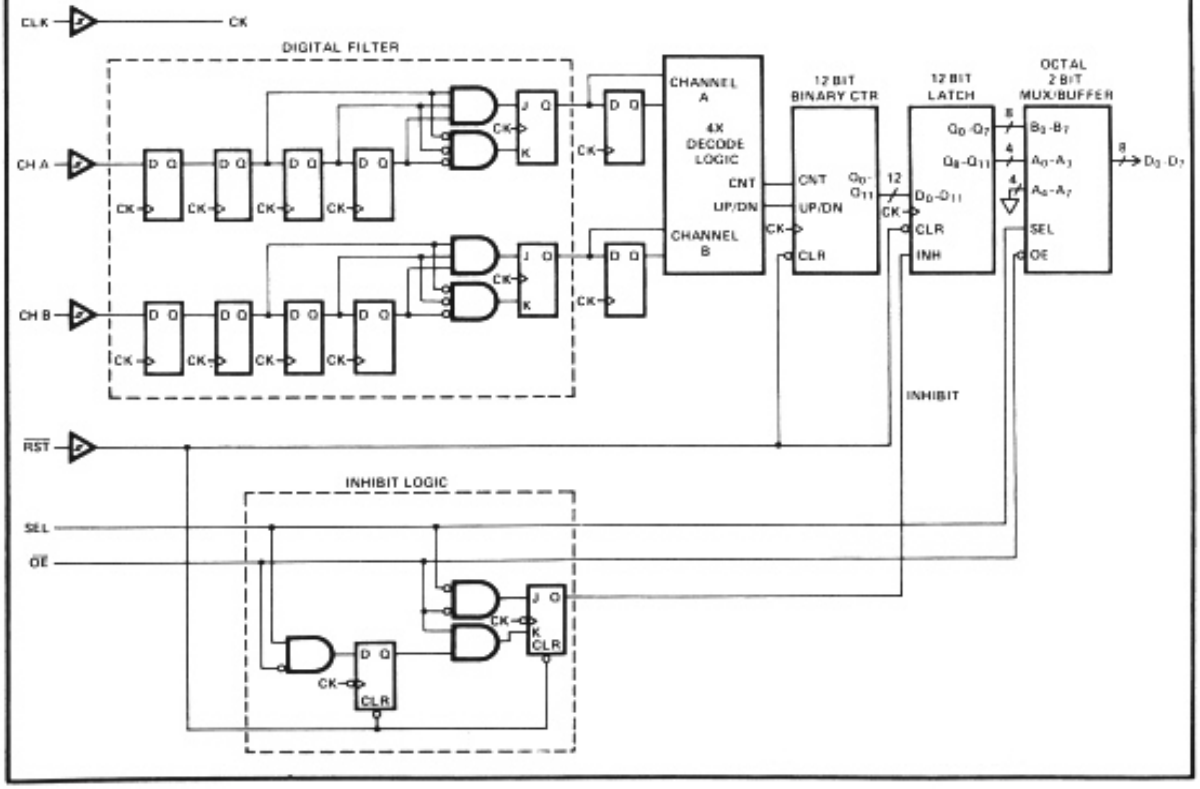
HCTL-2000

Description

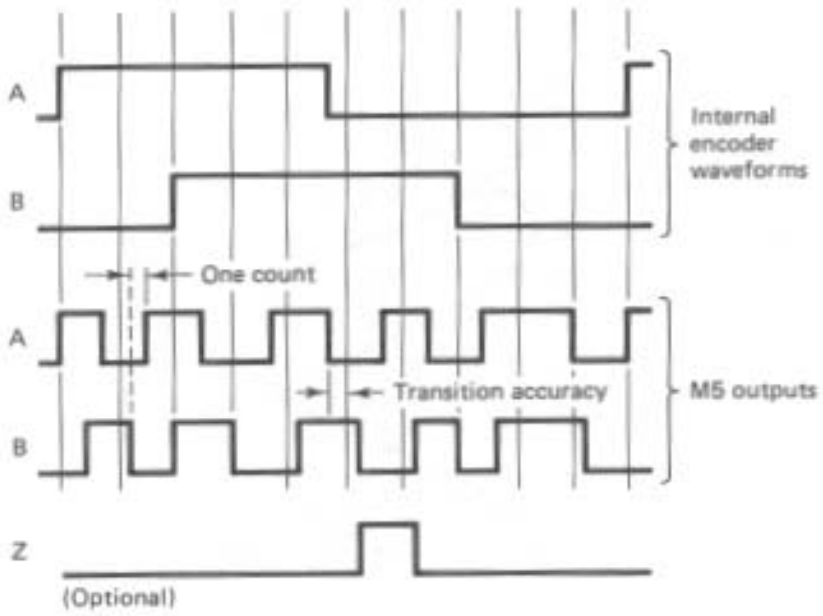
The HCTL-2000 is an HCMOS IC that performs the quadrature decoder, counter, and bus interface function. The HCTL-2000 is designed to improve system performance in digital closed loop motion control systems and digital data input systems. It does this by shifting time intensive quadrature decoder functions to a cost effective hardware solution. The HCTL-2000 consists of a 4x quadrature decoder. 12 bit binary up/down state counter, and 8 bit bus interface. The use of Schmitt triggered CMOS inputs and a 3 bit state delay filter allows reliable operation in noisy environments. The HCTL-2000 provides LSTTL compatible tri-state output buffers. Operation is specified for a temperature range from -40 to +85° C at clock frequencies up to 3.9 mHz.



PINOUT



شکل - مدار Antijitter برای اینکودر مربعی



شکل -

زمین و یک، مساوی با مدار باز است. می‌بایست برای هر خروجی یک مقاومت مناسب بالا کشنده به منبع ولتاژ متصل کنید تاسطح مناسب ولتاژ برای هر شمارنده ای، کامپیوتر یا PC بدست آید.

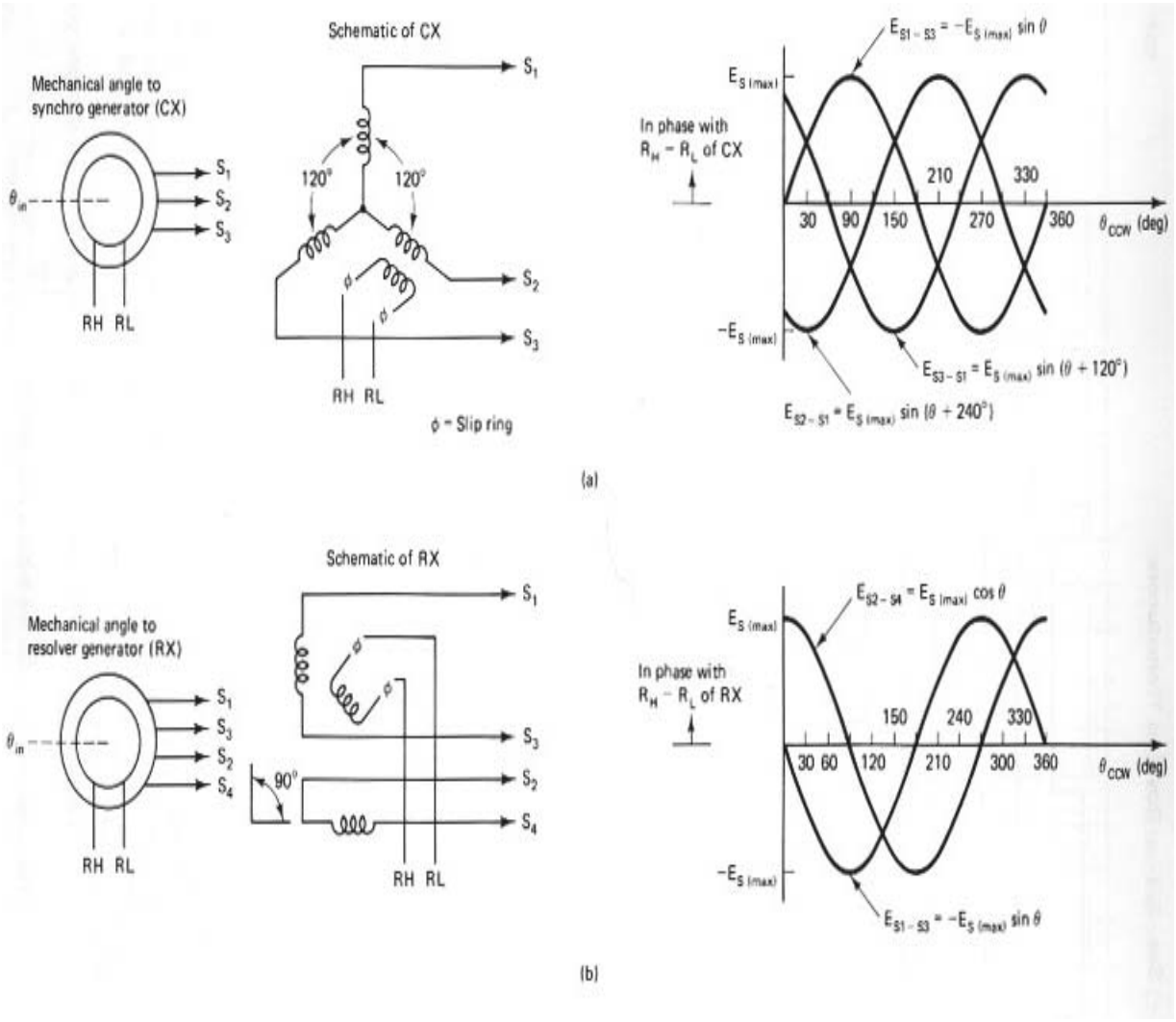
ضرب شمارش‌ها را می توان با مدارهای خارجی و یا بوسیله مدار داخلی ایجاد نمود. با در دسترس بودن کانال دوم قادر هستیم که 1 و یا 2 و یا ۴ برابر قابلیت تشخیص و تفکیک پذیری دیسک کد را ایجاد کنیم. بعنوان مثال با یک اینکودر دو کانالی ۲۵۰۰ سیکلی، ۱۰۰۰۰ پالس در هر دور قابل دسترسی است. با یک دیسک با کیفیت و یک اینکودر فاز، این سیگنال ۴ برابر شده، بهتراز $\frac{1}{2}$ شمارش دقت خواهد داشت. این دقت بیشتر از $0.018°$ است.

این چند برابر سازی در شکل فوق نشان داده شده است. وسایل الکترونیکی کد گشایی نه تنها می‌بایست جهت را حس کنند بلکه باید یک پالس خروجی برای هر لبه ی یک یا هر دو ورودی ایجاد نمایند.

سینکرو و ریزالور

سینکرو یک ترانسدیوسر تعیین موقعیت‌های زاویه‌ای می‌باشد، که شامل یک سیم‌پیچ اولیه بر روی روتور و سه سیم‌پیچ ثانویه است که با زاویه ۱۲۰° نسبت به هم بر روی استاتور قرار گرفته‌اند. دامنه و فاز ولتاژ القاء شده در هر سیم‌پیچ استاتور بستگی به موقعیت و ولتاژ اعمال شده به روتور دارد. بنابراین، برای یک ولتاژ اولیه معلوم، ولتاژهای ثانویه با توجه به موقعیت‌های روتور تعریف می شوند. اولیه معمولا به ولتاژ ac 115) (rms, 60 Hz متصل شده و ولتاژهای ماکزیممی را روی ثانویه معمولاً در حدود ۱۱,۸ و یا ۹۰ ولت تولید می‌کند.

ریزالور نیز مشابه سینکرو است، با این تفاوت که دارای ۲ سیم‌پیچ ثانویه روی استاتور می باشد که با هم $90°$ زاویه دارند. عملکرد فیزیکی و الکتریکی سینکرو و ریزالور در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل – ویژگیهای فیزیکی و الکتریکی سینکرو و ریزالور

سینکرو دارای مزایای متعددی نسبت به سایر ترانسدیوسرهای موقعیت که تا به حال با آنها آشنا شده‌اید، می‌باشد. سینکرو یک اینکودر مطلق موقعیت است. حتی اگر برق مدارهای آشکار ساز زاویه قطع و وصل شود، سینکرو همچنان به نمایش موقعیت محور ادامه می دهد. این موضوع مشابه با اینکودر نوری مطلق است.

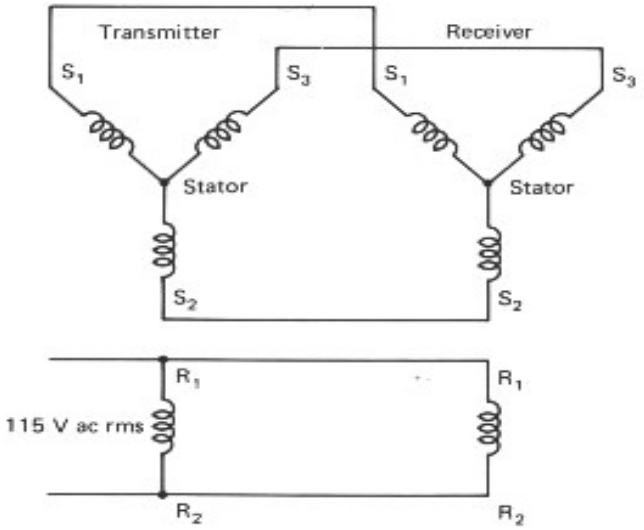
قابلیت تشخیص و یا تفکیک پذیری مبدل سینکرو معمولاً در حدود ۱۲ تا ۱۴ بیت است.

برق و توان ورودی سینکرو و ریزالور ممکن است از طریق ولتاژ 115 V rms, 60 Hz تامین شود. (هر چند ولتاژها و فرکانسهای دیگر هم قابل استفاده هستند).

این موضوع تغذیه تراسدیوسر را آسان، راحت و کم هزینه می‌کند، زیرا دیگر به ولتاژ تحریک جدا احتیاج نیست. خروجی سنکرون و یا ریزالور ولتاژی ac با دامنه بالا است و اطلاعات موقعیت، در نسبت ولتاژ هر کدام از سیم‌پیچ‌های استاتور به ولتاژ مبنای اولیه نهفته است. هر نویز القاء شده به این سیگنال یا تلفات ناشی از سیم‌کشی طویل ، برای سیگنالهای اولیه و ثانویه مشترک بوده و نسبت به سیگنالهای اصلی ناچیز است. چون برای بدست آوردن اطلاعات موقعیت باید ولتاژ استاتور بر ولتاژ روتور تقسیم شود، خطاهای

مشترک حذف خواهند شد. این‌ها همه مزایای مهمی هستند. اما چگونه می توان این سیگنالهای سینوسی را به نمایش یک موقعیت تبدیل نمود؟

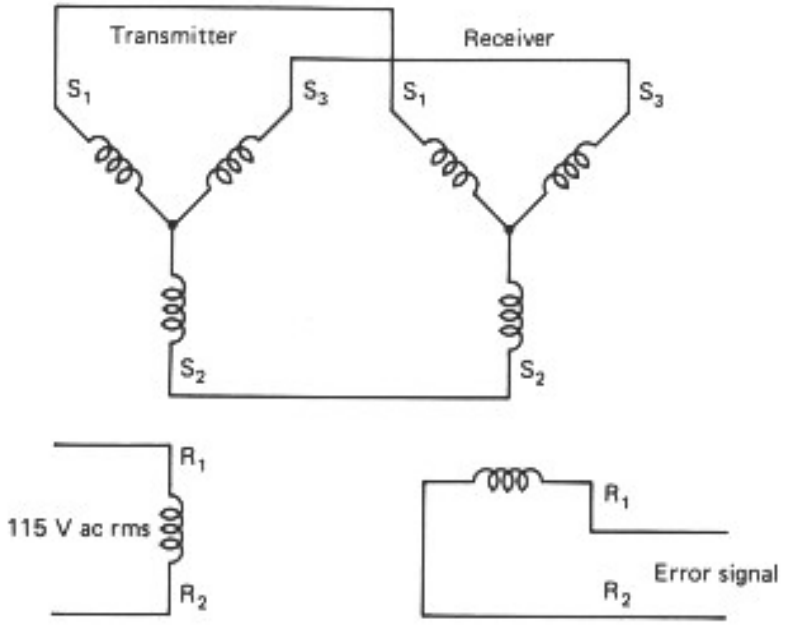
جواب اصلی استفاده از سینکروی گیرنده است که بصورت شکل جمع بندی شده‌است.



شکل- سیم کشی گیرنده و انتقال دهنده سنکرو

محور سینکروی گیرنده آنقدر می چرخد تا خود را با محور موقعیت سینکروی فرستنده تنظیم نماید. می توان یک عقربه به محور سینکروی گیرنده متصل نمود تا نمایشگر موقعیت محور سینکروی فرستنده باشد. در چنین حالتی سینکروی گیرنده بایستی قادر به ارائه مقداری گشتاور نیز باشد تا بتواند عقربه را بچرخاند.

می‌توان از سینکروی گیرنده برای تولید ولتاژ خروجی استفاده نمود. در این حالت روتور دیگر آزاد نیست تا مانند شکل فوق دوران کند. همچنین روتور سینکروی گیرنده به منبع تغذیه روتور سینکروی فرستنده متصل نمی‌باشد.



شکل - سیم کشی گیرنده و انتقال دهنده سنکرو برای تولید سیگنال خطا

در این حالت ، در روتور سنکروی گیرنده ولتاژی القاء می شود که به مقدار اختلاف موقعیت زاویه‌ای دو روتور است:

$$\upsilon_{\text{reciever rotor}} = (E_{pk} \sin \omega t) \cos \theta$$

این مطلب در شکل فوق نشان داده شده است. در حقیقت اگر شما محور گیرنده را باندازه دلخواهی نسبت به محوری که گردش آنرا کنترل می کنید بچرخانید، ولتاژ خروجی از روتور آن یک نمایش از خطا (موقعیت مور نظر - موقعیت واقعی) می‌باشد.

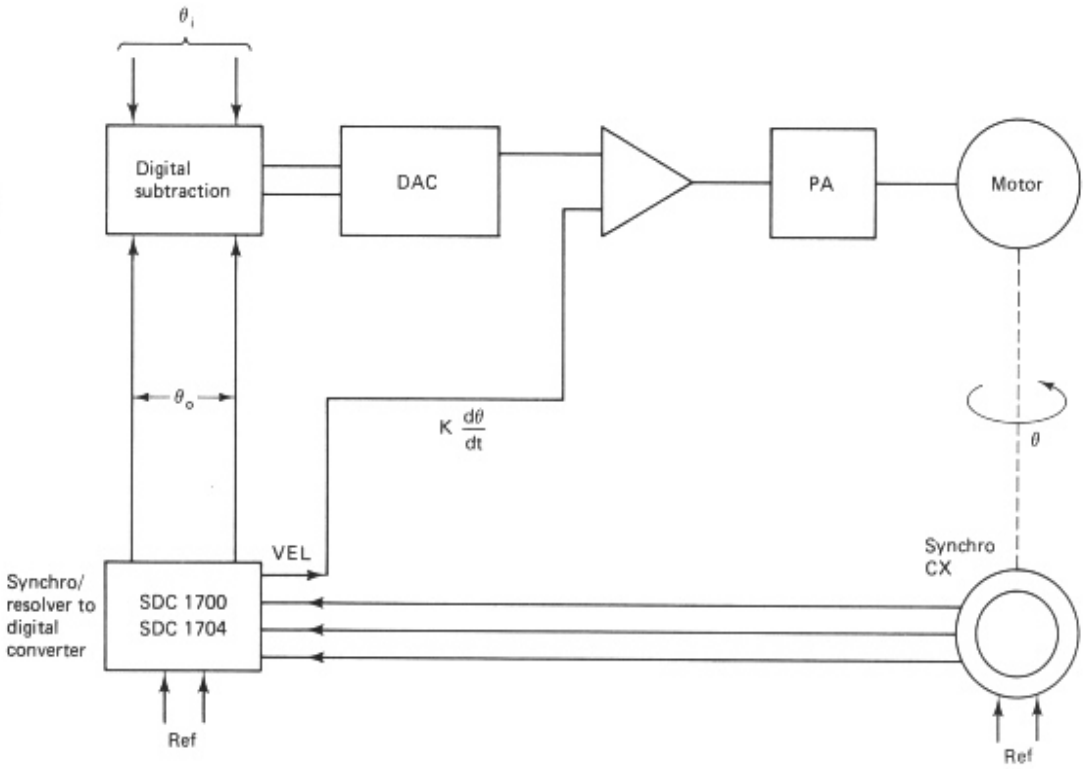
همانگونه که از رابطه فوق مشخص است خروجی سینکروی گیرنده خطی نیست.در حقیقت، خروجی منحصر به یک داده هم نیست. دو زاویه وجود دارند که در صورت چرخیدن محور به اندازه یک دوران کامل تولید خروجی مشابهی می کنند.

یک راه حل مناسب، استفاده از مبدل سینکرو به دیجیتال (S/D) و یا مبدل ری‌زالور به دیجیتال است. مبدل S/D یک مدار مجتمع آنالوگ است که از سیگنال های S_1, S_2, S_3 و R_1 و R_2 سینکروی فرستنده استفاده می‌کند تا یک کلمه باینری تولید کند. رابطه بین زاویه و مقدار موقعیت بیت باینری در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول - مقادیر زاویه ای برای بیت های باینری یک مبدل S/D

شماره بیت	به درجه	ودرجه	به دقیقه	به رادیان
۱	۱۸۰	۱۸۰	۰	۳,۱۴۱۵۹۳
۲	۹۰	۹۰	۰	۱,۵۷۰۷۹۶
۳	۴۵	۴۵	۰	۰,۷۸۵۳۹۸
۴	۲۲,۵	۲۲	۳۰	۰,۳۹۲۶۹۹
۵	۱۱,۲۵	۱۱	۱۵	۰,۱۹۶۳۴۹
۶	۵,۶۲۵	۵	۳۷,۵	۰,۰۹۸۱۷۵
۷	۲,۸۱۲۵	۲	۴۸,۷۵	۰,۰۴۹۰۸۷
۸	۱,۴۰۶۲۵	۱	۲۴,۳۸	۰,۰۲۴۵۴۴
۹	۰,۷۰۳۱۲	۰	۴۲,۱۹	۰,۰۱۲۲۷۲
۱۰	۰,۳۵۱۵۶	۰	۲۱,۰۹	۰,۰۰۶۱۳۶
۱۱	۰,۱۷۵۷۸	۰	۱۰,۵۵	۰,۰۰۳۰۶۸
۱۲	۰,۰۸۷۸۹	۰	۵,۲۷	۰,۰۰۱۵۳۴
۱۳	۰,۰۴۳۹۵	۰	۲,۶۴	۰,۰۰۰۷۶۷
۱۴	۰,۰۲۱۹۷	۰	۱,۳۲	۰,۰۰۰۳۸۳
۱۵	۰,۰۱۰۹۹	۰	۰,۶۶	۰,۰۰۰۱۹۲
۱۶	۰,۰۰۵۴۹	۰	۰,۳۳	۰,۰۰۰۰۹۶

SDC1740 ، SDC1741 و SDC1742 مبدلهای دنبال کننده پیوسته ریزالور به دیجیتال هستند ، و دارای خروجی دیجیتالی سه وضعیتی هستند.



شکل - حلقه کنترل با استفاده از خروجی دیجینال SDC و خروجی سرعت آنالوگ

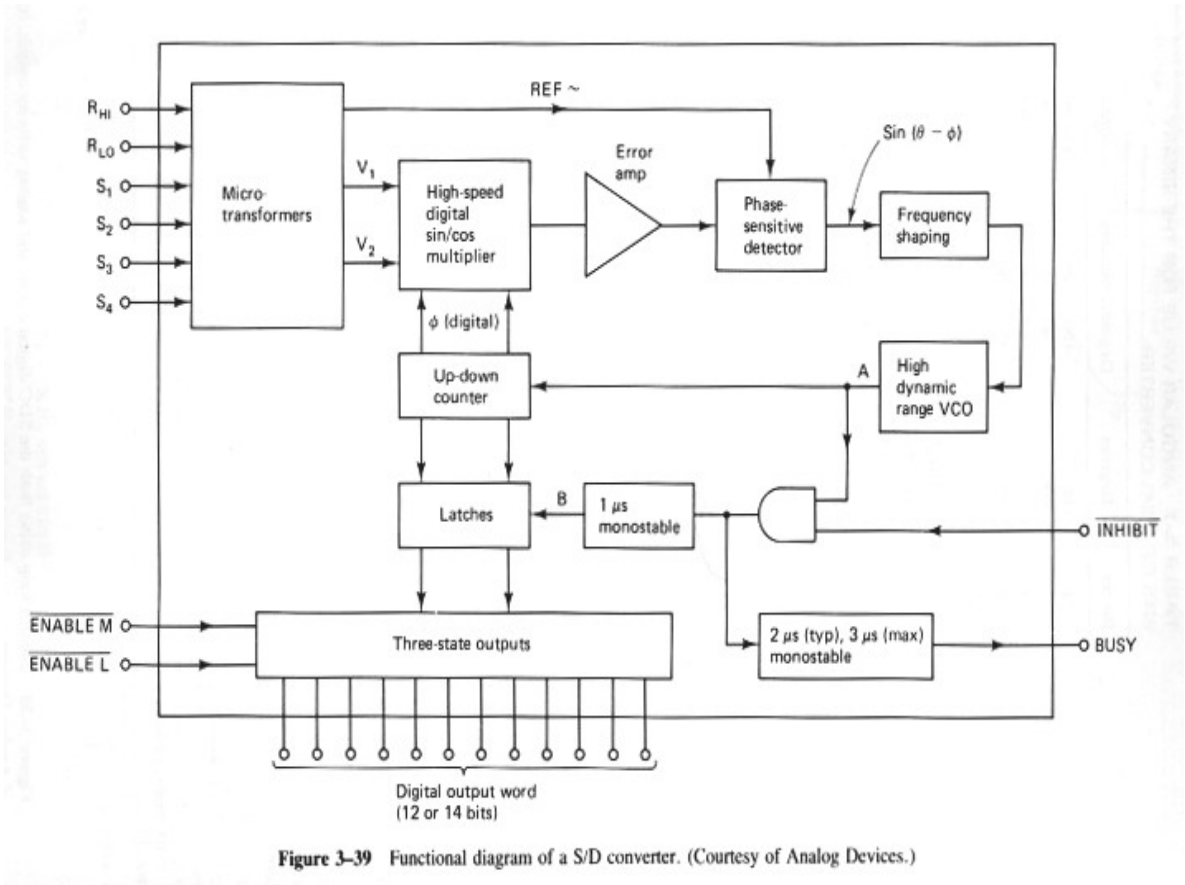


Figure 3–39 Functional diagram of a S/D converter. (Courtesy of Analog Devices.)

شکل ۳۹-۳ دیاگرام عملکرد یک مبدل S/D

سیگنال ورودی می تواند بسته به انتخاب ما، یک سینکروی سه سیمی بعلاوه مرجع باشد و یا ریزالور ۴ سیمه بعلاوه مرجع های مورد نظر. خروجی‌ها بصورت سیگنالهای معادل با TTL و بصورت اطلاعات باینری موازی با هم و بوسیله سه قسمت latch تقویت شده‌اند.

یکی از مزایای عالی این مبدل ها این است که گر چه تنها 0.28 in یا 7.1 mm طول دارند، اما دارای ترانسفورمرهای داخلی برای تولید ایزولاسیون کامل بر روی سیگنالهای ورودی و مرجع می باشند.

شکل فوق مشخص کننده دیاگرام عملکرد این مبدل ها است. اگر مبدل بصورت مبدل سینکرو به دیجیتال عمل کند، سه سیم خروجی S_1, S_2, S_3 روی مبدل متصل شده و ترانسفورمرهای جفت Scott T این سیگنالها را به فرمت ریزالور تبدیل می‌کند:

$V_1 = KE_0 \sin \omega t \sin\theta$

$V_2 = KE_0 \sin \omega t \cos\theta$

که در آن θ زاویه محور سینکرواست. اگر مدار میبایستی بصورت یک مبدل ریزالور به دیجیتال عمل کند ، چهار سیم خروجی ریزالور به S_1, S_2, S_3 و S_4 بر روی مبدل متصل می شوند. در این صورت، ترانس کاملا مانند جدا کننده و ایزوله کننده عمل می نماید.

برای فهم پروسه تبدیل، فرض کنید که وضعیت یا حالت فعلی کلمه شمارندهء بالا_پائینی، φ باشد. پس V_1 در $\cos\varphi$ وV_2 در $\sin\varphi$ ضرب می‌شود تا روابط زیر حاصل آیند:

$KE_0 \sin \omega t \sin\theta \cos\varphi$

و

$KE_0 \sin \omega t \cos\theta \sin\varphi$

این سیگنالها بوسیله تقویت کننده خطا از هم کم می‌شوند تا روابط زیر بدست آید:

$KE_0 \sin \omega t (\sin\theta \cos\varphi - \cos\theta \sin\varphi)$

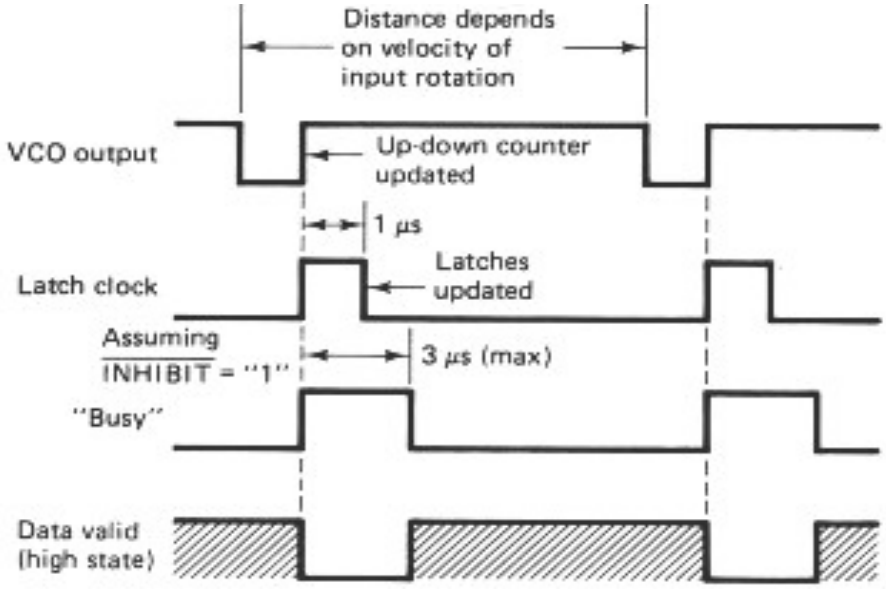
و یا

$KE_0 \sin \omega t \sin(\theta - \varphi)$

یک آشکار ساز حساس به فاز، انتگرال‌گیر و اسیلاتور کنترل شونده بوسیله ولتاژ (VCO)، یک سیستم حلقه بسته را تشکیل می‌دهند تا مقدار $\sin(\theta - \varphi)$ را بسمت صفر ببرند. وقتی این عمل انجام شود، حالت کلمه شمارنده بالا_پائین (φ) مساوی خواهد شد با زوایه محور سینکرو، البته با دقتی که بوسیله مبدل دیکته می‌شود.

فرض کنید که سیگنال $\overline{\text{INHIBIT}}$ در حالت منطقی یک است، سپس کلمه دیجیتال پس از گذشت 1µs از به روز شدن شمارنده به مرحله بعد ارسال می‌شود. اگر $\overline{\text{ENABLE}}$ سه حالتی، در حالت منطقی پایین باشد، کلمه دیجیتال به پین‌های خروجی واحد اعمال می‌شود. سیگنال BUSY توسط مبدل ها تهیه می‌شود تا نشان دهد که عمل تبدیل در حال انجام است. داده تا زمانیکه BUSY به حالت منطقی صفر نرود، معتبر نیست. این موضوع در شکل زیر نشان داده شده است.

یکی از مزایای این مبدل‌ها آن است که ورودی‌های سیگنال و مرجع‌ها را می‌توان بوسیله مقاومت تغییر مقیاس داد تا هر بازه ای از سیگنالهای ورودی و ولتاژ مرجع بدست آید.



شکل ۴۰-۳ دیاگرام زمانبندی برای مبدلهای1740,1741,1742 SDC

چندین ماجول پشتیبانی و مربوط دیگر هم موجودند. ماجولهای ورودی سینکرو/ ریزالور که بجای باینری طبیعی، خروجی BCD می‌دهند. اینها را می توان به سادگی به نمایشگر متصل کرد. ماجولهای مکمل دیگری نیز موجودند که ورودی دیجیتال را گرفته و سیگنال های S_1, S_2, S_3 و R_1 و R_2 سنکرو یا ریزالور مربوطه را باز سازی می کنند. (مبدل D/A). SAC1763، سیگنال های سنکرو را به عنوان ورودی می گیرد ولی در خروجی ولتاژ آنالوگی می دهد که به صورت خطی متناسب با مکان محور است.

ترانسدیوسرهای نیرو (Force transducers)

در کنترل نیرو و سرو سیستم ها اندازه گیری نیرو خیلی اهمیت دارد. رشته خاصی از مهندسی (آنالیز عملی تنش) برای محاسبه نیروهای اعمال شده به قسمتهای مختلف ماشین و یا وسایل نقلیه بوجود آمده است. اندازه گیری دقیق نیرو، طراحی ماشین های (شامل اتومبیل ها و وسایل نقلیه فضایی) سبک تری را میسر می سازد. همچنین می توان به بهره بالاتر، قابلیت اطمینان بیشتر و قیمت کمتر و از سوی دیگر، به کارایی بالاتری نیز برای این ماشین ها رسید.

با اندازه گیری نیرو می توان مقدار پارامتر هایی را که امکان اندازه گیری مستقیم آنها وجود ندارد، به دست آورد. در میدان ثقل زمین، نیرو اندازه ای از جرم ماده است. بنابراین می توان از ترانسدیوسر های نیرو برای تعیین وزن ، مقدار ماده موجود در یک تانک و سطح آن استفاده کرد.

فشار یکی از پارامترهای کلیدی در سیستم‌های هیدرولیک و پنوماتیک است. فشار مساویست با نیرو در واحد سطح است، بنابراین تکنیکهای اندازه گیری نیرو غالباً برای اندازه‌گیری فشار نیز استفاده میشوند.

فشار در سطح یک روزنه، نشان دهنده سرعت مایعی است که از داخل آن روزنه عبور می‌کند. بنابراین ترانسدیوسرهای نیرو برای اندازه‌گیری جریان (Flow) نیز استفاده می‌شوند.

اگر نیروی اعمال شده به یک جرم معلوم باشد، می‌توان شتاب وارد بر جرم را تعیین کرد. بنابراین اندازه‌گیری نیرو، اطلاعاتی راجع به شتاب یک وسیله نیز ارائه می‌دهد.

$$F = ma$$

$$a = \frac{dv}{dt}$$

یا

$$v = \int a dt$$

سرعت، از انتگرال گیری شتاب حاصل میشود.

$$v = \frac{dx}{dt} \qquad \text{یا} \quad x = \int v dt$$

با استفاده از شتاب‌سنج (وسیله ای که نیروی اعمال شده به جرم معینی را اندازه می‌گیرد) و کامپیوتر می‌توانید شتاب، سرعت و موقعیت یک وسیله نقلیه را محاسبه نمائید. این موضوع اصل جهت یابی یا تعیین موقعیت بر اساس اینرسی است (Inertia Navigation Systems).

در نهایت، چون نیروی اعمال شده به یک فنر مستقیماً متناسب با افزایش طولش می باشد داریم:

$F=kx$ $\quad$ k = ثابت فنر

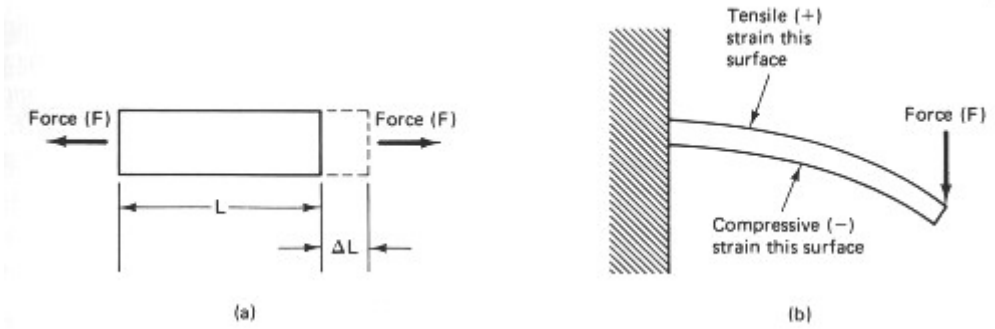
اندازه‌گیری نیروی اعمال شده به فنر (در یک سیستم جرم فنر دمپر و یا نیرو سنج) از طریق اندازه‌گیری جابجائی میسر است.

تنش stress و کشش strain

رابطه بین تنش و کشش یکی از مهم‌ترین اصول در مطالعه مکانیک مواد بوده و برای آنالیز تنش از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است.

وقتیکه به بدنه جسمی نیرو وارد می‌شود، بدنه تغییر شکل می‌دهد. این تغییر شکل (تغییر طول) کشش نامیده شده است. کمیت کشش بصورت تغییر شکل درواحد طول و یا درصد تغییر طول تعریف شده و با علامت ε نمایش داده میشود

کشش ممکن است کشیده شدن (مثبت و یا افزایش طول) و یا فشرده شدن (منفی و یا کاهش طول) باشد. با توجه به شکل زیر رابطه کشش بصورت زیر است.



(a) کشش با یک نیروی اعمال شده از یک سو، (b) کشده شدن و فشرده شدن طرفین تیر یک سر در گیر

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

بنابراین کشش یک نسبت و بدون بعد است. برای توجه داشتن به اهمیت فیزیکی کشش معمولاً آنرا بصورت inch/inch می نویسند.

برای بیشتر فلزات، کشش اندازه گیری شده در کارهای آزمایشی معمولا کمتر از in/in 0.00500 می باشد. چون مقادیر کشش معمولا خیلی کوچک هستند غالباً بصورت واحد میکرو کشش microstrain مشخص میشوند که برابر است با $\varepsilon \times 10^6$ ، این مقدار مساوی یک قسمت در یک میلیون قسمت و یا ppm است و با علامت $\mu\varepsilon$ مشخص میشود. به عنوان مثال:

$0.005\ in/in = 5000\ \mu\varepsilon = 0.5\%$

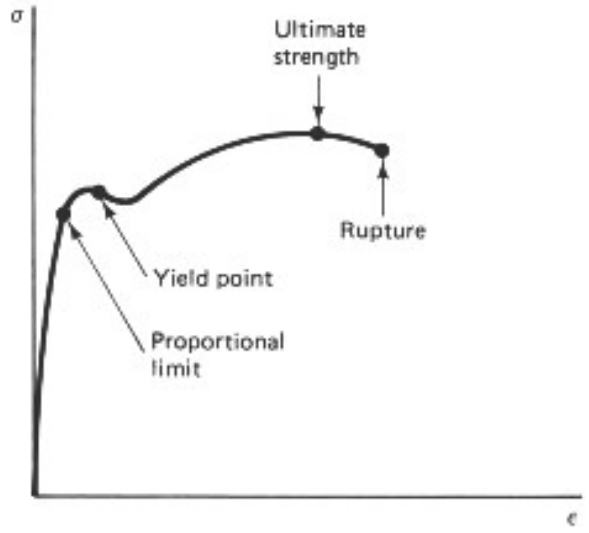
هرچند نیروها و کشش‌ها کمیت‌های قابل اندازه گیری و استفاده توسط طراحان و برای آنالیز تنش هستند، تنش عبارتی است که برای مقایسه بار اعمال شده به یک ماده، و قابلیت تحمل بار آن ماده ، استفاده می شود.

معمولاً نیاز است تا ماشین‌ها و سازه‌ها تا حد ممکن کوچک و سبک طرح شوند، بنابراین برای این منظور میباید قطعات را نیز عملاً تا بالاترین سطح مجازشان تحت تنش قرار داد. بنابراین تنش به نیروی اعمال شده در واحد سطح معینی مربوط است و رابطه آن به صورت زیر بوده و دارای واحد نیرو در واحد سطح میباشد.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

پس از تعریف تنش و کشش، لازم است رابطه تنش و کشش مشخص شود. که در این صورت قادر خواهیم بود تنش را با استفاده از اندازه گیری کشش تعیین نماییم.

اگر میله ای از فولاد نرم داشته باشیم و کم‌کم بر روی آن در جهت محورش، بار، نیرو و یا تنش اعمال کنیم و منحنی تغییرات کشش را نسبت به تنش اعمال شده در جهت بار اعمال شده رسم نماییم، دیاگرام تنش کشش حاصل میشود شکل زیر.



نمودار کشش تنش برای یک قطعه از فولاد نرم

با توجه به شکل فوق ملاحظه میشود که تا نقطه‌ای که حد تناسبی نامیده می شود، رابطه ای خطی بین تنش و کشش موجود است. قانون هوک این رابطه را تعریف نموده است. شیب این خط مستقیم دیاگرام تنش_کشش، مدول الاستیسته یا مدول یانگ آن ماده است.

مدول الاستیسیته،(E)، دارای واحدی مشابه تنش است، (نیرو در واحد سطح) ، و برای مواد بوسیله آزمایش تعیین می‌شود. رابطه تنش و کشش بصورت زیر میباشد.

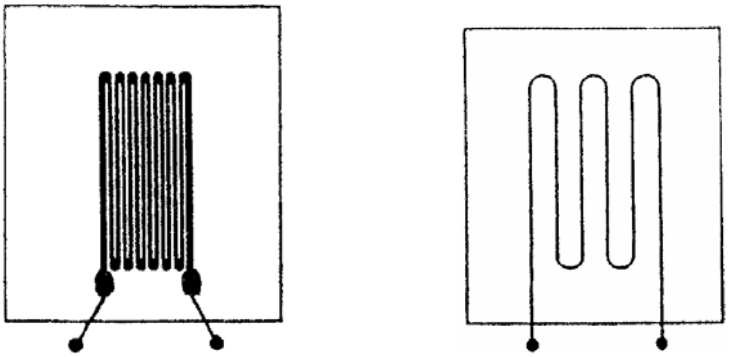
$\sigma = E.\varepsilon$

دو نقطه جالب دیگر هم در دیاگرام تنش کشش وجود دارند. نقطه نرم شدن Yield point و مقدار نهائی توانائی تنش Ultimate strength value. نقطه نرم شدن، سطحی از تنش است که به ازای آن، کشش بطور فزاینده‌ای با یک مقدار کمی افزایش و یا بدون افزایش تنش زیاد می‌شود. اگر بالاتر از نطقه نرمی ، به ماده تنش داده شود، و سپس تنش قطع شود، ماده به اندازه اولیه خودش بر نخواهد گشت، بلکه مقداری کشش در خود حفظ می‌کند. حد نهائی توانائی، ماکزیمم تنشی است که ماده می تواند قبل از پاره شدن، تحمل نماید.

کشش

یکی از مهمترین مشخصه های الکتریکی، که متناسب با کشش تغییر می‌کند، مقاومت الکتریکی است. وسایلی که خروجی آنها بستگی به این مشخصه دارد، گیج‌های کشش Strain Gauge و نیمه هادی ها هستند. استرین گیج ها مقاومتهای کربنی ، سیم‌های فلزی محکم شده و یا گیج‌های فویلی مقاومتی هستند. گیج‌های کربنی و مقاومتی بر گیج‌های سیم‌های فلزی محکم شده ارجحیت دارند. ارزان هستند، طولشان می تواند کم باشد و خیلی حساس به کشش هستند. گر چه حساسیت بالا به درجه حرارت و رطوبت یکی از معایب گیج‌های کشش مقاومت کربنی است.

استرین گیج‌های نیمه‌هادی بر مبنای اثرات پیزو رزیستیو در برخی مواد نیمه هادی مانند سیلیکان و ژرمانیوم استوارند. گیج‌های نیمه‌هادی رفتار الاستیک دارند و می توان آنها را طوری طراحی نمود که با تغییرات کشش تغییرات مقاومت مثبت و یا منفی داشته باشند. می‌توان آنها را از نظر فیزیکی در ابعاد کوچک ساخت در حالی که همچنان دارای مقاومت نامی بالایی باشند. حد کشش برای این گیج‌ها در بازه 100 μ تا 10,000 με است و غالباً برای کشش‌های تا 3000 με آزمایش می شوند. گیج‌های نیمه هادی از خود حساسیت زیادی نسبت به کشش نشان می‌دهند اما تغییرات مقاومت آنها با کشش غیر خطی است. مقاومت و خروجی آنها به درجه حرارت حساس بوده و خروجی بالای آنها که در اثر تغییر مقاومت از حدود ۱۰ تا ۲۰٪ است، می‌تواند در صورت استفاده در مدارهای پل، مشکلاتی را در اندازه‌گیری بوجود بیاورد.

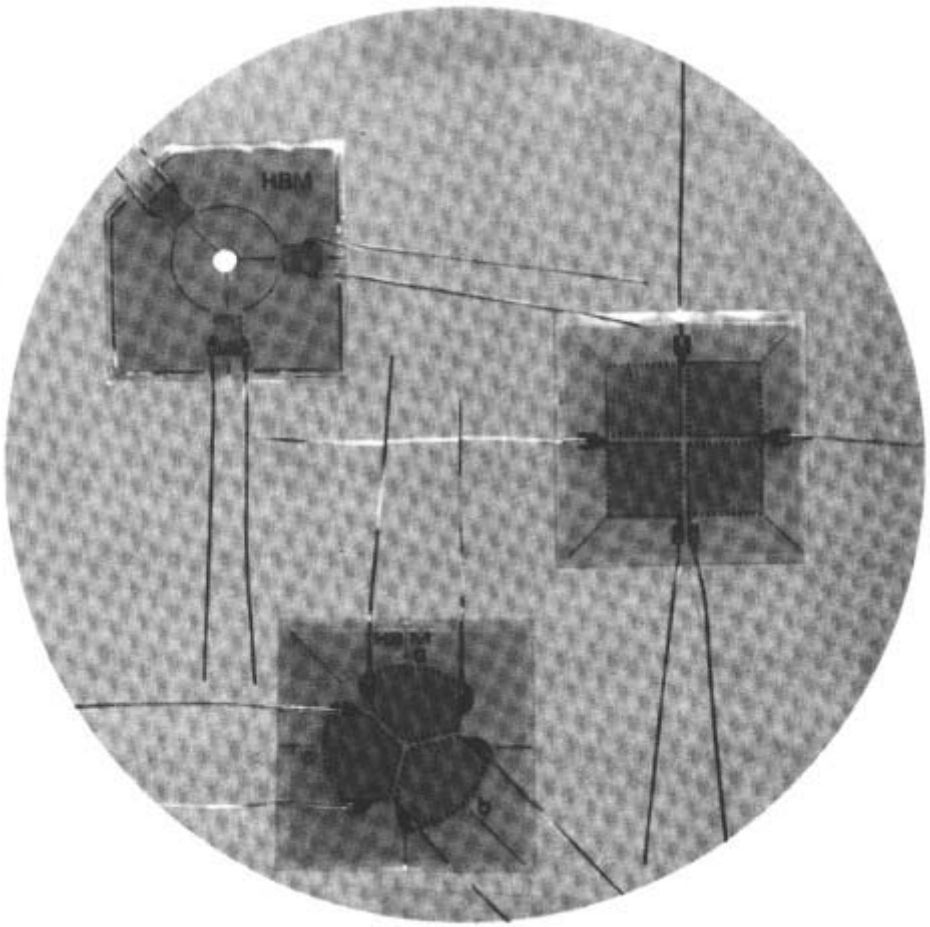


استرین‌گیج‌های مقاومتی باند شده، بیش از همه در وسایل اندازه‌گیری کشش، بکار می روند. این وسیله شامل یک شبکه از سیم خیلی نازک یاغالباً فویل‌های فلزی نازک محکم شده بر روی یک لایه نازک عایق که حامل نامیده می‌شود، هستند (شکلهای بالا). مقاومت الکتریکی مواد این شبکه بطور خطی با کشش تغییر می‌کند. حامل به قطعه آزمایش با چسب چسبانیده می‌شود. وقتیکه نمونه بارگذاری شد، کشش روی سطح آن توسط چسب و حامل به ماده شبکه متنقل می شود. کشش قطعه مورد آزمایش با اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی ماده شبکه قابل محاسبه است. شکل زیر، گیج‌کششی از نوع مقاومت باند شده را با شبکه فویل های کنستانتان و ماده حامل پلی آمید نشان می‌دهد.

گبج کششی از نوع مقاومت باند شده، ارزان قیمت است و می تواند با طول کمی ساخته شود. این وسیله فقط از تغییرات دما اثر می پذیرد، ابعاد فیزیکی و وزن کمی داشته و حساسیت بالایی نسبت به کشش دارد. گیج کششی برای اندازه گیری کشش های استاتیک و دینامیک مناسب است.

وقتیکه یک هادی فلزی کشیده می شود، تغییر مقاومت الکتریکی می‌دهد و این تغییر است که استرین گیج را یک وسیله مفید می‌سازد. اندازه‌گیری تغییرات مقاومت با کشش را فاکتور گیج (GF) Gage factor می نامند. فاکتور گیج بصورت نسبت درصد تغییر مقاومت به درصد تغییر طول (کشش) در جهت محور گیج، تعریف می‌شود. فاکتور گیج یک کمیت بدون بعد است که هر چه بزرگتر باشد، گیج کششی حساس تر است. معادله فاکتور گیج بصورت زیر است.

$$GF = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon}$$



گیج کشش

مثال - یک گیج کشش با نوار استیلی باند شده که 10.00 cm طول دارد و سطح مقطع آن $4.00\ cm^2$ است. مدول الستیسیته یانگ برای استیل $20.7*10^{10}\ N/m^2$ می باشد. گیج کششی، مقاومت نامی (وقتی کشش نیافته است) برابر با 240 Ω و فاکتور گیج مساوی ۲,۲۰ است. وقتی بار را قرار می دهیم، مقاومت گیج 0.013 Ω تغییر می کند. تغییر طول نوار استیل و مقدار نیروی وارد شذه به نوار را محاسبه کنید.

حل- با استفاده از معادله فوق:

$$GF = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L}$$

یا

$$\frac{\Delta R}{R} = GF\left(\frac{\Delta L}{L}\right)$$

یا

$$\Delta L = \frac{\Delta R}{R}\frac{L}{GF}$$
$$= \frac{0.013\,\Omega}{240\,\Omega}\times\frac{0.1\,m}{2.20} = 2.46\times10^{-6}\,m$$

بنابراین

$\sigma=E.\varepsilon$

$$\sigma = \frac{F}{A}$$
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

بنابر این

$$\frac{F}{A} = E\frac{\Delta L}{L}$$

یا

$$F = E\frac{\Delta L}{L}A$$

برای ثابت بودن واحدها، مساحت باید از cm^2 به m^2 تبدیل شود

$$A = 4\,cm^2\times\frac{1m^2}{10^4\,cm^2} = 4\times10^{-4}\,m^2$$
$$F = 20.7\times10^{10}\frac{N}{m^2}\times\frac{2.46\times10^{-6}m}{0.1\,m}\times4\times10^{-4}\,m^2$$
$$= 2.037\times10^{3}\,N$$

و در واحد پوند:

$$F = 2.037\times10^{3}\,N\times\frac{1\,lb}{4.482\,N} = 454\,lb$$

درحالت ایده‌آل ترجیح داده میشود که تغییر مقاومت استرین گیج فقط در پاسخ بـه تـنش ناشـی از کـشش اعمال شده به نمونه مورد آزمایش باشد. اما مقاومت و حساسیت کششی تمام نمونه‌های مواد شناخته شـده،

با تغییر درجه حرارت تغییر می‌کند. این بدان معنی است که مقاومت گیج و فـاکتور گـیج بـا درجـه حـرارت تغییر می‌کنند.

مقاومت یک هادی در حرارت T مساویست با

$$R_T = R_{T_0}(1 + \alpha_0 \Delta T)$$

که در آن:

$R_T = T$ مقاومت در دمای

$R_{T_0} = T_0$ مقاومت در دمای مرجع

α_0 = ضریب حرارتی

$\Delta T = T_0$ تغییر دما از

این مقاومت جدید شامل مقاومت اصلی یا اولیه R_0 در T_0 و تغییر مقاومت ΔR در نتیجه حرارت ΔT است . پس:

$$\Delta R = \alpha_0 \Delta T \, R_{T_0}$$

مثال - تغییر مقاومت ناشی از تغییر دما به مقدار 1°C را برای گیج کششی مثال فوق محاسبه نمایید. ضریب حرارتی (α_0) برای غالب فلزات برابر است با

$$\alpha_0 = 0.003925 /^oC$$

با جایگزین کردن مقادیر لازم در معادله فوق

$$\Delta R = (0.003925 /°C)(1°C)(240\Omega)$$
$$= 0.942\ \Omega$$

اما کشش وارده بر بار در مثال فوق تنها 0.013 Ω تغییر در مقاومت گیج پدید آورد. بنابراین 1°C تغییـر در دمای گیج کششی، تغییری در مقاومت به اندازه

$$\frac{\Delta R_{temp}}{\Delta R_{stress}} = \frac{0.942\,\Omega}{0.013\,\Omega} = 72.5$$

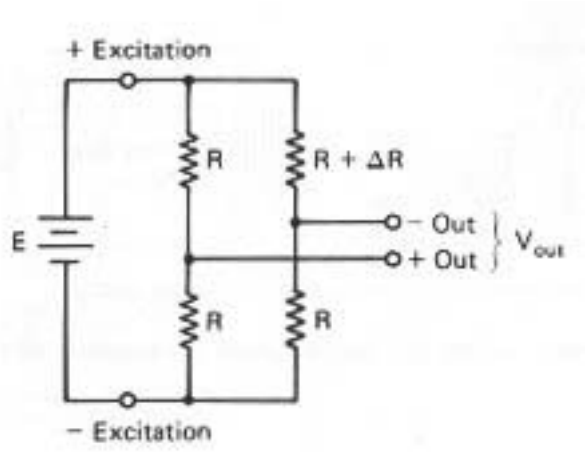
ایجاد نموده است. ۷۲,۵ برابر مقداری که بار 454 lb ایجاد کرد!

از مثال فوق نتیجه میشود که جبران سازی برای دما بسیار ضروری است.

مدار پل وتستون

به دلیل حساسیت فوق‌العاده مدار پل وتستون، غالب اوقات از این نوع پل برای اندازه‌گیـری‌هـای اسـتاتیکی کشش استفاده می شود. مدار پل ساده در شکل زیر نمایش داده شده است. بدون تنش $\Delta R=0$ است، تمـام مقاومت‌های چهارگانه مساویند، out = - out+ و بنابراین $V_{out}=0$ می باشد.

در صورت اعمال تنش مقاومت استرین گیج به اندازه ΔR تغییر می کند و در نتیجه ولتاژ خروجی دیفرانسیلی نیز تغییر خواهد نمود.



شکل ۴۴-۳ پل وتسون ساده اندازه گیر فشار

$$V_{out} = \frac{R}{R+R}E - \frac{R}{R+(R+\Delta R)}E$$
$$= \frac{1}{2}E - \frac{RE}{2R+\Delta R}$$
$$= \frac{(2R+\Delta R)E - 2RE}{2(2R+\Delta R)}$$
$$= E\frac{\Delta R}{4R+2\Delta R}$$

از آنجایی که ΔR ، مربوط به اثر تنش ، در صورت و مخرج رابطه فوق وجود دارد، خروجی پل با اعمال نیرو بطور غیر خطی تغییر می‌کند.

هر چند R چند صد اهم است در حالیکه ΔR معمولاً حدود $0.01\ \Omega$ می باشد که ۱۰۰۰۰ برابر کوچکتر است.بنابراین چون

$$4R \rangle\rangle 2\,\Delta R$$

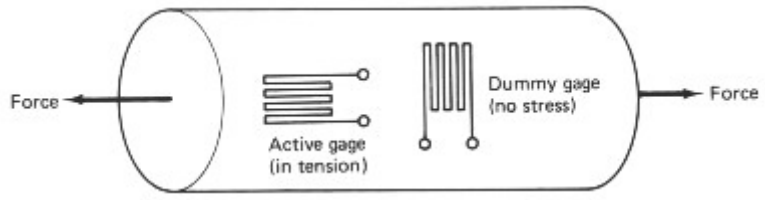
می‌توان رابطه فوق را بصورت زیر و با حذف $2\Delta R$ در مخرج بازنویسی کرد:

$$V_{out} = \frac{\Delta RE}{4R}$$

در نظر داشته باشید که V_{out} یک مقدار تفاضلی است و هیچ مرجع زمینی ندارد. همچنین مقدار خیلی کوچکی بوده و از منبعی با مقاومت خروجی R/2 خارج می شود که ممکن است حدود چند صد اهم یا بیشتر باشد. می بایست این سیگنال را با یک مدار با امپدانس ورودی خیلی بزرگ و قابلیت ایجاد یک سیگنال خروجی نسبت به زمین که تنها به تفاضل ورودی هایش (که همان out+ و out– هستند) وابسته باشد، تقویت نمود.

مزیت استفاده از پل وتستون چیست؟ با قرار دادن دو مقاومت استرین‌گیج در یک طرف پل وتستون می‌توان تأثیر حرارت را حذف نمود.

به شکل زیر توجه کنید. یک گیج کشش به نحوی نصب شده که نیروی اعمال شده باعث افزایش طولش می‌شود. این ترانسدیوسر فعال است. ترانسدیوسر دوم بصورت عمود بر جهت تنش نصب شده و هیچ تنش قابل ملاحظه‌ای بر روی آن وجود ندارد. بنابراین اعمال نیرو، تغییر طولی در آن ایجاد نمی کند. این ترانسدیوسر مجازی است. نیروی اعمال شده فقط بر روی گیج فعال تأثیر گذاشته و پل را نامتعادل می‌سازد. با وجود این، هر تغییری در درجه حرارت بر هر دو گیج و به مقدار مساوی تأثیر می‌گذارد. تغییر مشابه در مقاومت هر دو مقاومت در یک طرف پل باعث عدم تعادل پل نخواهد شد. به عبارت دیگر out- تغییر نکرده و نتیجتاً تأثیر درجه حرارت حذف می شود.



شکل ۴۵-۳ جایگذاری درجه های فعال و مصنوعی برای جبران دما

مثال- V_{out} شکل فوق را با فرض $R_0=240\ \Omega$ و $E=10\ V$ بیابید. همچنین داریم:

الف) تنش باعث می شود که مقاومت بالایی در سمت راست (مقاومت فعال) به اندازه $0.013\ \Omega$ افزایش یابد.

ب) دما باعث می شود هر دو مقاومت سمت راست (فعال و غبر فعال) ، $9.4\ \Omega$ افزایش یابند.

ج) تنش موجب $0.013\ \Omega$ افزایش مقاومت گیج فعال و دما باعث $9.4\ \Omega$ افزایش مقاومت در هر دو گیج می شود.

حل_ الف) با استفاده از معادله فوق داریم:

$$V_{out} = \frac{(240\Omega)(10V)}{240\Omega + 240\Omega} - \frac{(249.4\Omega)(10\Omega)}{249.4\Omega + 249.4\Omega}$$
$$= 5V - 5V = 0V$$

تنش سیگنال بسیار کوچکی ایجاد می نماید.

ب) با استفاده از قانون تقسیم ولتاژ داریم:

$$V_{out} = \frac{(240\Omega)(10V)}{240\Omega + 240\Omega} - \frac{(249.4\Omega)(10\Omega)}{249.4\Omega + 249.4\Omega}$$
$$= 5V - 5V = 0V$$

استفاده از گیج مجازی اثر دما را از بین می برد.

ج)با تغییر دما و مقاومت ناشی از تنش داریم:

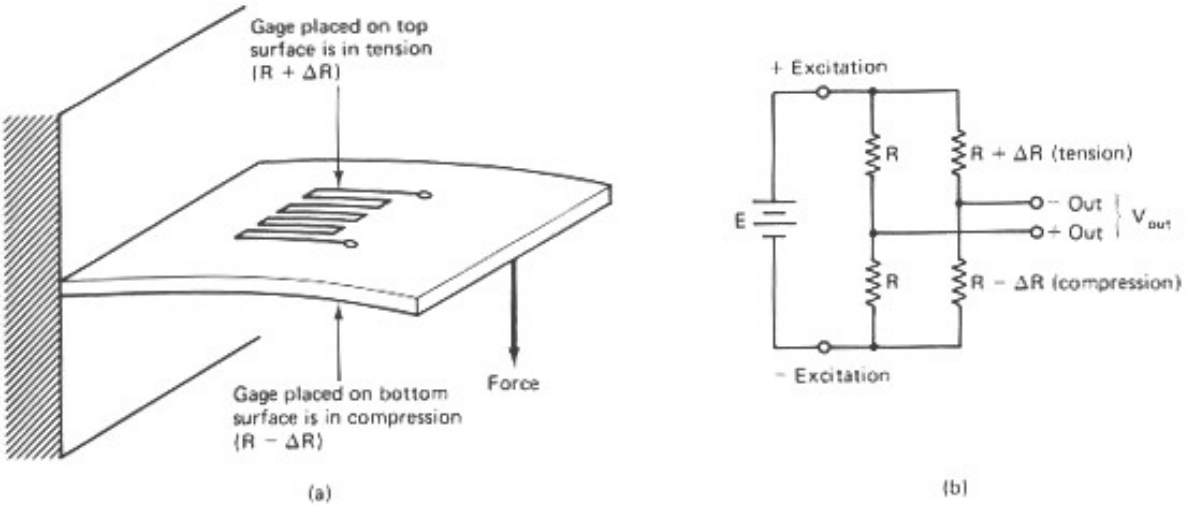
$$V_{out} = \frac{(240\Omega)(10V)}{240\Omega + 240\Omega} - \frac{(249.4\Omega)(10\Omega)}{249.4\Omega + (249.4\Omega + 0.013\Omega)}$$
$$= 5V - \frac{(249.4\Omega)(10\Omega)}{498.813\Omega}$$
$$= 5V - 4.99987V$$
$$= 0.13mV$$

بنابراین، حتی در حضور تغییرات دما و تنش، استفاده از گیج مجازی اثر تغییر دما را از بین می برد.

اگر بخواهیم مشکلات و هزینه‌های مربوط به نصب ۲ گیج بر روی جسم را تحمل کنیم، می توان از هر دو آنها بصورت فعال استفاده کرد. با اتصال هر دو گیج فعال در یک طرف پل، تأثیر حرارت حذف می‌شود. از سوی دیگر با نصب گیجها به ترتیبی که یکی تحت کشش باشد و مقاومت آن با بار افزایش یابد و دیگری تحت فشار بوده و مقاومت آن با بار کاهش یابد، ولتاژ خروجی بازاء یک بار معین در مقایسه با پل مجهز به یک گیج فعال، دو برابر می شود.

$$V_{out} = \frac{\Delta RE}{2R}$$

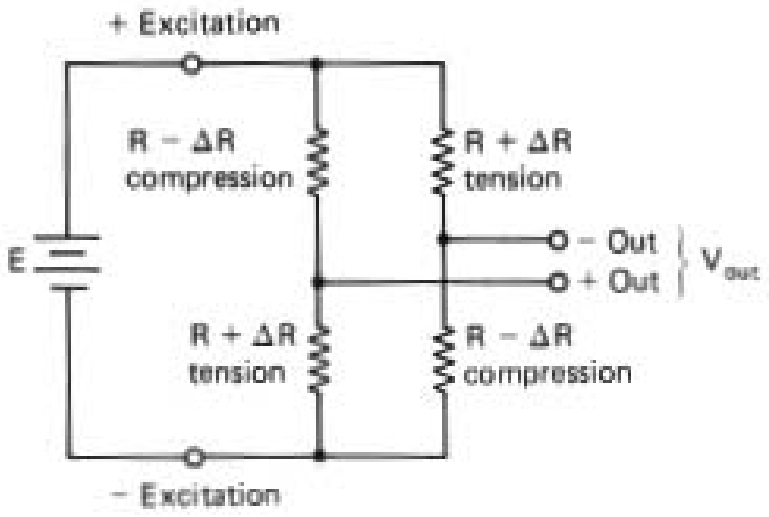
برای ساختن مدار شکل فوق در طرف چپ پل بایستی از دو مقاومت مشابه که از نقطه نظر حرارتی تغییرات مشابه دارند، استفاده نمود.



شکل ۴۶-۳ دو درجه فشار فعال (a)جایگذاری فیزیکی (b)پیکربندی پل

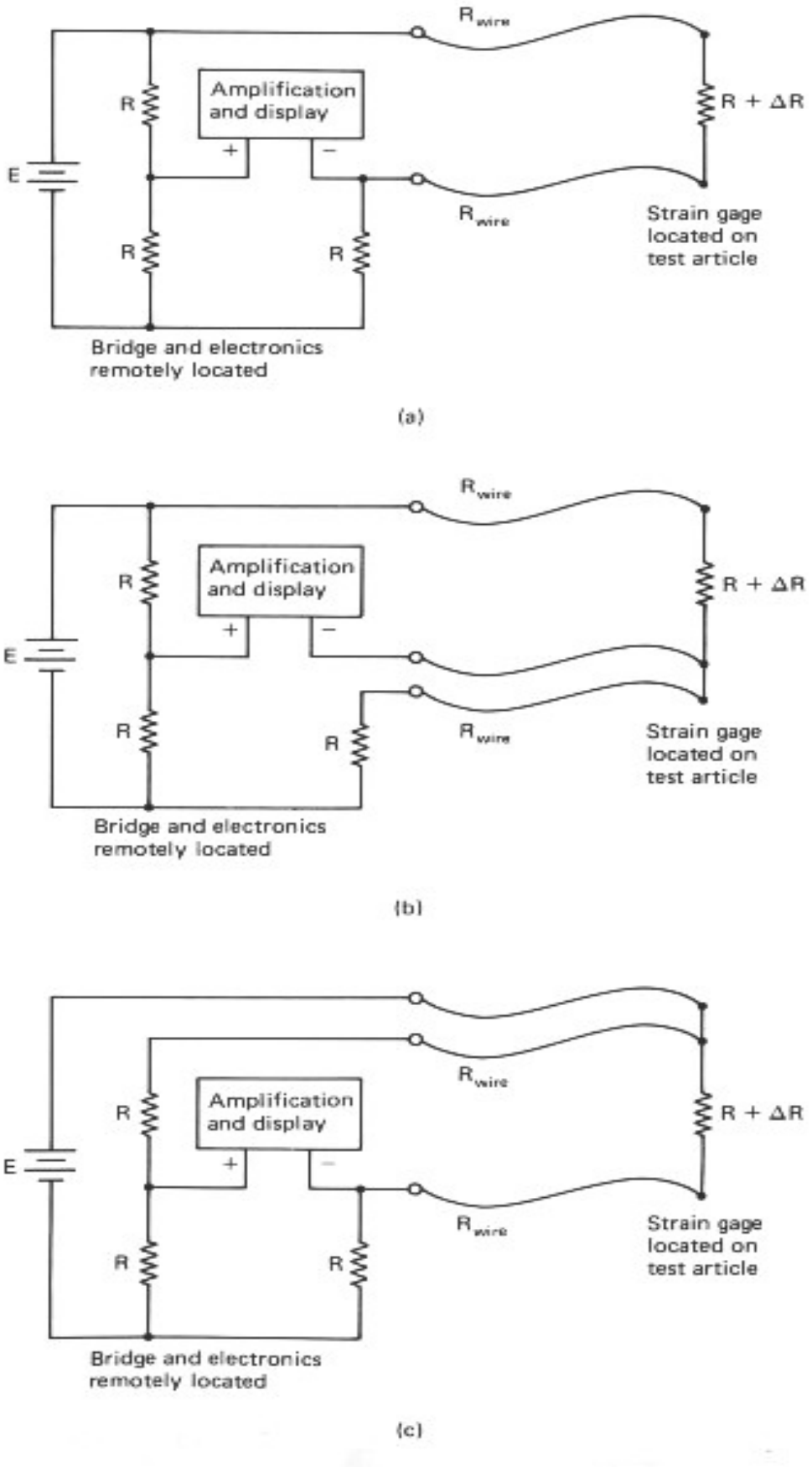
همچنین می توان از دو گیج کششی دیگر نیز استفاده کرد. مدار پل با استرین ۴ گیج فعال در شکل زیر نشان داده شده است. خروجی این پل با چهار استرین گیج فعال برای بار مثبت دو برابر بزرگتر از خروجی پل با دو استرین گیج فعال است.

$$V_{out} = \frac{\Delta RE}{R}$$



پل با چهار گیج کشش فعال

سیم‌کشی مناسب استرین‌گیج، منبع تحریک و مدار الکترونیکی وضعیت دهنده سیگنال Signal conditioning خیلی مهم هستند. این موضوع وقتی بیشتر اهمیت پیدا می‌کند که قسمتی از مدار پل در محل جسم مورد آزمایش و قسمت دیگر آن در محل اندازه‌گیری در فاصله دوری از آن قرار داشته باشد. نکته کلیدی آن است که دقیقاً طول مساوی و نوع مشابهی از سیم برای هر دو شاخه پل استفاده شود. در این صورت مقاومت اضافی مربط به سیمهای رابط بصورت متعادلی به هردو طرف اضافه می شود. حالتهای درست و نادرست سیم‌کشی در شکل های زیر نشان داده شده اند. این روش های صحیح تغییرات مقاومتی سیم (R_{wire}) را که ناشی از تغییر دما هستند، جبران می نماید.



شکل ۴۸-۳ اتصال درجه فشار به یک پل متحرک

3_3.4 سلول های بار Load cells

نتیجه مناسب و مطمئن استفاده از استرین گیج، فقط وقتی به دست خواهد آمد که گیج‌ها به نحو مناسبی نصب شده باشند.گیج ها باید دقیقاً نیرو را از جسم به گیج منتقل نمایند. از طرف دیگر، جسم نیز بایست کشش و فشردگی یکسانی در شاخه‌های مخالف پل وارد آورد. مشخصات فیزیکی جسم بایستی معلوم باشد و اتصال لحیم مربوط به استرین گیج‌ها مساوی و بامقاومت کمی باشد. تمام این مسائل مثل یک دستور بلند و بالا است.

راه حل معمولی خریدن یک سلول‌بار است. سلول بار ترانسدیوسری است که برای اندازه‌گیری مستقیم نیرو طراحی شده است. شامل بدنه ایست است که استرین گیج‌ها بطور مناسبی بر روی آن نصب شده اند (معمولاً چهار تا). ابعاد جسم و پارامترهای تنش_کشش استرین گیج‌ها مناسب هم بوده و تنها کاری که بایستی انجام داد، تغذیه و تقویت و نمایش الکترونیکی است. چندین نوع سلول بار در شکل زیر نشان داده شده‌اند. گر چه شما مشخصات متعددی در خصوص سلولهای بار ملاحظه می‌کنید، لیکن مهم‌ترین آنها، خروجی در ظرفیت نامی آن است که معمولاً حساسیت نامیده می‌شود و بر حسب mV/V بیان می‌شود. این خروجی، یک ولتاژ خروجی تفاضلی از پل است که برای هر ولت منبع تغذیه در اثر بار کامل نتیجه می شود.

مثال - یک سلول بار GSE5353 دارای ظرفیت بار کامل 500 lb است.

الف) ولتاژ تحریک توصیه شده چیست؟

ب) با استفاده از ولتاژ تحریک، ولتاژ خروجی بازاء هر پوند چقدر است؟

ج) غیر خطی بودن بر حسب پوند چقدر است؟

د) جابجائی صفر (بر حسب پوند) چیست البته چنانچه حرارت در رنج کاری مناسب آن تغییر کند.

ه) اگر برای وزن کردن یک تانکر استفاده شود، بایستی تانکر را از سلول بار آویزان کرد یا بر روی آن قرار داد؟ چرا؟

با استفاده از شکل زیر

الف) ولتاژ تحریک توصیه شده توسط تولید کننده با 10 V dc است.

ب)

$V_{out(max)}$=(خروجی در مقدار نامی)($V_{تحریک}$)

$$= (2\ \text{mV/V})(10\ \text{V}) = 20\ \text{mV}$$

ولی این مقدار برای ۵۰۰ پوند است. بنابراین

$$V_{out/lb} = \frac{V_{out(max)}}{full\_scale\ load}$$

$$= \frac{20\ \text{mV}}{500\ \text{lb}} = 40\ \mu\text{V/lb}$$

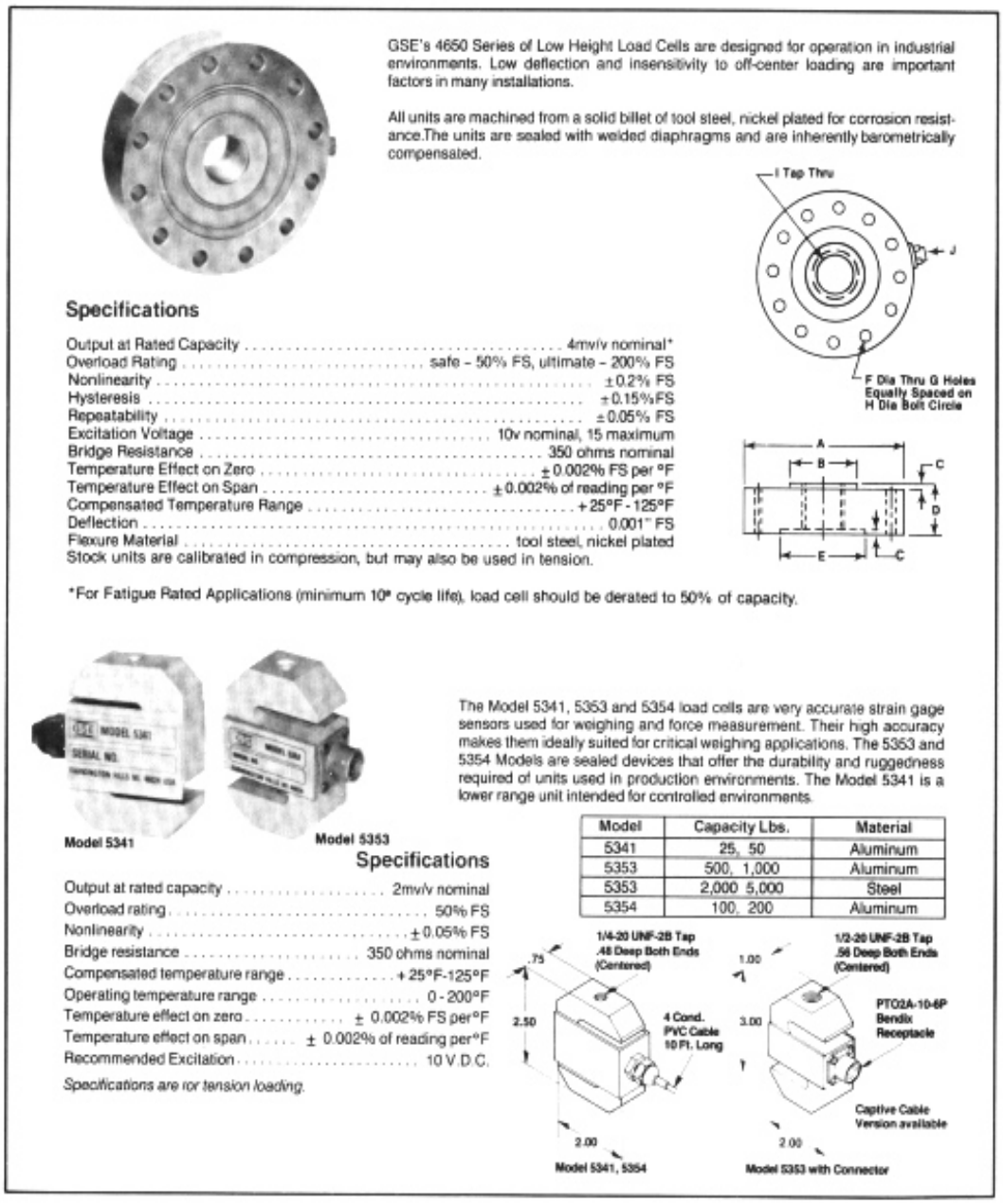
این بدین معنی است که مدار الکتریکی بایستی قادر باشد تا بدقت سیگنال تفاضلی 40 μV و یا کمتر را تقویت کند تا قابلیت تشخیص و نمایش تغییرات یک پوندی را داشته باشد.

ج) خاصیت غیر خطی بودن برابر $\pm 0.05\%$ FS است.

$$\text{nonlinearity} = (\pm 0.05\%\ \text{FS})(500\ \text{lb}) = \pm 0.25\ \text{lb}$$

بنابر این فرق نمی کند وسایل الکترونیکی شما تا چه اندازه خوب باشند، ± 0.25 lb عدم قطعیت در پاسخ وجود خواهد داشت. نمایش نتایج با با قابلیت تفکیک پذیری بیشتر از ½ lb بیهوده است.

د) بازه دمایی بین 25+ و 125°F+ است. بنابر این 100°F جابجایی داریم. جابجایی صفر با دما +0.002% FS/°F است.



GSE's 4650 Series of Low Height Load Cells are designed for operation in industrial environments. Low deflection and insensitivity to off-center loading are important factors in many installations.

All units are machined from a solid billet of tool steel, nickel plated for corrosion resistance.The units are sealed with welded diaphragms and are inherently barometrically compensated.

I Tap Thru

J

F Dia Thru G Holes Equally Spaced on H Dia Bolt Circle

A B C D E C

Specifications

Output at Rated Capacity	4mv/v nominal*
Overload Rating	safe – 50% FS, ultimate – 200% FS
Nonlinearity	±0.2% FS
Hysteresis	±0.15% FS
Repeatability	±0.05% FS
Excitation Voltage	10v nominal, 15 maximum
Bridge Resistance	350 ohms nominal
Temperature Effect on Zero	±0.002% FS per °F
Temperature Effect on Span	±0.002% of reading per °F
Compensated Temperature Range	+25°F - 125°F
Deflection	0.001" FS
Flexure Material	tool steel, nickel plated

Stock units are calibrated in compression, but may also be used in tension.

*For Fatigue Rated Applications (minimum 10^8 cycle life), load cell should be derated to 50% of capacity.

Model 5341 Model 5353

The Model 5341, 5353 and 5354 load cells are very accurate strain gage sensors used for weighing and force measurement. Their high accuracy makes them ideally suited for critical weighing applications. The 5353 and 5354 Models are sealed devices that offer the durability and ruggedness required of units used in production environments. The Model 5341 is a lower range unit intended for controlled environments.

Model	Capacity Lbs.	Material
5341	25, 50	Aluminum
5353	500, 1,000	Aluminum
5353	2,000 5,000	Steel
5354	100, 200	Aluminum

Specifications

Output at rated capacity	2mv/v nominal
Overload rating	50% FS
Nonlinearity	±0.05% FS
Bridge resistance	350 ohms nominal
Compensated temperature range	+25°F-125°F
Operating temperature range	0 - 200°F
Temperature effect on zero	± 0.002% FS per°F
Temperature effect on span	± 0.002% of reading per°F
Recommended Excitation	10 V.D.C.

Specifications are for tension loading.

1/4-20 UNF-2B Tap .48 Deep Both Ends (Centered) .75 60° 2.50 4 Cond. PVC Cable 10 Ft. Long 2.00 Model 5341, 5354

1/2-20 UNF-2B Tap .56 Deep Both Ends (Centered) 1.00 3.00 PTO2A-10-6P Bendix Receptacle Captive Cable Version available 2.00 Model 5353 with Connector

سلولهای بار

zero shift = (+0.002% /^{o}F)(100^{o}F)(500 lb)

=+1 lb

این مقدار ۴ برابر خاصیت غیر خطی است.بنابر این اگر ترانسدیوسر تغییرات زیادی در دما را تجربه کند، باید مقدار صفر را دوباره تنظیم کنید.

ه) تذکری که در پایان مشخصات آمده است می گوید " مشخصات برای بار فشرده کننده هستند" بنابراین باید بار را به گونه ای قرار دهید که از سلول بار آویزان باشد.

ترانسدیوسرهای حرکت Motion transducers

اندازه‌گیری حرکت نسبی قطعات یا اجزاء یک دستگاه کاربردهای فراوانی دارد. با دانستن اینکه یک ابزار با چه سرعتی حرکت می‌کند، می‌توان آنرا سریعتر و با اورشوت کمتری ، نسبت به حالتی که ، تنها از روش ساده موقعیت استفاده شود، در موقعیت خاصی قرار داد. کنترل دقیق سرعت یک نوار نقاله، غلطک های نورد و غیره در خطوط تولید ، از اهمیت خاصی برخوردار است. در آزمایشهای پایداری و تعیین شوک اعمال شده به قطعات، اندازه‌گیری حرکت قطعات مورد نیاز است. امروزه هدایت دقیق هواپیما، موشکها و سفینه‌های فضائی بر پایه اندازه‌گیری حرکت آنها استوار است.

روش های اندازه‌گیری حرکت به چندین دسته تقسیم می‌شوند:

سرعت خطی υ، نرخ تغییر موقعیت x، است، $\upsilon = \frac{dx}{dt}$، که معمولاً بصورت km/h, mi/h, m/s, cm/s یا in/s بیان می‌شود.

سرعت زاویه‌ای اندازه ایست از سرعت چرخش نقطه مورد نظر حول یک مرکز. که در اغلب موارد، سرعت چرخش محور مورد نظر میباشد. سرعت زاویه به صورت rad/s, deg/s یا r/min بیان می‌شود.

شتاب همان نرخ تغییرات سرعت می‌باشد، $a = \frac{dv}{dt}$ و یا $a = \frac{d^2x}{dt^2}$

جرک jerk نرخ تغییرات شتاب و یا همان مشتق سوم موقعیت است، $jerk = \frac{da}{dt}$ یا $jerk = \frac{d^3x}{dt^3}$

این پارامتر در مطالعه شوک و ارتعاش و در مطالعه روانشناسی ناراحتی‌های ناشی از حرکت بر روی مردم، مهم است.

تمام این پارامترها کمیت‌های برداری هستند. هر کدامشان دارای یک جهت وهمچنین یک دامنه هستند. بنابراین ترانسدیوسرهای حرکت بایستی قادر باشند تا جهت و دامنه حرکت را آشکار نمایند، بدین معنی که ترانسدیوسر، حرکت را در جهت یک محور خاص احساس نموده و سرعت یا جابجائی در طول آن محور در جهت های مثبت و منفی را نمایش می‌دهد، حساسیت ترانسدیوسر به حرکت‌های غیر همسو با محورش، پارامتری است که باید با دقت، مقدار دهی شود.

ترانسدیوسر های سرعت

دو نوع اصلی ترانسدیوسر حرکت و یا سرعت وجود دارد. دسته ای که حرکت در طول یک محور را اندازه می گیرند (خطی) و گروهی که حرکت دور یک محور را اندازه می گیرند (دورانی). این دو نوع به طور مجزا بررسی خواهند شد.

سرعت خطی به چند طریق متفاوت قابل اندازه گیری است. برای حرکت هایی که جابجایی محدودی دارند، ترانسدیوسرهای سرعت خطی از نوع الکترومغناطیسی کارائی خوبی دارند.

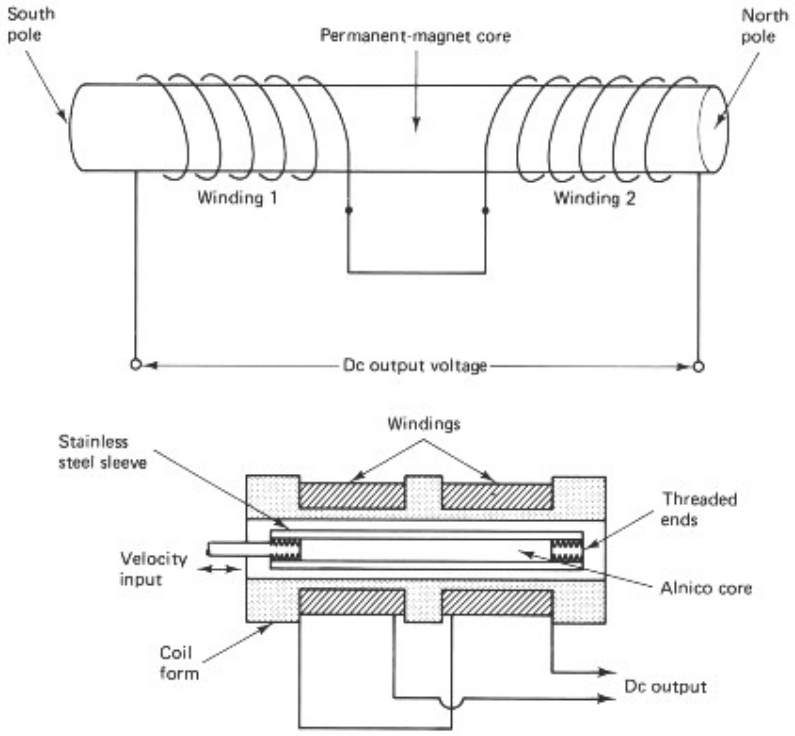
جابجایی های بیشتر را می توان با انتگرال گیری از شتاب تعیین نمود.

در مواردی که امکان اتصال بین جسم در حال حرکت و وسیله اندازه گیری وجود ندارد، می توان از رادارهای دوپلر و یا سیستم های لیزر استفاده کرد.

ترانسدیوسر سرعت خطی از نوع الکترومغناطیسی در شکل زیر نشان داده شده است. این ترانسدیوسر گاهی اوقات ، سیم پیچ و بوبین سرعت نامیده میشود.

تمامی ترانسدیوسرهای الکترومغناطیسی با استفاده از این اصل کار می کنند که ولتاژ القا شده به سیم پیچ توسط میدان مغناطیسی مستقیما به نرخ تغییر میدان مغناطیسی بستگی دارد.

$$v = -N\frac{d\phi}{dt}$$



ترانسدیوسر سرعت خطی مغناطیسی

هسته ترانسدیوسر، سرعت خطی الکترومغناطیسی، مغناطیس دائم است. ولتاژ القاء شده در سیم پیچ بستگی به سرعت کشیده شدن هسته دارد. عکس نمودن جهت حرکت، پلارتیه ولتاژ القاء شده را معکوس می‌سازد. البته در این حالت، هسته مغناطیسی نباید از داخل سیم پیچ بیرون کشیده شود، نتیجتاً برای جابجائی قطعه‌ای که قصد اندازه‌گیری سرعت آنرا داریم، محدودیت وجود دارد.

برای ترانسدیوسر سرعت از نوع انتگرال‌گیری شتاب، محدودیت کمتری وجود دارد.

در این حالت از ولتاژ خروجی ترانسدیوسر شتاب پیزو الکتریک انتگرال گیری میشود. بنابراین می‌توان سرعت در هر لحظه را ، با انتگرال گیری از سیگنال شتاب و اضافه کردن سرعت اولیه به آن محاسبه نمود.

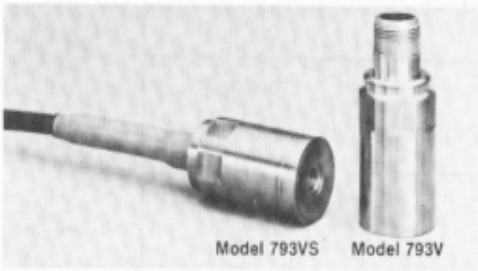
عمل انتگرال گیری و اضافه کردن مقدار اولیه (V_0)، بوسیله مدار الکترونیکی داخل ترانسدیوسر انجام می‌شود. مشخصه‌های این ترانسدیوسر در شکل زیر داده شده است.

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$dv = adt$$

$$v = \int adt + v_0$$

Piezoelectric Velocity Transducer



The Model 793V Velocity Transducer is a rugged vibration sensor for wide range velocity measurements. Combined in a small housing is a piezoelectric accelerometer, a low-noise amplifier and an integrator which converts the signal from acceleration to velocity. The solid piezoelectric construction and the low-noise signal conditioning allow the measurement of vibration over a wide frequency and amplitude range.

The low noise performance is made possible by the unique integration within the transducer which is superior to external integration of an accelerometer signal. In addition, the physical construction minimizes erroneous signals from thermal transients, base strain, transverse motion and magnetic fields. This solid unit offers significant advantages over the coil-and-magnet type velocity pickups, primarily in the areas of reliability, frequency range, and phase accuracy. Available with standardized sensitivities of 100 mV/in/sec or 500 mV/in/sec. Waterproof molded cable, explosion proof housing, or internal temperature sensor optional.

Applications:

- Machinery Monitoring
- Structural Analysis
- Fan Monitoring
- General Vibration Measurement
- Dynamic Balancing
- Test Cell Application
- Low Frequency Monitoring

Features:

- ☐ Wide Frequency Range
- ☐ Three Models
  - 793V 100 mV/in/sec, 2.5 Hz to 3500 Hz
  - 793V-1 100 mV/in/sec, 10 Hz to 3500 Hz
  - 793V-5 500 mV/in/sec, 10 Hz to 3500 Hz
- ☐ No Moving Parts to Fatigue
- ☐ Increased Reliability
- ☐ "Drop-Proof" Protection
- ☐ Mounts in any Orientation
- ☐ Low Magnetic Sensitivity
- ☐ Small Size and Weight
- ☐ Inherently Attenuates High Frequencies
- ☐ No Critical Alignment Requirement
- ☐ Increased Dynamic Range
- ☐ Low Noise
- ☐ Small and Predictable Phase Shifts at Very Low Frequencies

Powering the Piezo-Velocity Transducer

The internal amplifier requires an external DC power source to operate. Proper operation can be obtained by applying a DC voltage (+18 to +30 VDC) to the center conductor of the cable through a constant current diode (1 to 10 mA) as shown in Figure 1.

A blocking capacitor is required in series with the output signal if the readout instrument is DC coupled. The Wilcoxon Research P700 Series Power Units will supply power to any of the 700 Series Accelerometers. A typical set-up for a vibration measurement is shown in Figure 2.

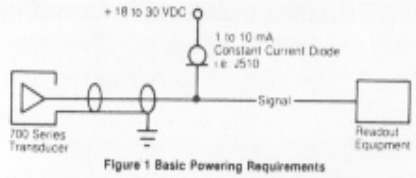


Figure 1 Basic Powering Requirements

CAUTION: The Constant Current Diode must be properly installed to protect the internal amplifier from damage

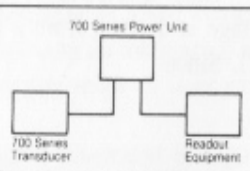


Figure 2 Powering with 700 Series Power Unit

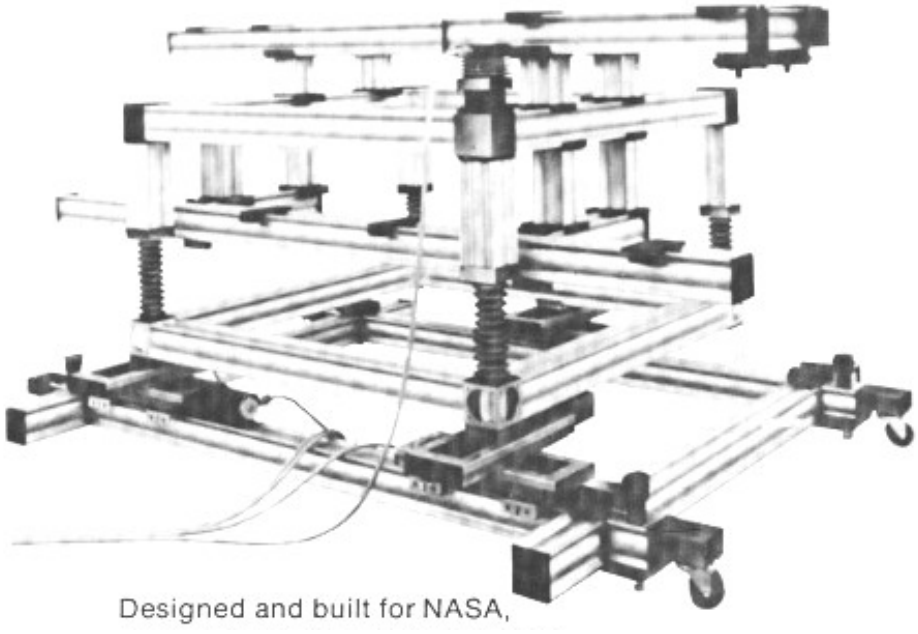
ترانسدیوسرهای شتاب و سرعت

زمان هایی وجود دارد که امکان اتصال ترانسدیوسر به جسمی که می‌خواهیم سرعت آن را اندازه‌بگیریم، وجود ندارد. به عنوان مثال، ممکن است جرم ترانسدیوسر، حرکت قطعه را کند نماید و یا جسم یک اتومبیل و یا هدفی است که می‌خواهید آنرا دنبال کنید. در این حالات از رادار دوپلر و یا لیزر استفاده می شود.

اثر دوپلر بر اساس جابجائی فرکانسی است که، متناسب با سرعت نسبی می باشد. این موضوع را وقتی کنار جاده ایستاده و ماشینی در حین بوق زدن از کنار شما می‌گذرد، حس می‌کنید. همچنانکه ماشینی به شما نزدیک می شود صدای بوق با فرکانس بالاتر و وقتی که از شما دور شود، با فرکانس کمتر به شما می رسد. فرکانس دریافت شده توسط مشاهده گر ثابت به صورت ($f_{recieved}= f_0 + f_v$) است که در آن f_0 فرکانس بوق و f_v یک تابع خطی از سرعت است، مقدار f_v مثبت است اگر فرستنده به مشاهده گر نزدیک شود و منفی است اگر فرستنده صدا دور بشود.

در حالت رادار دوپلر و یا لیزر، یا یک موج پیوسته (CW) و یا یک سری موج پیوسته ایکه مدولاسیون پالسی شده است بطرف جسمی که سرعت آن را می خواهیم اندازه‌بگیریم فرستاده می‌شود. امواج پس از برخورد با هدف برمی گردند، هرچند فرکانس امواج برگشتی، متناسب با سرعت نسبی هدف، تغییر میکند. این اکو دریافت شده و زمان و فرکانس آن باسیگنال ارسال شده مقایسه می‌گردد. مدت زمان رفت و برگشت سیگنال متناسب با فاصله ی هدف و تغییر در فرکانس آن مقدار متناسب با (f_v) سرعت هدف است.

ساده ترین نوع ترانسدیوسر سرعت، رادار هائی است که پلیس برای تشخیص سرعت اتومبیل‌ها استفاده می کند. هر چند، سیستم‌هایی که بر اساس اصول مشابه کار می کنند، برای هدف یابی موشک و ردیابی و کنترل یا هدایت وسایل هوائی مورد استفاده قرار می گیرند. حرکت میز آزمایش شکل زیر بوسیله سیستم اندازه‌گیری سرعت لیزر دوپلر اندازه‌گیری می‌شود. در این سیستم ، جابجائی در یک محدوده .in 10 با دقت $\pm 1\mu m$ اندازه‌گیری می‌شود.



سیستم مکان یابی رزلوشن بالا با استفاده از اندازه گیری سرعت لیزر دوپلر Doppler

ترانسدیوسرهای سرعت زاویه‌ای معمولاً به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

دسته ای که در خروجی، ولتاژی ، به صورت تابعی از سرعت چرخشی تولید می کنند، و دسته ای که فرکانس خروجی‌شان بستگی به سرعت چرخش دارد. معمول‌ترین ترانسدیوسر سرعت زاویه‌ای، تاکومتر الکترومغناطیسی است که در آن، یک میدان مغناطیسی بوسیله یک مغناطیس دائم، و یا تحریک مجزای سیم پیچ روی استاتور، تأمین می شود، و روتور از یک سری سیم پیچ تشکیل شده است. هنگام چرخش روتور در میدان مغناطیسی، در سیم پیچ ها ولتاژی القاء خواهد شد، دامنه EMF القاء شده در سیم پیچ ها، مستقیماً متناسب با سرعت چرخش روتور است. با اتصال چندین سیم پیچ بصورت سری و چرخانیدن آنها درون میدانهای چندگانه، خروجی بزرگ و تقریبا بدون ریپلی بدست خواهد آمد. این سیگنال از طریق جاروبک و کامیوتاتور به خارج آورده می‌شود که به نوبه خود، باعث dc شدن ولتاژ خروجی خواهد شد.

تعویض جهت گردش باعث عوض شدن پلاریته ولتاژ خروجی می‌شود.

چندین دلیل برای استفاده زیاد از تاکومترهای dc وجود دارد. استفاده از آنها آسان است، ولتاژ خروجی dc نسبتاً بزرگی ایجاد می شود و دیگر نیازی به مدارهای تنظیم کننده نیست.

تاکومترهایی که از مغناطیس دائم استفاده می‌کنند، غالباً ۳ تا ۷ ولت خروجی به ازای ۱۰۰۰r/min می‌دهند در حالیکه آنهائی که مغناطیس الکتریکی دارند خروجی ۱۰ تا ۲۰ ولت در ۱۰۰۰ r/min می‌دهند. جهت چرخش مستقیماً متناسب با پلارتیه ولتاژ خروجی است. دقت‌های از ۰,۱ تا ۰,۲۵٪ FSO قابل دسترسی هستند.

با وجود این، کامیوتاتور و جاروبک معمولاً مشکل آفرین هستند، نیاز به نگهداری پیوسته ای دارند. هر گونه جرقه در جاروبک ها تولید تداخل فرکانس رادیوئی (RFI) می‌کند که بقیه سیستم بایستی از آن محافظت شوند.

برای کاربردهائی که مشکلات مربوط به جاروبک ها غیر قابل قبولند، می توان از تاکومترهای القائی استفاده کرد. اینها همچنین تاکومترهای AC مغناطیسی دائم و یا Drag Cup Accelerometr نیز نامیده می‌شوند.

این ترانسدیوسرهای سرعت چرخشی ، جاروبک ندارند و شامل سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه هستند که به صورت عمود بر هم بر روی استاتور نصب شده‌اند می‌باشد. روتور یا قفسه سنجابی و یا استکان شکل است که از فلزی با هدایت بالا ساخته شده است.

وقتی سیگنال 60 Hz به اولیه متصل شود، یک جریان سرگردان Eddy current در جهت عمود بر این سیم پیچ در روتور القاء خواهد شد. وقتی روتور ثابت باشد، میدان مغناطیسی منتج از این جریان‌های سرگردان در روتور، عمود بر ثانویه است. این میدان سیم پیچ ثانویه را قطع نمی‌کند، بنابراین هیچ سیگنالی به ثانویه کوپل نخواهد شد. هر چند، چنانچه روتور بچرخد این میدان در عرض ثانویه حرکت نموده و ولتاژ خروجی القاء می کند. هر چقدر روتور سریع تر بچرخد، میدان القاء شده در روتور سریع تر ثانویه را قطع و نتیجتاً ولتاژ بیشتری در ثانویه القاء خواهد شد.

خروجی ac است، بنابراین بایستی آن را یکسو و سپس فیلتر نمود، تا به یک سیگنال مفید تبدیل شود. چون اولیه و ثانویه عمود بر هم هستند، خروجی با ولتاژ تحریک اختلاف فاز 90° خواهد داشت. وقتی در یک جهت بچرخد، خروجی نسبت به تحریک پیش فاز خواهد شد. عوض کردن جهت چرخش باعث شیفت 180° خروجی ودر نتیجه خروجی نسبت به منبع، 90° پس فاز می شود.

تاکومترهای القایی ac بر مسائل مربوط به جاروبک تاکومترهای dc غلبه نموده‌اند. البته باید یک مدار یکسو کننده و فیلتر حساس به فاز برای بدست آوردن سیگنال مفید، داشته باشند.

اگر چرخش مداوم مورد نیاز نباشد، یا اگر لازم باشد تمام الکترونیک مربوط به فرآیند و نمایش دهنده ها بچرخند، (مشابه حالت هواپیما)، سنسور سرعت زاویه‌ای واتسونWatson انتخاب خوبی است (شکل زیر).

ANGULAR RATE SENSOR SPECIFICATIONS
ONE AXIS UNITS
Models ARS-C121-1A, ARS-C131-1A, ARS-C141-1A

*Power supply requirements:	+15 VDC ±5% 20 mA maximum −15 VDC ±5% 20 mA maximum
*Output:	0 VDC at zero angular rate ±10 VDC at full scale angular rate
*Sensitivity:	ARS-C121-1A ± 30°/second full scale ARS-C131-1A ±100°/second full scale ARS-C141-1A ±300°/second full scale
Output current:	±10 mA maximum
*System frequency:	280 Hz nominal
Resolution:	Limited by noise
Linearity:	<0.1% full scale
Hysteresis:	Not measurable
Temperature offset:	.5% full scale/°C maximum
*Frequency response:	DC-55 Hz
*Output noise:	15mV RMS maximum
*Operating and storage temperature range:	−20°C to +50°C
Storage and operating altitude:	Unlimited
*Shock:	200 G
Life:	No wear-out mode
*Dimensions:	
*Weight:	110 grams (4 oz.)

*Custom units with variation in these parameters are available.

Note: Above units optionally available with digital output.

Specifications subject to change without notice.

سنسور سرعت زاویه ای Watson

مکانیزم ثبت اختراع شده این وسیله ، شامل یک المان متحرک پیزو الکتریک است که بر روی یک پایه ثابت بر مبنای پیکر بندی "چنگال تنظیم شونده tuning fork configuration نصب شده است. دو المان درایو کننده در جهات مختلف بصورت رزونانسی درایو می‌شوند. وقتی چرخشی وجود داشته باشد نیروهای کوری اولیس Coriolis forces ممان را به صفحات عمود بر هم منتقل و باعث کج شدن المان حس کننده می‌شوند. المان حس کننده بااختلاف فاز $180°$ با زاویه حرکت، نوسان می‌کند اما با سرعت خطی در صورت وجود سرعت خطی و به صورت هم فاز نوسان می‌کند. یک مدار پیچیده الکتریکی المانها را درایو نموده و سیگنالهای حس شده را از هم کسر می‌نماید، نتیجتاً خروجی پاسخی از حرکت زاویه ای است که تمام حرکت‌های خطی آن حذف شده‌اند.

پارامترهای اصلی برای ترانسدیوسرهای سرعت زاویه‌ای شامل دامنه سرعت r/min (و یا rpm)، گشتاورهای شروع و چرخش و حساسیت (در واحد mV بر r/min). خطای موجود مربوط به تلفات IR ناشی از بار گذاری سیم پیچهای خروجی، تغییرات درجه حرارت، که مشخصه کوپلینگ مغناطیسی را تغییر می‌دهد، و نوسان محور که باعث تغییر فاصله‌ی هوائی و جابجائی خروجی می‌شود.

ترانسدیوسرهای سرعت زاویه‌ای که تا کنون با آنها آشنا شدید، خروجی ولتاژ دارند.

گروه دیگری از ترانسدیوسرها سیگنالی در خروجی می‌دهند که فرکانس آن وابسته به سرعت چرخش است. دامنه این سیگنال ممکن است ثابت و یا متغیر باشد.

تاکومتر مغناطیسی دائم ac از یک روتور با چندین قطب مغناطیسی دائم استفاده میکنند. یک سیم پیچ واحد روی استاتور بطور متوالی توسط مغناطیس‌های روتور قطع می‌شود (همچنانکه مغناطیس‌ها از مقابل سیم پیچ می‌گذرند)، وقتی قطب شمال، این سیم پیچ را قطع می کند، یک پالس تک قطبی ایجاد می‌شود. در حالی که پالسی با پلاریته مخالف هنگام گذشتن قطب جنوب ایجاد می‌شود. دامنه این پالسها و زمان جهش آنها با سرعت محور تغییر می کند. بنابراین باید از مدار وضعیت دهنده سیگنال برای تبدیل این خروجی به خروجی‌های همخوان با سطوح CMOS و یا TTL برای شمردن و زمان‌سنجی استفاده نمود.

یک سنسور اثر هال، در مجاورت میدان مغناطیسی نسبتاً قوی، ترانزیستور اشباع شده ای را فراهم می آورد. وقتی میدان پایین یک حد مشخصی افت کند، ترانزیستور قطع می‌شود. سیم پیچ تاکومتر مغناطیس دائم ac، را می توان با یک وسیله اثرهال جایگزین کرد. خروجی را می‌توان توسط یک مقاومت به ولتاژ مناسب تبدیل نموده و مستقیماً شمارش را انجام داد.

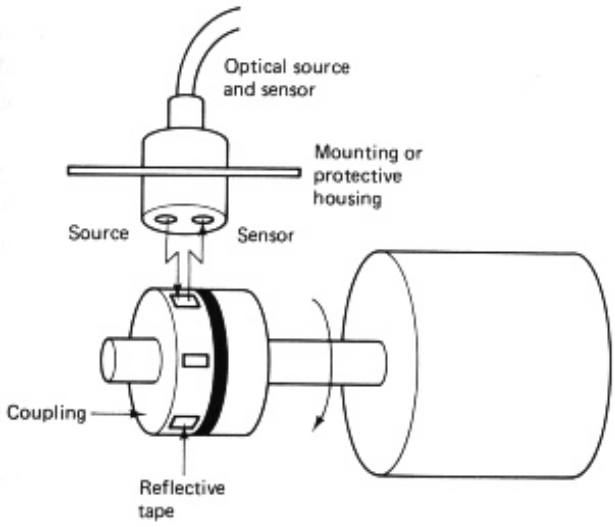
تاکومتر با روتور دندانه ای، در این حالت معمولاً یک مغناطیس دائمی و سنسور را در یک بدنه استاتور جاسازی می‌کند، روتور به شکل دندانه ای است که از یک فلز با رلوکتانس مغناطیسی کم ساخت شده است، همچنانکه دندانه ها در زیر مغناطیس و سنسور می‌چرخند، کوپلینگ بین مغناطیس و سنسور تقویت شده، باعث می‌شود میدان مغناطیسی سنسور را قطع کرده و به ازاء هر دندانه که از زیر سنسور عبورمی‌کند، یک پالس در خروجی تولید گردد.

بسته به طراحی دنده و سنسور، خروجی می‌تواند از نقطه نظر شکل از یک موج خروجی مربعی TTL تا یک پالس با مقادیر مثبت و منفی مشابه سینوسی کامل تغییر کند.

اینکودرهای نوری افزایشی که در قسمت قبل بحث شدند، تعداد ثابتی پالس در هر دور چرخش ایجاد می‌کنند. بنابراین فرکانس این پالسها مبین اندازه‌ای از سرعت زاویه‌ای محورشان است.

در بیشتر ترانسدیوسرهای سرعت چرخشی که تا کنون ملاحظه کردید، محور ترانسدیوسر باید به محوری که تحت اندازه گیری است، متصل شود. این امر ممکن است مشکلات عمده مکانیکی پیش آورد. ممکن است امکان نصب ترانسدیوسر در محل اندازه‌گیری نباشد. دنده‌ها، تسمه‌ها و محورها، تمامشان جابجا یا خم می شوند و خطا ایجاد می نمایند. ممکن است اینرسی ترانسدیوسر موجب بارگذاری بر روی سیستمی شود که تحت بررسی است.

تمام این مسائل را می‌توان بوسیله یک سنسور نوری منعکس کننده برطرف کرد. تکه‌های باریک نوار منعکس کننده (معمولاً شش عدد) بر روی محوری که منعکس کننده نیست، نصب می‌شوند. یک سنسور و منتشر کننده نوری در محل مناسبی قرار داده می‌شوند به ترتیبی که وقتی نوار منعکس کننده از زیر نور رد می‌شود، نور ماوراء قرمز منتشر کننده روی محور متحرک میافتد، و وقتی نوار منعکس ساز از زیر نور بگذرد، نور منعکس‌شده به سنسور بر می گردد. در نتیجه پالسی (معمولا یک ترانزیستور اشباع شده کلکتور باز) در خروجی به وجود خواهد آمد. نور را می توان بوسیله کابل فیبر نوری به محور برد و برگرداند. شکل زیر نحوه تنظیم یک منبع و سنسور نوری را برای اندازه گیری سرعت محور نمایش می‌دهد.



حس کننده نوری سرعت زاویه ای

مثال – یک موتور dc که یک تسمه نقاله را راه می اندازد، ماکزیمم سرعت 720 r/min دارد. لازم است که سرعت را با قدرت تفکیک 1 r/min رد یابی کنیم و هر 100 ms یک عدد بخوانیم.

الف) به چند پالس در دور نیاز است؟

ب) فرض کنید لازم بود از یک سنسور نوری منعکس کننده با ۶ پالس در دور استفاده نماییم، پایین آمدن کیفیت را توضیح دهید.

حل- الف) تعداد دور در هر ثانیه برابر است با

$$\text{سرعت} = 1720\frac{\text{r}}{\text{min}} \times \frac{1\,\text{min}}{60\,\text{s}}$$
$$= 28.67\frac{\text{r}}{\text{s}}$$

در 100 ms مقدار زمان مجاز برای شمارش

$$\text{سرعت} = 28.67\frac{\text{r}}{\text{s}} \times \frac{0.1\text{s}}{\text{پریود شمارش شده}}$$
$$= 2.867\frac{\text{r}}{\text{پریود شمارش شده}}$$

با وجود این، باید در مدت پریود شمارش، ۱۷۲۰ شمارش به دست آید.

$$\text{پالس در دور} = \frac{1720\,\text{count}}{2.867\,\text{revolution}}$$
$$= 600\,\text{counts/revolution}$$

یک ترانسدیوسر با ۶۰۰ پالس در دور ارتباط متقابل یک به یکی را بین شمارش های افزوده شده در 0.1 s و سرعت r/min واقعی محور ایجاد می کند. هر ترانسدیوسری با تعداد پالس بر دور بیش از ۶۰۰، از کمترین تعداد دوری که در مشخصات داده شده است، فراتر خواهد رفت.

ب) اگر مجبور باشیم که از یک سنسور نوری منعکس کننده با ۶ پالس در دور استفاده کنیم، تعداد دور بر ۱۰۰ تقسیم شده است. بنابراین باید برای 100 s پالسها را بشمریم

شتاب

در ابتدای این بخش ملاحظه شد که

$$\text{r} = \frac{\text{dx}}{\text{dt}} \qquad \text{و} \qquad \text{a} = \frac{\text{dv}}{\text{dt}}$$

و یا

$$\upsilon = \int \text{adt} \qquad \text{و} \qquad \text{x} = \int \upsilon \text{dt}$$

بنابراین اگر بتوانیم شتاب یک وسیله نقلیه را اندازه بگیریم، سرعت و موقعیت آنرا می‌توان محاسبه نمود.

در هدایت و همچنین مطالعه حرکت ماشین آلات از این اصول نیز استفاده می‌کنند.

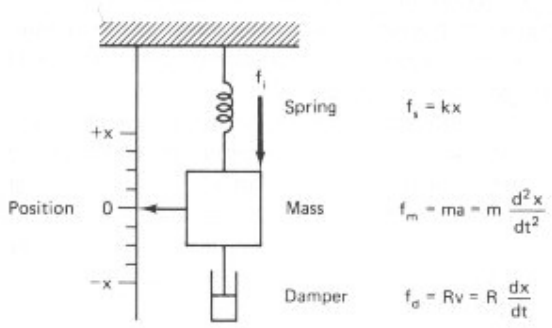
همچنین نیروئی که یک قطعه تجربه می‌کند، مستقیماً متناسب با شتاب آن است. F= ma

اندازه‌گیری شتاب یک قسمت از ماشین نه تنها اجازه می‌دهد حرکت آنرا محاسبه کنید بلکه تنش‌هائی که جسم تحت آن واقع شده نیز قابل محاسبه است.

واحد شتاب $\frac{\text{length}}{\text{time}^2}$ است و به صورت $\text{m/s}^2, \text{cm/s}^2, \text{in/s}^2, \text{ft/s}^2$ بیان می‌شود.

هر چند، غالباً بصورت ضریبی از شتاب جسمی که بطور آزاد در سطح اقیانوس سقوط می‌کند بیان می‌شود که همان نیروی شتاب ثقل زمین g، است. $l_g = \frac{9.81\text{m}}{\text{s}^2} = 32.2\frac{\text{ft}}{\text{s}^2}$

غالب تکنیکهای اندازه‌گیری شتاب، از انواع سیستم جرم، فنر و دمپر استفاده می‌کنند. این روش در شکل زیر نمایش داده شده است.



سیستم جرم فنر کلاسیک

تحت شرایط شتاب ثابت، یک نیروی ثابت f_m به جرم اعمال خواهد شد. نیروی ورودی f_i وجود نخواهد داشت. نتیجتاً جرم حرکت کرده، فنر را کشیده و یا آنرا فشرده می‌نماید تا نیروی اعمال شده به فنر، f_k ، مساوی با نیروی مربوط به شتاب بشود. نتیجتاً جرم در تعادل ثابت واقع شده و متوقف می‌شود. چون نیروی دمپر بستگی به سرعت و جرم داشته و جسم نیز دیگر حرکتی نمی‌کند، مقدار f_R=0. است.

در شرایط تعادل

$$f_m = f_k$$
$$ma = kx$$
$$a = \frac{k}{m}x$$

اندازه‌گیری موقعیت ، وقتی جرم در حالت تعادل متوقف می‌شود، مبین شتابی است که به جرم اعمال شده است. بنابراین اندازه‌گیری شتاب پایدار، بوسیله اندازه‌گیری موقعیت میسر است.

سیستم جرم_فنر_دمپر یک سیستم درجه دوم است و برای آن یک ضریب دمپینگ و یک فرکانس رزونانس وجود دارد. برای اینکه رابطه بالا معتبر باشد، جرم می‌بایستی در حالت پایدار خودش قرار گیرد. بنابراین شتاب سنج ها تا حد کمی میبایستی تحت شرایط زیر میرا باشند تا به جرم اجازه داده شود به موقعیت شرایط پایدار جدیدی که بوسیله تغییرات شتاب دیکته خواهد شد برود.

ضریب دمپینگ $\xi = 0.7 \pm 0.1$ معمول است.

مشخصه دیگر یک سیستم درجه دوم فرکانس رزونانس آن ω_n است. با استفاده از تبدیل لاپلاس برای سیستم جرم_فنر_دمپر و مقایسه آن با تابع تبدیل زیر میرای درجه دوم و پس از کمی محاسبه می‌توان نشان داد که

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

پس اگر از یک سیستم درجه دوم بالاتر از فرکانس روزنانس آن استفاده کنید، هیچ پاسخی به شما نخواهد داد. همچنانکه فرکانس نیروی اعمال شده (شتابی که شما قصد اندازه‌گیری آنرا دارید) به فرکانس روزنانس نزدیک می‌شود، پاسخ نوسانی تر می گردد. فقط در فرکانسهای خیلی کمتر از فرکانس روزنانس است که سیستم واقعاً از ورودی تبعیت می‌کند. یک قانون سرانگشتی خوب می‌گوید

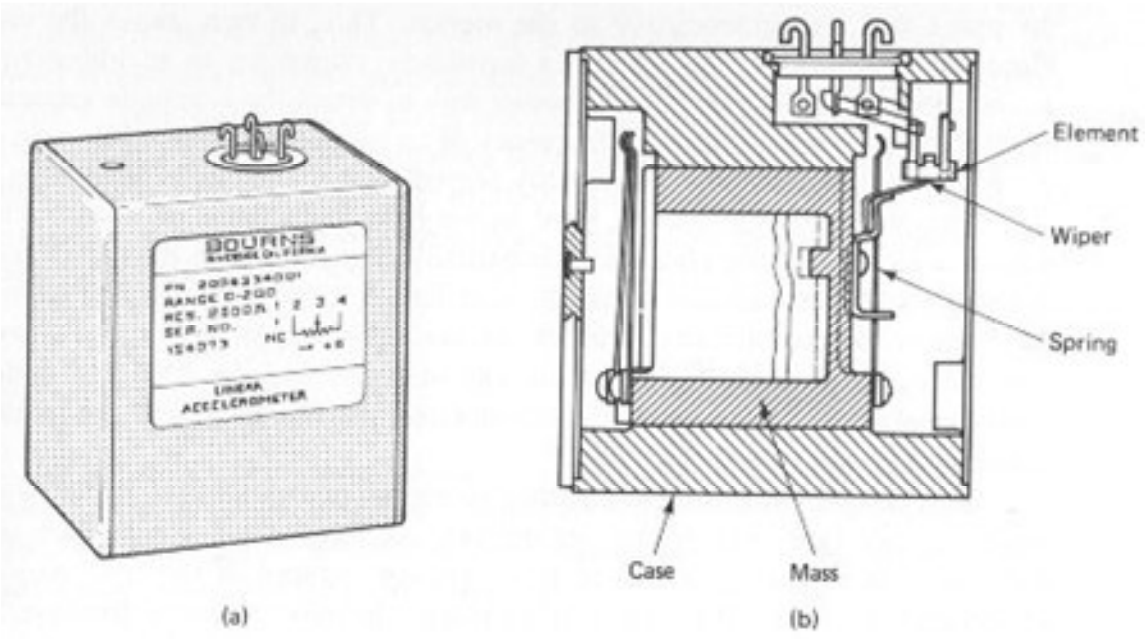
$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$$

$$f = \frac{f_n}{2.5}$$

همانگونه که در رابطه قبلی نشان داده شد. $a = \frac{k}{m}x$ بنابراین سیستم جرم، فنر و دمپر اندازه‌گیری شتاب را به اندازه‌گیری جابجائی جرم تبدیل می‌کند.

در بخش قبل مشاهده شد که راههای متعددی برای اندازه‌گیری موقعیت موجود است. پنج تکنیک برای اندازه‌گیری شتاب مورد استفاده فراوان‌تری دارد، این پنج روش عبارتند از: استفاده از پتانسیومتر، استرین گیج، رلوکتانس متغیر (هم اندوکتانس متغیر و هم LVDT)، ظرفیت خازنی متغیر، و کریستالهای پیزو الکتریک.

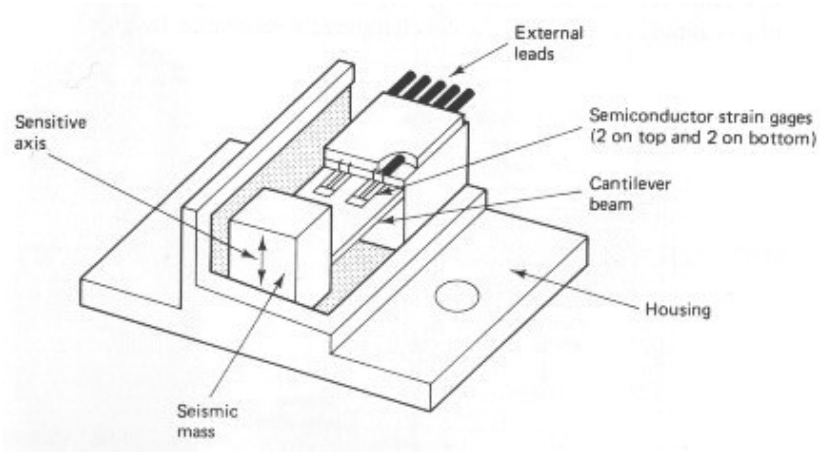
یک شتاب‌سنج که از پتانسیومتر برای فهم جابجائی جرم استفاده می‌کند، در شکل زیر نشان داده شده است.



شتاب سنج با استفاده از پتانسیومتر

شتاب سنج‌های پتانسیومتری دارای مزایای تولید خروجی بزرگ و سادگی کار می‌باشند و تقریباً ارزان هستند. با وجود این، چون احتیاج به جرم بزرگی برای غلبه بر اینرسی و اصطکاک پتانسیومتر دارند، فرکانس رزونانس آنها کمتر از ۶۰ هرتز است. بخاطر داشته باشید که این موضوع بدین معنی است که فرکانس کار آنها خیلی کمتر از این مقدار بایستی باشد. بنابراین از اینگونه شتاب سنج‌ها وقتی می خواهیم شتاب‌های حالت پایدار یا با تغییرات کم را اندازه بگیریم، استفاده می‌کنیم.

شتاب‌سنج‌های استرین گیج که پیزورزیستیو هم نامیده می‌شوند، از یک جرم متصل شده به یک تیغه استفاده میکنند. شتاب جرم باعث اعمال تنش به تیغه شده که آن هم بوسیله استرین گیج متصل شده به تیغه اندازه‌گیری می‌شود. شتاب‌سنج استرین گیج در شکل زیر نشان داده شده است.



شتاب سنج استرین گیج

استرین گیج‌های نیمه هادی نیز بدلیل حساسیت بالایشان استفاده می‌شوند (فاکتور گیج).

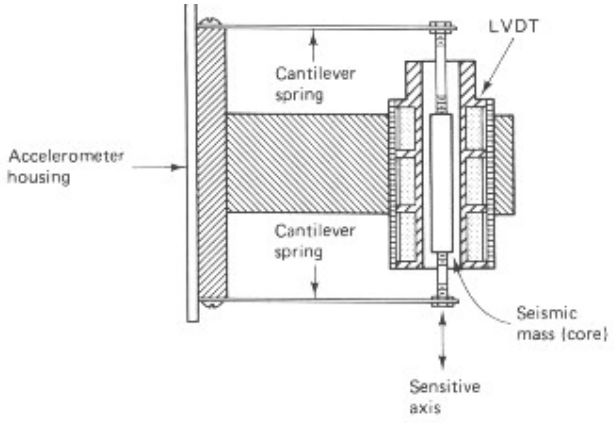
در حقیقت ترکیب بندی مشابهی با استفاده از تکنیک ساخت IC یکپارچه روی ویفر سیلیکان مستقیماً نصب می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که قطعات بسیار کوچک، سبک و قابل اعتماد باشند.

ظرفیت خازنی با فاصله بین صفحات تشکیل دهنده خازن نسبت عکس دارد. در شتاب سنج‌های خازنی نیروهای شتاب، باعث می‌شوند صفحات خازنی عمود بر جهت حرکت، به هم نزدیک شوند. این موضوع به نوبه خود، باعث افزایش ظرفیت خازنی می‌شود. اگر این خازن در یک پل قرار گرفته باشد، خروجی پل نامتعادل شده و دامنه خروجی متناسب با شتاب خواهد شد. راه دیگر آشکارسازی تغییر ظرفیت، استفاده از خازن برای کنترل فرکانس یک اسیلاتور یا یک زمان سنج می‌باشد. برای بیشتر اسیلاتورها زمان تناوب مستقیماً با اندازه خازن متناسب است.

برای تغییر اندوکتانس یک سیم پیچ، اصل مشابهی را می‌توان مورد استفاده قرار دارد. جرم می‌تواند یک هسته با مقاومت مغناطیسی کم باشد که قسمتی از آن داخل سیم پیچ یک سلف قرار گرفته است. شتاب در جهت مخالف باعث خارج شدن هسته از داخل سیم پیچ و پائین آمدن اندوکتانس می‌شود. معمولاً برای تبدیل تغییرات اندوکتانس به سیگنال الکتریکی، پل ac مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر چند ممکن است به عنوان قسمتی از مدار، در اسیلاتور شتاب سنج ساخته شود.

روش دوم برای اندازه‌گیری شتاب به کمک یک سلف، جایگزین نمودن هسته با یک مغناطیس دائم است. مادامیکه شتاب ثابت است، مغناطیس متوقف بوده و هیچ ولتاژی در سیم پیچ القاء نمی‌شود. هر گونه تغییری در شتاب، باعث حرکت جرم به موقعیت جدید می‌شود. حرکت مغناطیس، باعث القاء ولتاژ در سیم پیچ می‌شود. بنابراین خروجی، ولتاژی است که مستقیماً با سرعت حرکت مغناطیس و بنابراین سرعت تغییرات شتاب متناسب است. هر چند فرکانس روزنانس کمتر از 100 Hz است، این نوع ترانسدیوسر غالباً فقط برای آزمایش لرزه نگاری استفاده می گردد.

نوع آخر شتاب سنج القائی، از یک جرم به عنوان هسته یک LVDT استفاده نموده، این موضوع در شکل زیر نشان داده شده است. هسته بوسیله دو فنر نگهدارنده بصورت معلق در داخل دو ثانویه سیم‌پیچ قرار گرفته است. شتاب در جهت محور حساس، باعث حرکت هسته به محل جدیدی می‌شود که به نوبه خود مقدار ولتاژ ac بیشتری به یکی از سیم پیچها نسبت به سیم پیچ دوم القاء می کند و موجب تولید خروجیac متناسب با جابجایی هسته و در نتیجه شتاب می شود.



شتاب سنج با استفاده از LVDT

دامنه ac متناسب با جابجایی هسته و در نتیجه شتاب می باشد. فرکانس روزنانس این وسیله معمولاً کمتر از 80 Hz است. میبایستی مشابه سایر LVDT ها، اولیه LVDT را تغذیه نموده و خروجی ثانویه را آشکار سازی نمود. فرکانس تحریک یا همان تغذیه بایستی حداقل ۱۰ برابر بزرگتر از فرکانس روزنانس شتاب سنج باشد.

شاید معمول‌ترین نوع شتاب‌سنج نوعی است که از کریستال پیزو الکتریک برای تبدیل شتاب به یک خروجی الکتریکی استفاده می‌کند. در مدت تولید کریستال کوارتز، پتانسیل dc بزرگی در دو سر محور کریستال قرار می‌گیرد. این عمل می‌بایست وقتی انجام شود که کریستال هنوز گرم است. این میدان پلاریزه کننده باعث می‌شود که کریستال در جهت اعمال میدان الکتریکی به طور دائمی ضخیم‌تر گردد. پس از آن، اگر کریستال را در جهت محور پلاریزه شده بفشریم، باری متناسب با فشار وارد آمده، ما بین الکترودهایی که برای پلاریزه کردن استفاده شده‌اند، بدست می‌آید. این بار مساویست با $q=DF$ که در آن

q = بار القا شده ، F =نیروی وارد شده و D= ضریب کشش پیزو الکتریک

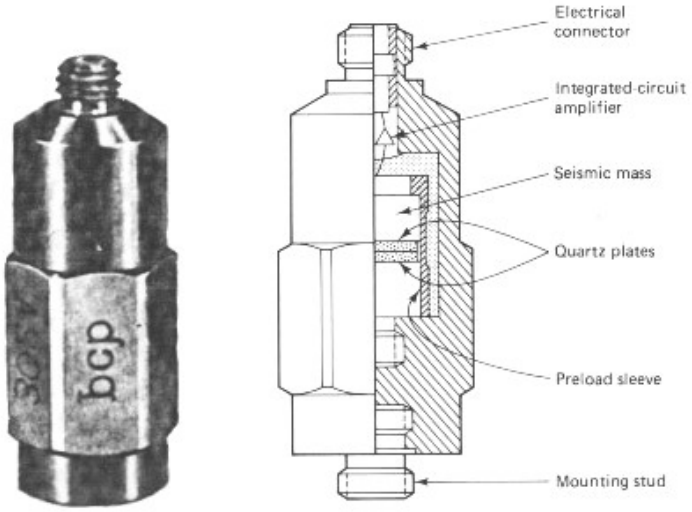
قرار دادن دو الکترود روی سطوح موازی یک عایق، تولید ظرفیت خازنی می‌کند. بنابراین کریستالهای پیزو الکتریک از خود مشخصه خازنی نشان می دهند. بار غیر متعادل در یک خازن از پتانسیل الکتریکی نتیجه می شود (یا آن را نتیجه می دهد):

$$e = \frac{q}{C}$$

بنابراین:

$$e = \frac{DF}{C}$$

یک شتاب سنج پیزو الکتریک در شکل زیر نشان داده شده است. کریستال از قبل بارگذاری شده، به نحوی که شتاب در یک جهت باعث افزایش نیرو بر کریستال و افزایش خروجی می‌شود. شتاب در جهت مخالف باعث کاهش بارگذاری قبلی بر روی کریستال شده، نیروی وارده بر کریستال کاهش یافته و ولتاژ خروجی پائین می‌آید.



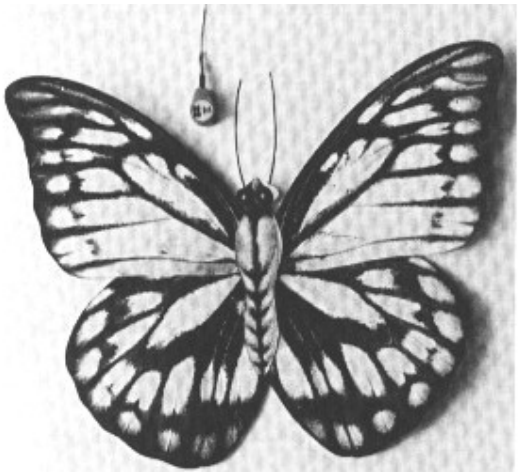
شتان سنج Piezoelectric

شتاب‌سنج‌های پیزو الکتریک در مقایسه با سایر ترانسدیوسرهایی که تا به حال مشاهده کردید، سه مزیت عمده دارند.

درجه حرارت کار پیزو الکتریک می‌تواند تا درجه حرارتی که عمل پلاریزه شدن در آن واقع شده، بالا برود. تا کنون، حد بالای $800^{o}C$ نیز فراهم شده است.

دوم اینکه بدلیل سادگی در ساختمان مکانیکی، می توان این شتاب سنج ها را در ابعاد بسیار کوچک تولید کرد. این اندازه کوچک باعث بهبود سرعت پاسخ ترانسدویسر و کاهش اثر شتاب سنج بر سیستم می شود. یک شتاب سنج پیزو الکتریک خیلی ریز در شکل زیر نشان داده شده است.

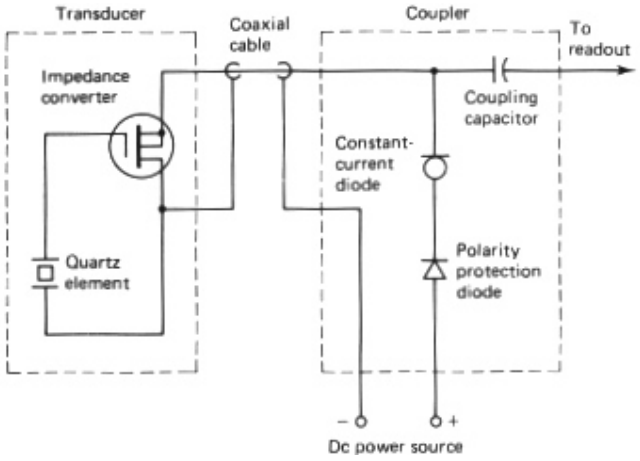
شاید بهترین مزیت شتاب سنج‌های پیزو الکتریک رنج فرکانس کاری مفید آنها است (بر خلاف فرکانس رزونانس). پاسخ یکنواخت از یک فرکانس قطع پائین چند هرتز تا فرکانس حد بالای 10 kHz برقرار است.



شتاب سنج مینیاتوری piezoelectric

تنظیم و هماهنگ کردن این مزایا، دو مشکل عمده هم بوجود می آورد. ولتاژ خروجی تابع حساسی از کل ظرفیت خازنی در طول کریستال است. با مراجعه به رابطه فوق، می بینیم که هر افزایش در ظرفیت خازنی در طول کریستال باعث کاهش ولتاژ خروجی خواهد شد. برای پیچیده‌تر کردن بیشتر موضوع، امپدانس خروجی کریستال خیلی بالاست. این امر موجب می شود شتاب سنج پیزو الکتریک به بار مقاومتی و خازنی بسیار حساس گردد. اتصالات، کابل کواکسیال و مدار الکتریکی وضعیت دهنده سیگنال، همگی باعث اضافه شدن خازن در دوسر کریستال می‌شوند. حتی اگر سیستم نیز کالیبره شود، باز هر تغییری در طول کابل، تقویت کننده و یا حتی رطوبت، باعث تغییر عمده‌ای در پاسخ می‌شود. سعی به شارژ و دشارژ این خازن از طریق امپدانس بالای کریستال نیز باعث کاهش سرعت پاسخ آن می‌شود.

راه حل این مسئله، یک تقویت کننده بار (مبدل امپدانس) داخل خود ترانسدیوسر است. این مطلب در شکل زیر نشان داده شده است.



شمای شتاب سنج piezoelectric با یک تقویت کننده مجتمع(Piezotron System).

ترانزیستور MOS تولید بار معلوم و ثابت خازنی در دوسر کریستال می‌نماید و در حقیقت هیچ بار مقاومتی هم موجود نمی‌باشد. همچنین ولتاژ خروجی خود را از یک منبع با امپدانس کم تغذیه می‌کند و در نتیجه عملاً کابل و الکترونیک را از کریستال ایزوله می‌نماید.

ترانسدیوسرهای مایعات Fluid Transducers

مایعات بسته به پارامترهای که اندازه می‌گیرند به سه گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: فشار ، سطح و جریان. فرآیندهای تولیدی که در ارتباط با مایعات هستند بایستی قادر به اندازه‌گیری یک و یا چند مورد از پارامترهای فوق باشند. در عملیات صنعتی مربوط به تولید غذا، دارو و تولیدات شیمیائی، و در تمام خطوط مربوط به تولید نفت ، اعم از کشف، حفاری، پمپاژ و جابجائی، تصفیه و فروش آن می توان ترانسدیوسرهای مایعات را دید.

نظارت و کنترل تمام انواع موتورهای با سوخت فسیلی، نیاز به ترانسدیوسرهای مایعات دارد.

سیستم‌های هیدرولیکی (مانند روبات‌های صنعتی) که برای تولید اتوماتیک استفاده می‌شوند، نیاز به کنترل دقیق فشار، جریان و سطح دارند.

به طور کلی، ترانسدیوسرهای مایعات بطور وسیعی در تمام صنایع جهان استفاده می‌شوند.

ترانسدیوسرهای فشار

فشار بصورت نیروی اعمال شده از سوی یک مایع به یک سطح معین تعریف می‌شود. بنابراین بصورت نیرو در واحد سطح بیان می گردد.

معمولاً فشار در مقایسه با یک مبنا اندازه‌گیری می‌شود. به عنوان مثال، یک مبنا خلأ کامل است. در خلأ کامل، فشار صفر می باشد. بنابراین فشار اندازه‌گیری شده که مبنای آن خلأ است، معمولاً فشار مطلق Absolute Pressure نامیده می‌شود.

روش عمده دیگر تعریف فشار، فشار گیج است. فشار گیج از فشار محیط (هر مقداری که در لحظه اندازه‌گیری باشد) بعنوان مبنا استفاده می‌کند.

تمام اندازه‌گیری‌های فشار احتیاج به دو ورودی دارند، یکی برای اندازه‌گیری و دیگری برای مبنا.

در سنسورهای اندازه گیری فشار مطلق، معمولاً محفظه ورودی مبنا را خلأ نموده و آنرا مسدود می‌نمایند. در فشارسنج‌های گیج ورودی مبنا را باز می‌گذارند تا تحت فشار محیط واقع شود.

نوع سومی از فشارسنج ها اجازه می‌دهد تا ورودی مبنا را به هر فشار دومی (با انتخاب خود) متصل کنیم. چون تفاضل فشار بین دو نقطه از یک سیستم در تعداد زیادی از اندازه‌گیری‌های کنترل مهم است، ترانسدیوسرهای تفاضلی و یا دیفرانسیلی فشار نیز بطور وسیعی استفاده می‌شوند.

فشار در پائین یک مخزن مایع بستگی به ارتفاع مخزن و چگالی آن مایع دارد:

$$p = \rho g h$$

که در آن

ρ = چگالی مایع

g= ضریب تبدیل جرم به وزن ($980.655\ cm/s^2$)

این فشار معمولاً هد Head نامیده می‌شود.

فشار مساویست با نیرو در واحد سطح. در واحد متریک فشار $newtons/meter^2$ است که معمولاً پاسکال (Pa) نامیده می‌شود.

واحد انگلیسی فشار $lb/in.^2$ است. این فشار بصورت psia برای فشار مطلق و psig برای فشار گیج و یا psid برای فشار تفاضل مخفف شده است. برای تبدیل داریم:

$1\ psi = 6.8948 \times 10^3\ Pa$

ارتفاع یک مخزن جیوه یا آب که باعث بوجود آمدن فشار معینی می‌شود نیز به عنوان واحدی برای اندازه‌گیری فشار استفاده می‌گردد.

۱ اینچ جیوه $= 3.386 \times 10^3\ Pa$

$1\ mm\ Hg = 133.32\ Pa$

فشار هد تولید شده بوسیله یک میلی‌متر جیوه معمولاً تور torr نامیده می‌شود. این واحد بطور فزاینده‌ای برای اندازه‌گیری خلأ استفاده می‌گردد.

$1\ torr = 1\ mm\ Hg = 133.32\ Pa$

چون آب دارای غلظت خیلی کمتری از جیوه است، تولید فشار هد کمتری می‌کند:

۱ اینچ آب $(H_2O) = 2.491 \times 10^2\ Pa$

فشار استاندارد آتمسفر در سطح دریا تعریف می‌شود:

$1\ atm = 760\ mm\ Hg = 1.01325 \times 10^5\ Pa$

فشار بارومتریک، در هواشناسی استفاده می‌شود و با واحد بار یا میلی بار اندازه گیری می گردد:

$1\ bar = 1 \times 10^5\ Pa$

روابط فوق در جدول زیر خلاصه و درج شده‌اند.

ترانسدیوسرهای فشار نوعی از وسایل مکانیکی هستند که کشش آنها متناسب با فشار اعمال شده به آنها است. استرین گیج، LVDT، پتانسیومتر، اندوکتانس متغیر، و یا ظرفیت خازنی متغیر، این جابجائی را حس کرده و به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کنند.

دسته عمده ای از ترانسدیوسرهای فشار، از یک دیافراگم که در پاسخ به فشار تغییر شکل می‌دهد و یک یا چند استرین گیج برای اندازه‌گیری کشش استفاده می‌کنند. دیافراگم ممکن است از جنس استیل زنگ نزن یا از جنس سیلیکان باشد. همچنین ممکن است استرین گیج بصورت یک شبکه نواری شکل و یا از نوع نیمه هادی باشد.

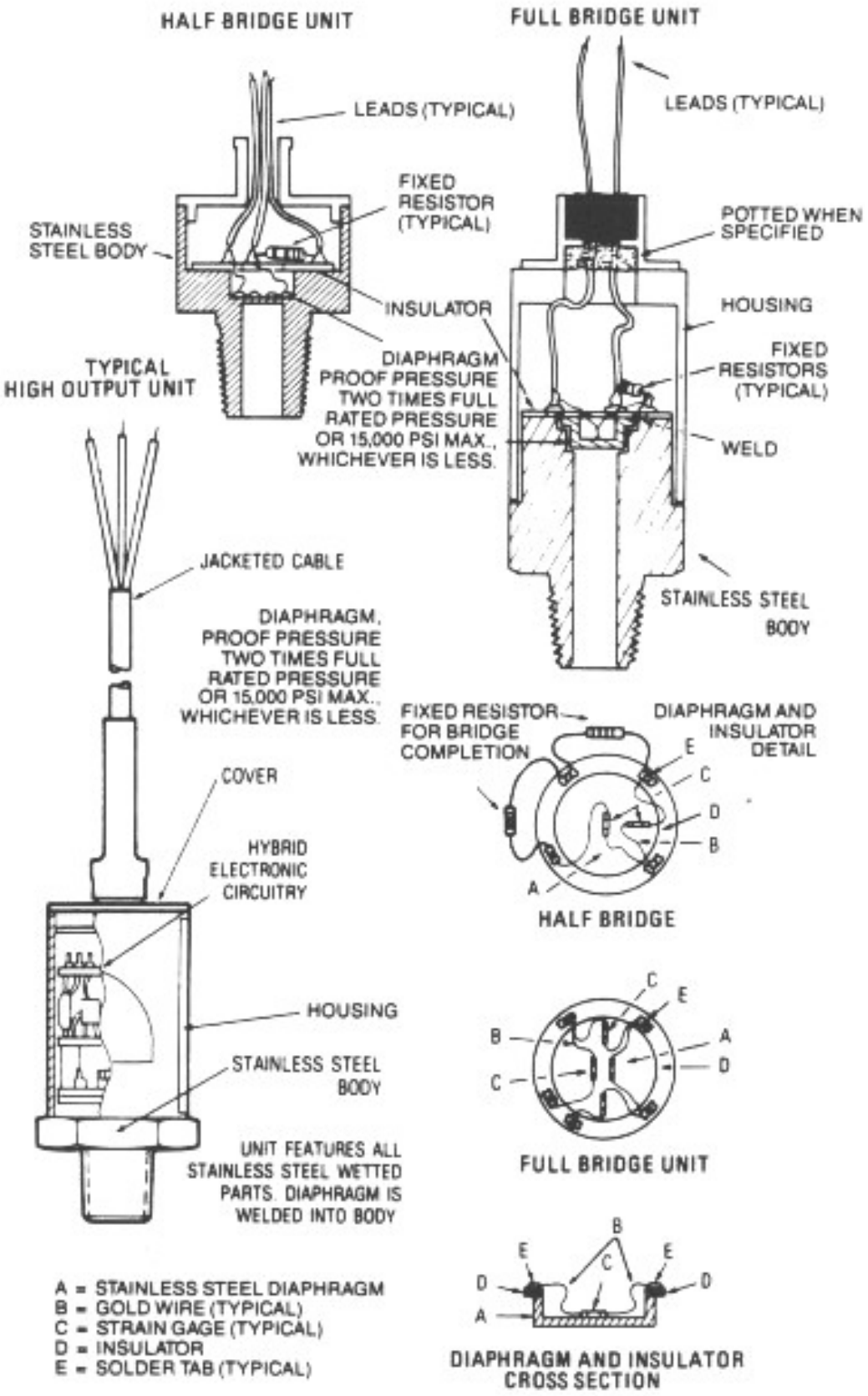
فشار اعمال شده به دیافراگم از طریق ورودی فشار تولید جابجائی کمی خواهد کرد که باعث کشش در استرین گیج می‌شود. استرین گیج تولید تغییرات مقاومت الکتریکی متناسب با فشار خواهد کرد. معمولاً از

چهار گیج و یا دو گیج و دو مقاومت ثابت برای تشکیل پل وتستون استفاده می‌شود. دیافراگم و استرین گیج مربوط به یک ترانسدیوسر فشار در شکل زیر نشان داده شده اند.

to obtain ↓ by ↘	multiply no. of → atm	bar	dyn/cm²	in. Hg (0°C)	in. H²O(4°C)	kg/m²	lb/in.² (psi)	lb/ft²	mm Hg (torr)	μm	newtons/meter²
atm		9.86923 × 10⁻¹	9.86923 × 10⁻⁷	3.34207 × 10⁻²	2.458 × 10⁻³	9.678 × 10⁻⁵	0.068046	4.7254 × 10⁻⁴	1.316 × 10⁻³	1.316 × 10⁻⁶	9.869 × 10⁻⁶
bar	1.01325		10⁻⁶	3.3864 × 10⁻²	2.491 × 10⁻³	9.8067 × 10⁻⁵	6.8948 × 10⁻²	4.788 × 10⁻⁴	1.333 × 10⁻³	1.333 × 10⁻⁶	× 10⁻⁵
dyn/cm²	1.01325 × 10⁶	10⁶		3.386 × 10⁴	2.491 × 10³	98.067	6.8948 × 10⁴	478.8	1.333 × 10³	1.333	10
in. Hg (0°C)	29.9213	29.53	2.953 × 10⁻⁵		7.355 × 10⁻²	2.896 × 10⁻³	2.036	0.014139	0.03937	3.937 × 10⁻⁵	2.953 × 10⁻⁴
in. H²O(4°C)	406.8	401.48	4.0148 × 10⁻⁴	13.60		3.937 × 10⁻²	27.68	0.1922	0.5354	5.354 × 10⁻⁴	4.014 × 10⁻³
kg/m²	1.033227 × 10⁴	1.0197 × 10⁴	1.0197 × 10⁻²	354.3	25.40		703.06	4.882	13.59	13.59 × 10⁻³	1.019 × 10⁻¹
lb/in.² (psi)	14.695595	14.504	1.4504 × 10⁻⁵	0.4912	3.6126 × 10⁻²	1.423 × 10⁻³		6.9444 × 10⁻³	1.934 × 10⁻²	1.934 × 10⁻⁵	1.450 × 10⁻⁴
lb/ft²	2116.22	2088.5	2.0885 × 10⁻³	70.726	5.202	0.2048	144.0		2.7844	2.7844 × 10⁻³	2.089 × 10⁻²
mm Hg (torr)	760	750.06	7.5006 × 10⁻⁴	25.400	1.868	7.3558 × 10⁻²	51.715	0.35913		10⁻³	7.502 × 10⁻³
μm	760 × 10³	750.06 × 10³	0.75006	2.54 × 10⁴	1.868 × 10³	73.558	51.715 × 10³	359.1	1 × 10³		7.502
newtons/meter²	1.01325 × 10⁵	1 × 10⁵	10⁻¹	3.386 × 10³	2.491 × 10²	9.8067	6.8948 × 10³	4.788 × 10¹	1.333 × 10²	1.333 × 10⁻¹	

Source: Kulite Semiconductor Products, Inc.

جدول - تبدیل فشار



دیافراگم های با ترانسدیوسر استرین گیج

مقاومت تفاضلی با اعمال ولتاژ ثابت به پل اندازه‌گیری می‌شود. جابجائی دیافراگم باعث ایجاد خروجی آنالوگ (میلی ولت) متناسب با فشار خواهد شد.

در مدارهای نیمه پل، از مقاومت‌های ثابت برای تکمیل پل و جبران سازی حرارتی، تنظیم صفر و دسترسی به رنج کامل ولتاژ خروجی استفاده می‌شود.

ولتاژهای خروجی متفاوتی را می‌توان از طریق تقویت کننده و یا سایر تنظیم کننده های سیگنال که در داخل و یا خارج از ترانسدیوسر قرار دارند، تولید کرد. همچنین می‌توان با استفاده از مدارهای داخلی، ولتاژهای متفاوتی برای تغذیه این ترانسدیوسرها بدست آورد.

علاوه بر قیمت کم و دقت خوب، ترانسدیوسرهای فشار (با استرین گیج نصب شده بر روی دیافراگم فولاد زنگ نزن) دارای پایداری حرارتی خوب بوده و می‌توان آنها را با مواد ضدخوردگی نیز پوشاند. گر چه، آنها دارای خروجی پائینی (در حدود $3\ mV/V$) هستند که تقویت کنندگی را پیچیده تر می‌کند.

مشخصه‌های گیج‌های نیمه هادی از نقطه نظرهای دقت کل و کارائی خیلی خوب است. آنها از یک ویفر سیلیکون خالص تهیه می‌شوند و فرآیند تولیدشان شامل مراحل اکسید شدن، تنظیم ویفر، خوراندن نوری و دیفیوژن است. سیم‌های طلا به خروجی‌های گیج لحیم می‌شوند و بعنوان اتصالهایی برای بدست آمدن بهترین هدایت و مقاومت ثابت استفاده می‌گردند.

مقادیر مقاومت ابتدائی در زمان تولید بصورت دقیقی اندازه‌گیری و کنترل می‌شوند. سپس مقاومت در ۷۰، ۳۰ و $۱۳۰\dot{F}$ اندازه‌گیری می‌شود. گیج‌ها به ترتیبی نصب می‌شوند که مشخصه حرارتی‌شان با تلرانس کمی نزدیک هم باشند. این مراحل کنترل شده برای تولید استرین گیجی با مشخصه همخوان با کاتالوگ، مهم است. استرین گیج‌ها (از نوع ورقه‌های فلزی یا نیمه‌هادی) بوسیله اپوکسی به یک دیافراگم فلزی دقیق متصل می‌شوند. ضخامت دیافراگم تعیین کننده رنج فشار ترانسدیوسر است. دیافراگم‌های تخت فولاد زنگ نزن (که برای تنش‌های کم طراحی شده‌اند) دارای جابجائی کمی هستند.

این باعث عمر بالا و خطی بودن عالی آنها می‌شود. دیافراگم یا قسمتی از ساخت یک قطعه سیستم است یا قسمتی از سرهم بندی قطعات که بوسیله جوشکاری به بدنه متصل می‌شود. بنابراین استرین گیج از محیط اندازه‌گیری و دیافراگم از کشش های بیرونی ایزوله می‌شود. در این صورت دیگر نیاز به وسایل دیگری برای حفاظت از استرین گیج و الکترونیک مربوطه‌شان از محیط اندازه‌گیری نیست.

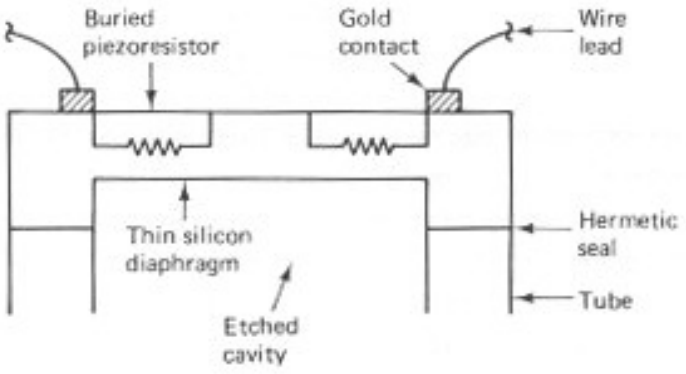
جنس دیافراگم و بدنه دارای تطابق ضریب حرارتی هستند. بنابراین کشش‌های حرارتی ناشی از تغییرات در درجه حرارت محیط، مینیمم می‌شود. راه حل دیگری به جای دیافراگم که بر روی آن یک نوع استرین گیج نصب شده، دیافراگم‌های پیزو رزیستیو (سیلیکان) می باشد. استرین گیج نیمه هادی بر روی دیافراگم سیلیکان تولید می‌شود، که این موضوع خود دارای مزایای متعددی است.

حساسیت زیاد، یا گیج فاکتور آنها، حدود ۱۰۰ برابر استرین گیج‌های سیمی است. پیزو رزیستیو مستقیماً داخل یک محیط تک کریستالی و یکنواخت ساخته می‌شود. بنابراین مقاومت تولید شده به این روش، در داخل عضو حساس به نیرو ساخته شده است. توجه داشته باشید که معمولاً انواع دیگر استرین گیج‌ها ، بر

روی قطعه حساس که ماده متفاوتی است، نصب می‌شوند. این خود باعث کشش‌های الاستیک حرارتی شده و ساخت را پیچیده می‌کند. بیشتر استرین گیج‌ها بدلیل ضعف چسب به مرور زمان، ناپایدار هستند. علاوه بر این حساسیت به درجه حرارت و پسماند نیز بدلیل کشش الاستیک حرارتی تولید می‌شود.

سیلیکان یک ماده ایده‌آل برای دریافت نیروی اعمال شده است. سیلیکان یک کریستال خوب بوده و بطور دائمی کشیده نمی‌شود. پس از اعمال تنش به آن، به شکل اولیه‌اش بازمی‌گردد. ویفر سیلیکان بهتر از دیافراگمهای فلزی برای حس فشار، عمل می‌کند، زیرا سیلیکان دارای الاستیسیته خوبی است و رنج کاری آن نیز وسیع است. دیافراگمهای سیلیکانی فقط به دلیل پاره شدن، از بین می روند.

المان حس کننده، شامل چهار مقاومت پیزو رزیستیو تقریباً مساویست که در سطح یک دیافراگم نازک دایره‌ای شکل دفن شده‌اند. اتصالات طلا از سطح دیافراگم سیلیکان، اتصال به مقاومت‌های پیزو را میسر می‌کنند و در نهایت نیز، اتصالات خارجی به آنها وصل می‌شوند و یا برای پوشاندن سر سیم ها به کار می روند. دیافراگم نازک بوسیله خوردگی شیمیائی یک سطح دایره‌ای شکل در جهت مخالف یا دیگر مقاومت‌های پیزو درست می‌شود. قسمت خورده نشده سیلیکان، اتصالات محکمی برای دیافراگم و نصب سایر قطعات تشکیل می‌دهد. شکل ۶۳ـ۳ نمایش سطح مقطع المان حساس با اتصالات فلزی مربوط به آن است. فشار باعث جابجائی دیافراگم نازک شده و یک کشش یا تنش در دیافراگم و مقاومت‌های دفن شده در آنها ایجاد می‌کند. مقاومت این استرین گیج‌ها متناسب با فشار اعمال شده یه دیافراگم تغییر می‌نماید. بنابراین، تغییر در فشار (ورودی مکانیکی) به تغییر در مقاومت (خروجی الکتریکی) تبدیل می‌گردد. المان حس کننده (ترانسدیوسر) انرژی را از یک نوع به نوع دیگر تبدیل می‌کند.

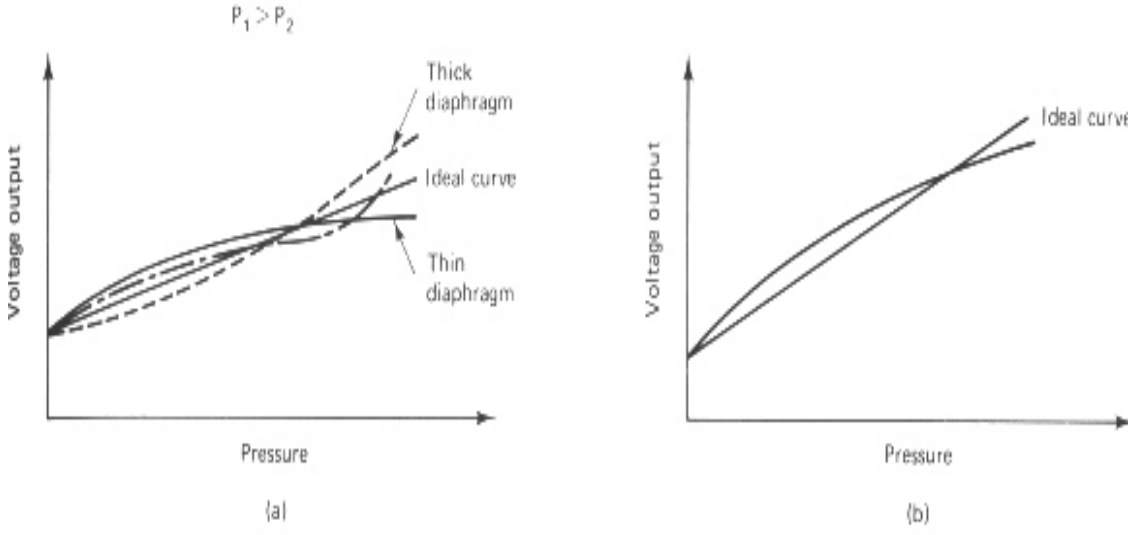


نمای برشی یک المان حسگر ترانسدیوسر فشار piezoresistive

مقاومت‌ها را می‌توان یا بصورت نیم پل و یا بصورت تمام پل وتستون به هم متصل نمود. تمام مقاومت‌های چهارگانه تقریبا به مقدار مساوی تغییر می‌کنند. توجه کنید که دو مقاومت افزایش و دو تای دیگر با توجه به جهت ساخت کریستالی سیلیکان، کاهش می یابند.

دیافراگم‌های با ضخامت متفاوت، وقتی تحت فشار P_1 که از P_2 بزرگتر است جابجا می شوند، تولید شکل منحنی‌های خروجی متفاوتی می نمایند. این موضوع در شکل زیر نشان داده شده است. اگر دیافراگم در

جهت مخالف ($P_1<P_2$) جابجا شود، یک منحنی غیرخطی، بدون توجه به ضخامت دیافراگم، تولید می‌کند.



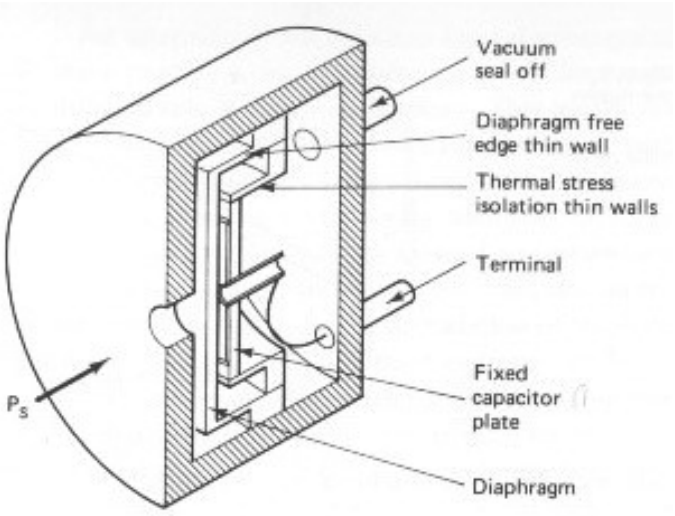
غیرخطی بودن دیافراگم سیلیکون (a)P1>P2 (b)P1<P2

فشار صفر ($P_1=P_2$) باعث تولید خروجی صفر نمی‌شود. حتی با نمایش عقربه به صفر نیز، ولتاژی در داخل واحد اندازه‌گیری مشاهده می‌شود. این مقدار، مقدار جابجائی صفر یا ولتاژ صفر نامیده می‌شود و تعیین کننده نقطه شروع منحنی پاسخ ترانسدیوسر است.

فشار را می‌توان به هر دو طرف المان حس کننده اعمال نمود. P_1 فشار سر پایانی است و فقط بایستی از گازهای تمیز و خشک مانند هوا در اندازه‌گیری‌های انجام شده در این طرف استفاده نمود. محدودیت کمی برای جهت P_2 وجود دارد. فقط اینکه محیط‌های غیرمتجانس با پلی استر، سیلیکان یا چسب‌های از نوع سیلیکان را نمی‌بایست استفاده نمود.

در وسایلی که به صورت مطلق اندازه گیری می کنند، P_2 توسط خلاء مسدود و جدا می‌شود تا مبنای ثابتی وجود داشته باشد. اختلاف فشار بین خلاء مبنا و P_1 اندازه‌گیری شده، باعث انحراف دیافراگم گردیده و موجب تغییر در ولتاژ خروجی می‌شود. وسایل تفاضلی و گیج، فشار را در مقایسه با فشار دیگر اندازه‌گیری می‌کنند. در وسایل تفاضلی، مقدار مورد اندازه‌گیری به P_2 متصل می‌شود.

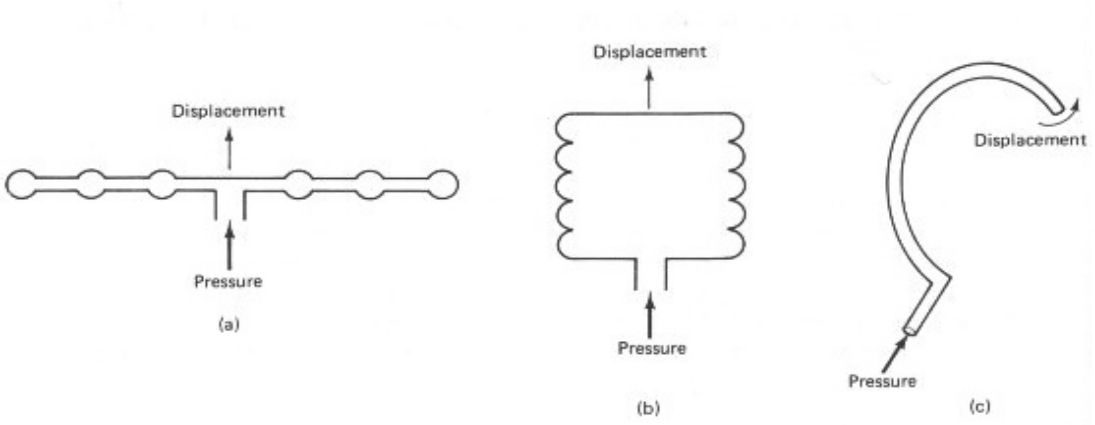
شما می‌توانید بجای احساس کشش در دیافراگم، چگونگی حرکت در پاسخ به فشار اعمال شده را حس کنید. چون این حرکت معمولاً نسبتی از میلی‌متر است، مبدل جابجائی به سیگنال الکتریکی باید خیلی حساس باشد. این امر با انتخاب یک صفحه از خازن به عنوان دیافراگم، ممکن است. یک ترانسدیوسر فشار مطلق در شکل زیر نشان داده شده است. البته مشابه سایر وسایل خازنی که تا به حال دیده اید، مدار تنظیم کننده سیگنال متعددی بایستی مورد استفاده قرار گیرد. این مدار معمولاً یک پل (با تقویت کننده الکترونیکی و یکسو کننده) و یا یک اسیلاتور RF (با مبدل فرکانس به ولتاژ) می‌باشد.

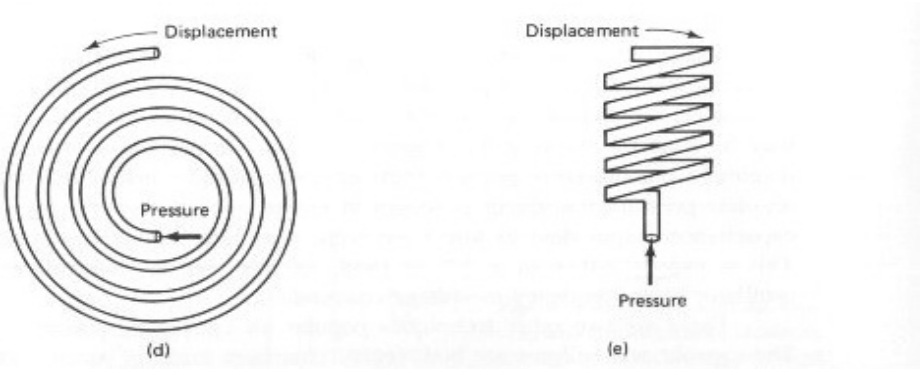


ترانسدیوسر فشار مطلق خازنی

دو تکنیک رایج دیگر نیز برای تبدیل فشار به جابجائی مورد استفاده قرار می‌گیرند. کپسول و دستگاه ریه مانند Bellows، هر دو محفظه‌های مسدود شده فلزی هستند. وقتی فشار داخل محفظه بر فشار خارج آن غلبه کند، محفظه بزرگ می‌شود. نوع کپسولی دارای یک حلقه یا پیچیدگی است در حالیکه نوع ریه مانند، دارای چندین حلقه یا پیچیدگی است. این موضوع در شکل زیر نشان داده شده است.

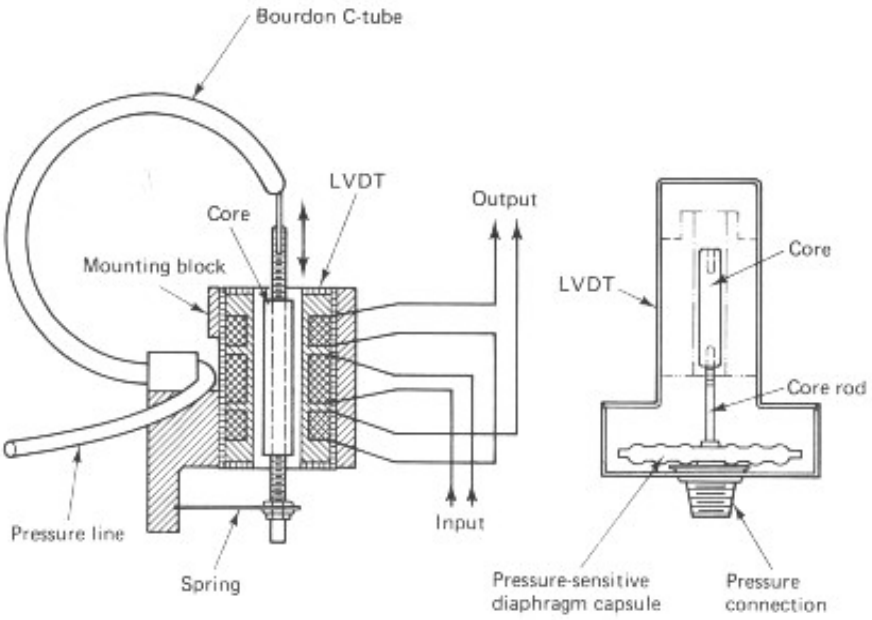
نوع آخر ترانسدیوسر فشار که بیشتر استفاده می شود، از یک لوله بردون Bourdon تشکیل شده است. لوله روی یک منحنی نرم تا ۱۸۰ درجه خم می شود. این موضوع، باعث بیشتر شدن سطح خارجی منحنی نسبت به سطح داخلی آن می شود.اعمال فشار به داخل لوله، باعث وارد آمدن نیروی بیشتری به سطح خارجی شده و باعث می گردد که لوله راست شود. مقدار این جابجایی متناسب با فشار است. برای بدست آوردن چرخش بجای حرکت خطی، لوله بردون را میتوان به صورت حلقه های متحدالمرکز و یا مارپیچ سیم پیچی نمود. هر چه تعداد دورها بیشتر باشد، میزان جابجایی به ازای اعمال یک فشار ثابت بیشتر خواهد بود. به شکل زیر توجه نمایید.





ترانسدیوسرهای فشار به جابجایی (a) کپسول(b) بادی (c)تیوب بردن ساده(d) مارپیچی (e) حلزوتی

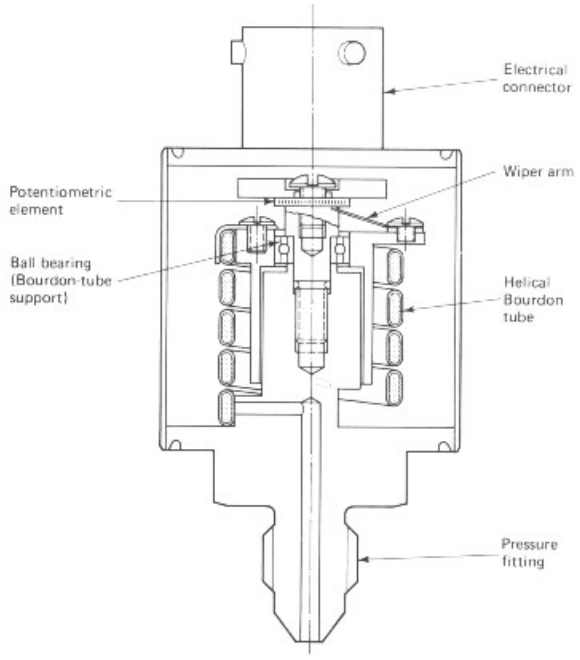
لوله بردون فشار را به جابجایی تبدیل می کند. معمولاً این جابجایی بوسیله یک عقربه و یک صفحه مدرج که به لوله بردون متصل است، نمایش داده می شود.برای تولید خروجی الکتریکی ، بایستی اجازه دهید که لوله بردون یک ترانسدیوسر موقعیت را درایو کند. نوع لوله حلقه شده و نوع کپسول متصل شده به هسته یک LVDT در شکل ۶۷-۳ نشان داده شده اند.



ترانسدیوسر فشار حسگر LVDT با(a) یک تیوب بردن و (b) یک کپسول

ترانسدیوسر های فشار با خروجی بالا، قادرند قسمت متحرک یک پتانسیومتر را بچرخانند. با اتصال قسمت متحرک پتانسیومتر به لوله بردون از نوع حلزونی، محدوده کافی برای به حرکت در آوردن جاروبک از کمترین به بیشترین مقدار بدست می آید (شکل زیر).

چندین مشخصه معمولی برای ترانسدیوسرهای فشار و بدون وابستگی به آنکه چگونه فشار حس و یا به سیگنال الکتریکی تبدیل می شود، موجود است. درآنالیز نهایی، آنچه شما با آن سروکار دارید، مقادیر هستند. این مقادیر عبارت اند از تنظیم صفر اولیه ،اثرات حرارتی بر روی صفر و اثرات حساسیت حرارتی و همچنین غیر خطی بودن ، تکرار پذیری ،پسماند و غیره که در مثال زیر نشان داده شده اند.



ترانسدیوسر فشار حسگر پتانسیومتر با یک تیوب بردن helical

مثال – یک ترانسدیوسر فشار مشخصات زیر را دارد:

فشار ورودی : 0_100 psi، رنج کامل خروجی : 100mV، دقت صفر : ± 1 mV،

دقت : $\pm 1\%$ FS، تنظیم صفر : 0.02% FS/°F (تنظیم صفر در 75°F)

اثر حساسیت حرارتی : 0.02% FS/°F (تفاوت از 75°F)، با فرض اینکه ترانسدیوسر در 95°F کار می کند، خطای مطرح شده توسط دقت ها، اثر حرارتی صفر، و اثر حرارتی حساسیت را حساب کنید.

حل_ دقت، خطایی را ایجاد می کند که ممکن است به بزرگی

$$\text{error} = \pm\ 0.01\% \times 100 \text{ psi} = \pm 1 \text{ psi}$$

باشد. دقت صفر ± 1 mV یا ± 1 psi است. ترانسدیوسر در کارخانه برای خروجی صفر با 0 psi در 75°F تنظیم شده است.

با استفاده از آن در 95°F در صفر و رنج کامل جابجایی خواهیم داشت.

$$\text{error} = \pm 0.0002/°\text{F} \times 100 \text{ psi} \times (95°\text{F} - 75°\text{F})$$
$$= \pm 0.4 \text{ psi}$$

با توجه به هر سه اثر با هم، ممکن است وقتی هیچ فشاری اعمال نشده، تا ± 1.4 psi یا ± 1.4mV در خروجی بخوانید(دقت صفر + تنظیم صفر). در هر نقطه دیگر، خطا ممکن است تا ± 1.4 psi یا ± 1.4mV شود (دقت + حساسیت حرارتی)

ترانسدیوسرهای جریان Flow transducers

جریان به شما می‌گوید که ماده با چه سرعتی حرکت می‌کند. جریان را به سه صورت تعریف می‌کنند. جریان حجمی، جریان جرمی و سرعت جریان. جریان حجمی (Q) نشان می‌دهد که چه حجمی از یک مایع متحرک در واحد زمان از یک نقطه رد شده است. واحد آن m^3/s و یا gal/min است. جریان جرمی (Q_m) به صورت واحد جرم بر واحد زمان است (kg/s). سرعت مواد معمولاً سرعت جریان (Q_v) خوانده شده و بصورت m/s نشان داده می‌شود. این سه کمیت بوسیله معادلات زیر در رابطه با هم هستند:

$Q =$ جریان حجمی

$Q_m =$ جریان جرمی $= \rho Q$

$Q_v =$ سرعت جریان $= \dfrac{Q}{A}$

که در آن ρ چگالی مایع و A سطح مقطع لوله است.

جریان را همچنین می‌توان بصورتهای لایه‌ای و مغشوش نیز شرح داد. در جریان لایه‌ای مایع بصورت موازی با سطح دیواره‌ء لوله حرکت می‌کند و بصورت یکنواخت و در یک جهت یکنواخت جابجا می شود. در جریان مغشوش، مایع دائماً به هم می‌خورد. در یک نقطه معین یا در یک لحظه از زمان، سرعت جریان ممکن به مقدار زیادی تغییر کند. انتخاب ترانسدیوسر بستگی به نوع جریان لایه‌ای و مغشوش دارد. خود ترانسدیوسر نیز ممکن است تا حدی موجب ایجاد اغتشاش در ماده شود. به لحاظ عددی، درجه اغتشاش بوسیله عدد رینولد داده می‌شود.

$$N = \frac{Q_v d \rho}{\mu}$$

که در آن N عدد رینولد ، Q_v سرعت جریان ، d قطر لوله ، ρ چگالی و μ ویسکوزیته مایع می باشد.

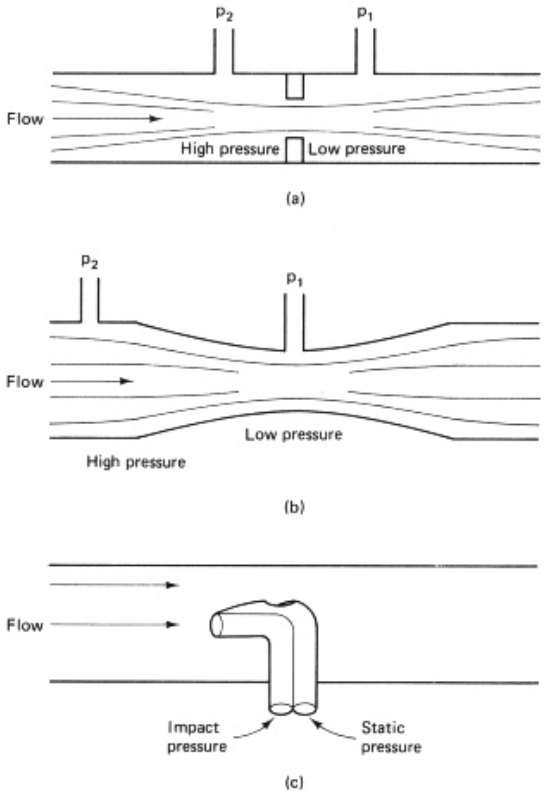
برای $N > 4000$ جریان مغشوش و برای $N < 2000$ جریان لایه‌ایست. نوع ماده که جریان آن سنجیده می‌شود بشدت بر انتخاب نوع ترانسدیوسر مؤثر است. چگالی ممکن است از شکل پودری و یا انواع دیگر جامدات متحرک در طول یک نوار نقاله، تا یک جابجائی خالص و خشک یک گاز خنثی وجود داشته باشد، ممکن است از یک ماده باشند یا اجسام خارجی بزرگی در آنها موجود باشد، ممکن است دارای ایزولاسیون الکتریکی خوبی بوده و یا هادی باشند. ممکن است خاصیت بازی، اسیدی و یا خنثی داشته باشند.

این تنوع خواص مواد باعث تعدد انواع ترانسدیوسرهای جریان است. در حالت عمومی، ترانسدیوسرهای جریان به دو گروه تقسیم می‌شوند. در یک، گروه یک مانع در مسیر جریان قرار داده شده و از انرژی جریان برای تولید یک اثر قابل اندازه‌گیری استفاده می‌کنند، (توربین، چرخهای پرپره‌ای، لوله‌های کج و شناور) و گروه دوم ترانسدیوسرهای بدون مانع، از تکنیکهای الکترومغناطیسی و مافوق صوت استفاده می‌کنند.

گذاشتن یک مانع در مسیر جریان باعث دو اثر می‌شود. باعث می‌شود که فشار در دهانه مانع افت کند. فشار طرف بالا دست بالا می‌رود در حالی که فشار در پایین‌دست افت می‌کند. دوم اینکه، جریان کاهش می‌یابد. این اثر، مشابه آنست که یک مقاومت را به صورت سری در یک مدار قرار دهیم. جریان باعث افت ولتاژ (افت فشار) در دو سر مقاومت (مانع) شده و جریان کل در مدار پایین می‌آید.

دیافراگم صفحه سوراخ‌دار **Orifice** ساده‌ترین نوع فشار سنج های دیفرانسیلی با مانع است.

یک دیافراگم صفحه با یک سوراخ در مرکز آن، در مسیر جریان یک خط قرار داده می‌شود. افت فشار در دو طرف صفحه بوسیله ترانسدیوسر فشار تفاضلی اندازه‌گیری می‌شود. این نوع در شکل زیر نشان داده شده است.



سنسورهای جریان با موانع فشار تفاضلی (a) صفحه سوراخ دار (b) venturi (c) تیوب Pitot

معادله برنولی، از اصلی‌ترین معادلات در مکانیک مایعات است. این معادله رابطه بین انرژی جنبشی و پتانسیل در هر دو نقطه از یک جریان مایع غیرقابل تراکم را بدست می‌دهد. با استفاده از این اصل رابطه بین جریان و افت فشار در دو طرف یک سطح سوراخ دار بصورت زیر است

$$Q = k\sqrt{p_2 - p_1}$$

که در آن

$Q =$ جریان

$k =$ ثابتی که بوسیله ابعاد مانع سوراخدار و واحد

اندازه‌گیری تعین می‌شود

Q_2 = فشار طرف فشار زیاد

P_1 = فشار در طرف فشار کم

توجه کنید که جریان متناسب با ریشه دوم افت فشار است، بنابراین شما بایستی خروجی ترانسدیوسر فشار را از طریق یک مدار الکترونیکی که معمولاً مدول آشکار کننده ریشه است، برای تولید یک سیگنال که متناسب و بطور خطی با فشار تغییر می‌کند، آشکار سازی کنید.

صفحه مانع سوراخدار دارای مزایای متعددی است. من جمله طراحی و ساخت و نصب آن آسان است. این سادگی باعث کم شدن نیاز به نگهداری و تعمیر نیز می‌شود. از این نوع ترانسدیوسر می‌توان برای اغلب مایعات که ذرات اضافی ندارند، استفاده نمود. با وجود این، چندین عیب هم برای آن موجود است. خروجی $(\Delta\rho)$ غیرخطی است. توجه داشته باشید که شما نیاز به آشکارسازی ریشه دوم آن دارید. هر چه خروجی بزرگتری نیاز داشته باشید، افت فشار بیشتری نیز بایستی تولید نمایید. این بطور فزاینده‌ای سیستم را بارگذاری می‌کند و سرعت جریانی را که می‌خواهید اندازه بگیرید، پایین می‌آورد. بدلیل وجود مانع ناگهانی، صفحه سوراخدار معمولاً گیر می‌کند.

روش ونچوری **Venturi** درشکل فوق نشان داده شده. بجای وجود سد ناگهانی در مسیر جریان، قطر لوله کم کم کاهش و سپس افزایش داده شده است. روابط بین جریان و اختلاف فشار، مشابه صفحه سوراخداراست. گر چه، چون مانع ناگهانی وجود ندارد، لوله کمتر گیر خواهد کرد. همچنین فشار در لوله خروجی خیلی نزدیک به فشار ورودی (P_2) است. بنابراین خطای اندازه‌گیری جریان در اثر بارگذاری فشار در حالت ونچوری کمتر از صفحه سوراخدار یا اوریفیس است. به ساختمان فیزیکی صفحه سوراخدار و ونچوری در شکل فوق توجه نمایید.

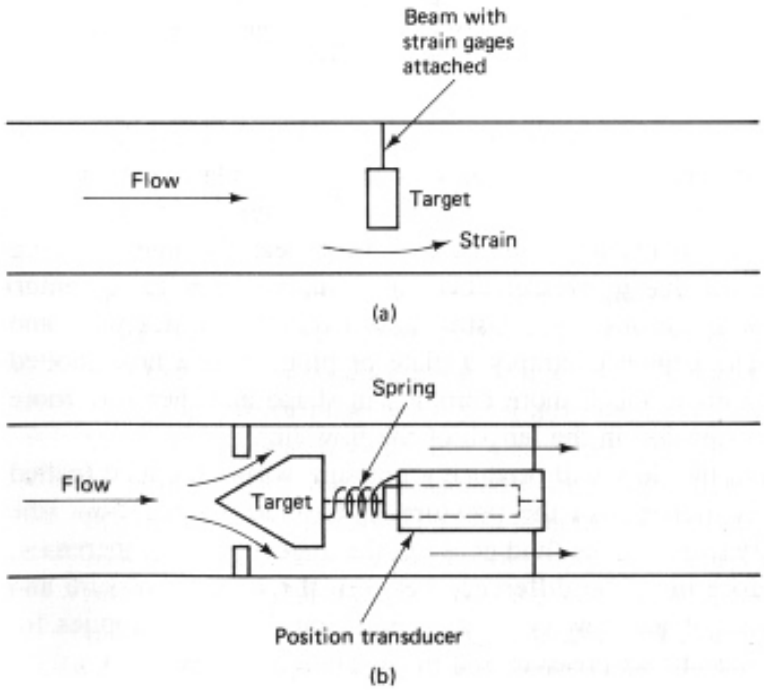
صفحه سوراخدار معمولاً یک صفحه است با یک سوراخ که در بین فلانچهای لوله‌ها نصب شده، ونچوری یک شکل پیچیده‌تر است و بنابراین گرانتر بوده و احتیاج به یک فاصله اضافی در طول خط جریان دارد.

قرار دادن یک لوله در داخل یک جریان، تولید فشار در این لوله می‌کند که (فشار برخورد نامیده می‌شود) این فشار خیلی بیشتر از فشار جریان جانبی است (فشار استاتیک). همچنانکه سرعت (جریان) یک مایع بالا می‌رود، فشار برخورد افزایش می‌یابد، هر چند فشار استانیک اینگونه نیست. اختلاف بین فشار برخورد و فشار استاتیک برای لوله پیتوت **Pitot** نیز برقرار است که درآن p_2 فشار برخورد و p_1 فشار استاتیک است.

لوله پیتوت برای اندازه‌گیری جریان گاز بخوبی کار می‌کند. در حقیقت به مدت خیلی طولانی بعنوان سنسور در بعضی هواپیماها برای نمایش سرعت هوا استفاده می شده است. همچنین در کاربردهای پزشکی برای اندازه‌گیری فشار خون استفاده می‌گردد. گر چه ، در محیط‌های صنعتی اگر مایع ذراتی داشته باشد، ممکن است یا گیر کند و یا خورده شود.

مایعاتی که از داخل لوله‌ها حرکت می‌کنند، به هر مانعی که با آن برخورد نمایند نیرویی وارد می‌کنند. این نیرو متناسب با جریان مایع است. می‌توانید این نیرو را اندازه‌گیری کنید تا اندازه‌ای از جریان بدست آید.

این اصل در هر دو سیستم اندازه‌گیری جریان با بازوی مزاحم و روتامتر بکار می‌رود. اندازه‌گیر جریان با بازوی مزاحم در شکل زیر نمایش داده شده است. جریان مایع



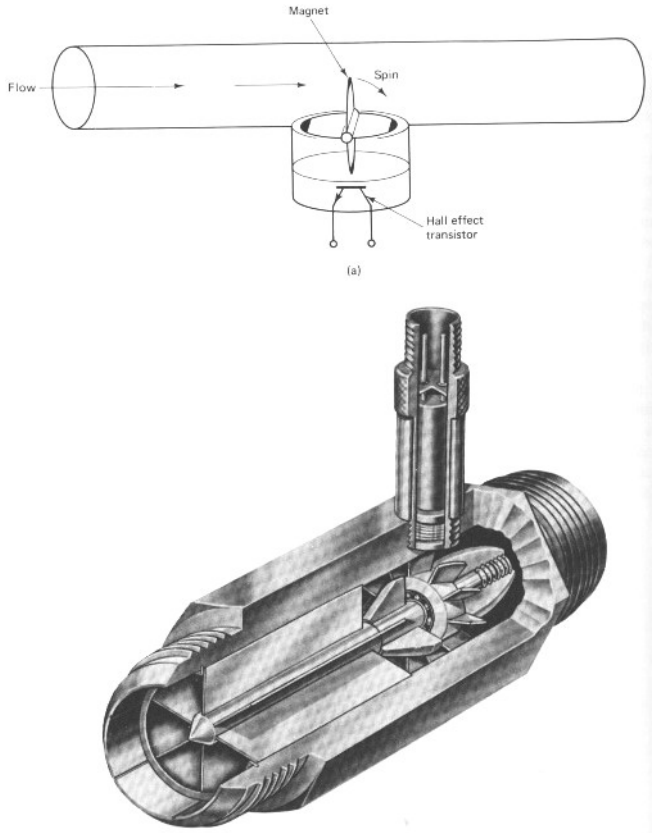
ترانسدیوسرهای جریان انکساری (a) شعاع پایه (b) rotameter ناحیه-متغیر

باعث می‌شود که نیرو به هدف وارد آمده و انحراف را باعث می‌شود. این انحراف کوچک بوسیله استرین گیج‌های نصب شده بر روی بازو حس شده و می‌توان آنرا بصورت معمول الکترونیکی اندازه‌گیری کرده و نمایش داد. برای جبران سازی، تغییرات در هر دو جهت را می‌توان احساس کرد. جهت جریان با پلاریته ولتاژ خروجی تعیین می‌شود. (قابلیت اندازه‌گیری جریان در هر دو جهت در داخل ترانسدیوسرهای جریان مایع غیرعادی است). معایب مربوط به سایر سنسورهای جریان از نوع مزاحم یا صفحه سوراخدار مشابه با بازوی مزاحم است. افت فشار در دو طرف بیم به مقدار کم اهمیتی وجود دارد که مشابه با صفحه سوراخدار است. بازوی مزاحم باعث گرفتگی می‌شود و حتی ممکن است بوسیله اجزاء داخل مایع صدمه ببیند. علاوه بر این سیم‌های استرین گیج‌ها بایستی از داخل دیواره‌های لوله به خارج آورده شوند، که این خود احتیاج به کار اضافه برای مجزا سازی ترانسدیوسر دارد.

روتامتر با سطح متغیر در شکل فوق b نمایش داده شده است. جریان باعث فشرده شدن هدف به عقب و فشردن فنر می‌شود. هدف در یک موقعیت که نیروی فنر و نیروی جریان مایع در حالت تعادل باشند می‌ایستد. چون نیروی فشرده شدن یک فنر متناسب با جابجائی آن است، اندازه‌گیری این موضوع که چقدر هدف جابجا شده مقداری است از جریان مایع. اگر این وسیله بصورت عمودی نصب شود نیروی شناب ثقل

زمین را می‌توان با فنر جایگزین نمود. این نوع ترانسدیوسر جریان باعث ایجاد افت فشار قابل توجهی می‌شود (بنابراین جریان مایع را کاهش داده و باعث خطا می‌شود) و حتی ممکن است غیرخطی هم باشد. علاوه بر این شما بایستی سیمهای پتانسیومتر و یا LVDT متصل به این دستگاه را که جابجائی را عملاً اندازه‌گیری می‌کنند، بخارج بیاورید.

بجای تولید یک حرکت خطی، می‌توان از جریان به ترتیبی استفاده کرد که یک سنسور را بچرخانـد. سپس در صورت اندازه‌گیری سرعت چرخش سنسور می‌توانید جریان مایع را بدست آورید. نوع ساده‌تر از یک چرخ پره‌دار با یک پروانه که بداخل مایع رفته استفاده می کند. هر چه سرعت جریان بیشتر باشد. چرخ پره‌دار سریع‌تر می‌چرخد. به شکل زیر توجه کنید. در یک انتهای پروانه یک مغناطیس دائمی نصب شده است. در داخل بدنه دستگاه نیز ترانزیستور با اثر هال نصب گردیده است که هر دفعه که پروانه از مقابل آن می‌گذرد یک پالس در خروجی تولید می‌کند. فرکانس این پالسها متناسب با جریان مایع است.



ترنسدیوسرهای جریان نوع چرخشی: (a) چرخ پارویی (b) توربین جریان

ترانسدیوسر جریان با چرخ پره دار به صورت یک دستگاه ساخته شده مستقیما به داخل لوله ای که در آن جریان برقرار است به طریقه نصب استاندارد، پیچ می شود.

ترانسدیوسر جریان با چرخ پره‌دار افت فشار خیلی کمی تولید می‌کند. بنابراین بارگذاری آن بر سیستم ناچیز است. سیگنال خروجی آن سادگی به می‌تواند با هر سیستم دیجیتال و یا میکروپروسسوری و یا کنترل کننده‌های برنامه‌ریزی شونده تطبیق داده شود. از آنجایی که شما فقط چهار پالس در هر دور چرخش آن

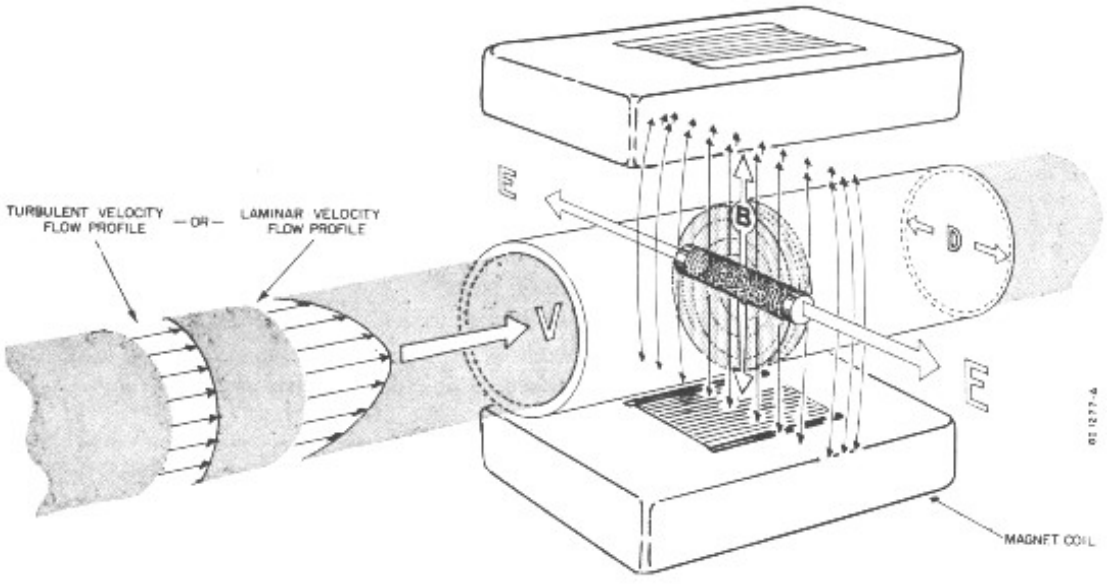
می‌گیرید، در جریان مایع کم شما بایستی یا زمان بین پالسها را اندازه‌گیری کنید یا قدرت تفکیک را از دست بدهید.

با اضافه کردن تعداد پره‌ها قدرت تفکیک بهتری بدست می‌آید. چنانچه از نوع توربین بجای چرخ پره‌دار استفاده کنیم تأخیر از بین می‌رود. این نوع در شکل فوق b نشان داده شده، مغناطیس‌ها از لبهٔ پروانه‌ها جدا شده‌اند، بجای آن پروانه‌ها از مواد با مقاومت مغناطیسی کم ساخته می‌شوند و از یک پیک آپ مغناطیسی در آن استفاده شده است.

راه حل دیگر استفاده از یک سنسور نوری منعکس کننده است تا بوسیله آن چرخش نوکهای پروانه را آشکار کنیم. این نوع دستگاه مشکلات تأخیر زمانی تولید شده بوسیله پیک آپ مغناطیسی را از بین می‌برد و مشابه با چرخ پروانه‌دار، خروجی فرکانس است. کالیبره نمودن، که بستگی به فرکانس خروجی نسبت به سرعت جریان دارد، به درجه حرارت و غلظت چسبندگی مایع افت فشار و اغتشاش در جریان مایع نیز بستگی دارد. غالباً احتیاج به یک تنظیم کننده جریان در جلوتر از پره‌ها بعلاوه یک شبکه برای حفاظت پره‌ها از مواد داخل مایع داریم. توربین اغلب اوقات در سیستم‌های هیدرولیک جاییکه مایع دارای اثر روغن کاری داخلی است بکار می‌رود.

تمام انواع اندازه‌گیرهای از نوع مزاحم که تا بحال دیدیم بوسیله انرژی جریان مایع برای تولید اثر قابل اندازه‌گیری کار می‌کنند. حذف این انرژی از جریان مایع بایستی تا اندازه‌ای باعث کاهش سرعت شود. بعبارت دیگر، اندازه‌گیری جریان مایع با هر کدام از این نوع وسایل، جریان مایع را پائین می‌آورد.

روشهای اندازه‌گیری غیر مزاحم، سیستم را بارگذاری نمی‌کنند و جریان مایع را کاهش نمی‌دهند. اگر شما جریان مایعی را اندازه‌گیری می‌کنید که کمی هادی است (حتی آب هم کار می‌کند)، می‌توان از اندازه‌گیر جریان الکترومغناطیسی استفاده کرد. اصول کار این دستگاه در شکل زیر نشان شده است. یک قسمت لوله غیرهادی مورد نیاز است.

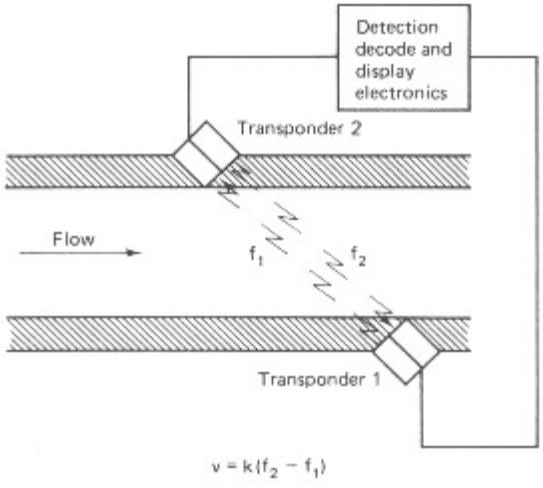


جریان سنج الکترومغناطیسی

آستر کردن یک لوله فلزی با یک ماده غیر هادی نیز کار می‌کند. اینکه چه ماده‌ای بایستی استفاده کرد بستگی زیادی به درجه حرارت و خورندگی مایع دارد. یک میدان مغناطیسی به صورت عمود با جهت جریان قرار داده می‌شود. قانون ژنراتور آن است که اگر یک هادی، یک میدان مغناطیسی را قطع کند یک ولتاژ در آن القاء خواهد شد که بصورت عمود بر جهت میدان و جهت حرکت است. الکترودهادی به صورتی قرار می‌گیرند تا این EMF القاء شده را حس کنند. این ولتاژ القاء شده بصورت خطی و مستقیماً با سرعت جریان، قدرت میدان مغناطیسی و قطر لوله متناسب است.

این نوع ترانسدیوسر مزایای خوبی دارد که عبارت است از عدم افت فشار و عدم بارگذاری بر جریان مایع. عکس شدن جهت جریان مایع بسادگی قابل آشکار شدن است. همچنین هیچ گرفتگی یا امکان شکستن قطعه‌ای نیست.گر چه، مایع بایستی هادی باشد و یک قسمت مخصوص از لوله مورد نیاز است و خروجی‌ها در حدود میکرو ولت هستند. بالاخره تغذیه مغناطیس الکتریکی ممکن است مساله ساز باشد. استفاده از ولتاژ dc ممکن است باعث شود که مایع‌های با هدایت کم پلاریزه شده و در اطراف پیک آپ‌های الکتریکی قرار بگیرند و اثرشان را کاهش دهند. تحریک با ولتاژ ac نیز می توان استفاده کرد اما این باعث تولید خروجی ac شده و اثر خازنی مربوط به مایع خروجی را کاهش می دهد. از dc پالسی هم استفاده می گردد، گر چه درایو پیچیده‌تر و مدارهای حس کننده بیشتر و حساس‌تری مورد نیاز است.

نوع دیگر اندازه‌گیر جریان مایع غیرمزاحم از انتشار امواج ما فوق صوت بداخل مایع استفاده می‌کند. یک شکل آن در شکل زیر نشان داده شده است. ترانسدیوسرها کریستالهای پیزو الکتریک هستند که قادرند هم عمل ارسال و هم عمل دریافت سیگنالهای ما فوق صوت را انجام دهند. آنها ممکن است در فرکانسهای محدوده مگاهرتی کار کنند. این ترانسدیوسرها بصورت ۴۵° درجه با جهت جریان مایع نصب می‌شوند. هر کدام یک فرکانس ارسال می‌کنند. سیگنالی که با جریان حرکت کرده در فرکانس بالاتری نسبت به آنچه ارسال شده، دریافت می‌شود. سیگنالی که در جهت خلاف مایع حرکت می‌کند فرکانس کمتری خواهد داشت. این اختلاف در فرکانس‌های رسیده مستقیماً با سرعت مایع متناسب است.



ترانسدیوسرهای جریان آلتراسونیک

از سنسور ما فوق صوت جریان می‌توان برای مایعات غیرهادی و یا گازها نیز استفاده کرد. به هیچ وجه هم مزاحمتی برای جلوگیری از حرکت جریان و یا بارگذاری بر روی آن نخواهد داشت. در حقیقت ترانسدیوسرهایی هستند که آنها را می‌توان از خارج بر روی لوله بست و بصورت غیردائمی عمل

اندازه‌گیری جریان داخل لوله را انجام داد. عیب جریان سنج ما فوق صوت، قیمت و الکترونیک مربوط به آن است.

ترانسدیوسرهای سطح مایعات

در بیشتر فرآیندهای تولیدی ، دانستن اینکه چقدر مواد در یک تانک یا خمره موجود است، اهمیت فراوانی دارد. سرریز شدن تانک می‌تواند باعث حادثه گران‌قیمت و شاید خیلی خطرناک شود. از سوی دیگر، خالی شدن کامل یک تانک بوسیله پمپ، ممکن است فرآیندی را که قرار بود از تانک اکنون خالی، مواد دریافت کند از بین ببرد. یا ممکن است به خطوط خالی انتقال لوله‌ای اگر که احتیاج به وجود مواد برای جذب حرارت باشد، صدمه بزند.

همچنین در تولیدات شیمیائی و مواد غذائی، نتیجه خوب نهائی احتیاج به مخلوط کردن دقیق مقدار مناسب اجزاء متشکله با توجه به دستورالعمل مربوط را دارد. اندازه‌گیری دقیق مقدار ماده‌ها نیز حیاتی است.

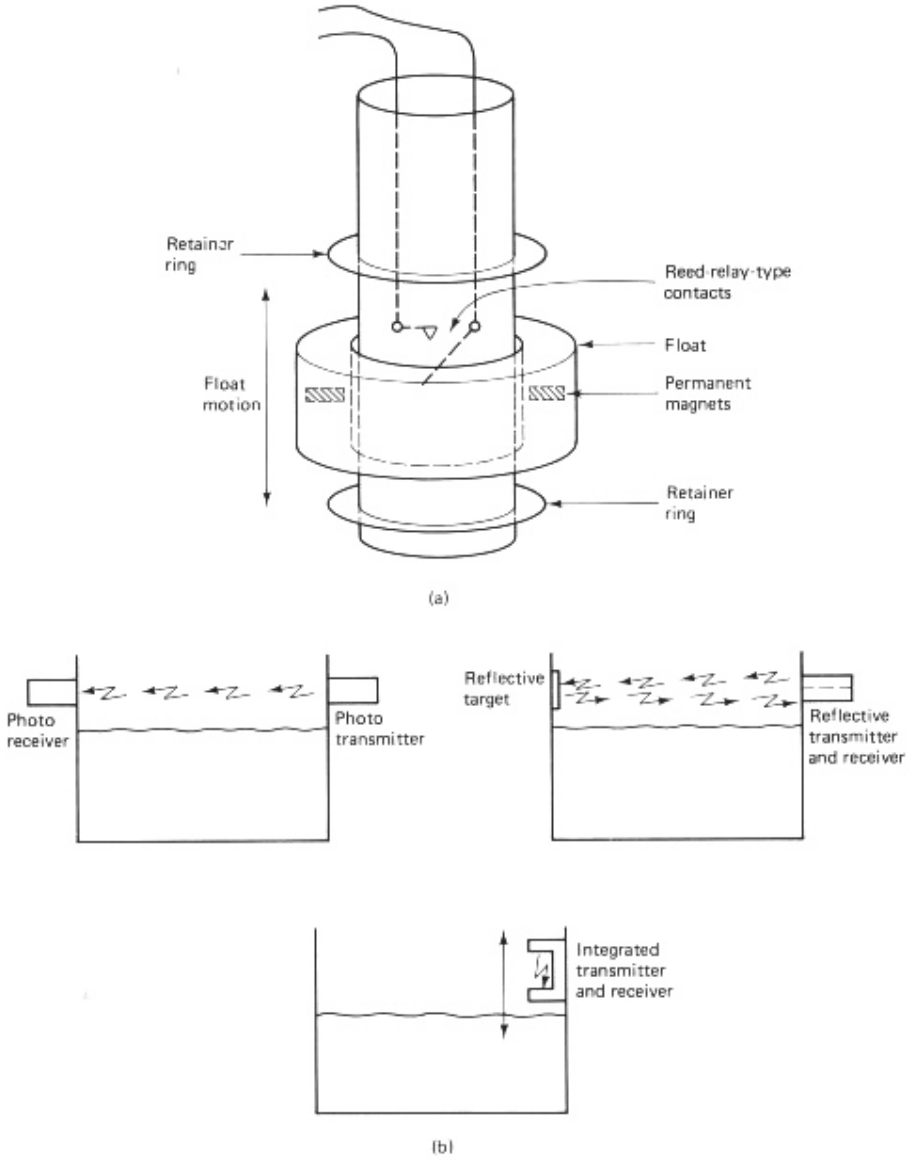
موادی که سطح یا ارتفاع آنها را اندازه‌گیری می‌کنید لزوماً مایعات هموژن یا همجنس یا یکجور نیستند. بسته به فرآیند، آنها ممکن است، پودر، قطعات یا تکه‌های ریز و خرد شده باشند. ممکن است برای موادغذائی و یا خیلی خورنده باشند، ممکن است در کناره‌های تانک یا خمره جمع بشوند و یا بصورت موجی بهم بخورند یا در طلاطم باشند. تمام این خواص ممکن است بر روی انتخاب ترانسدیوسر سطح شما تأثیر بگذارند.

ترانسدیوسرهای سطح را می‌توان بدو دسته عمده تقسیم‌بندی نمود:

۱ـ ترانسدیوسرهای پیوسته ۲ـ ترانسدیوسرهای غیر پیوسته. ترانسدیوسرهای پیوسته سطح دقیق را متناسب و در تمام ارتفاع تانک بصورت پیوسته نمایش می‌دهند. این نوع بطور دقیق در این قسمت معرفی می‌شوند. از سوی دیگر بعضی اوقات ممکن است نیاز به یک اعلام خطر یا نمایش فقط وقتی که سطح تانک به مقدار معین می‌رسد و یا ممکن است باعث سرریز شدن با خطر برای تانک شده و یا تانک تخلیه شود داشته باشیم. برای این کاربردها در خروجی، بسته شدن یک کلید ساده و یا یک ولتاژ پله‌ای کافی است. در حقیقت، یک چنین ترانسدیوسر غیرپیوسته‌ای عملاً برای کنترل خیلی ساده‌تر از خروجی یک ترانسدیوسر پیوسته است.

کلید شناور نشان داده شده در شکل زیر a دارای یک کلید در حالت عادی باز یا بسته است، کنتاکت های آن مشابه کنتاکت های رله‌ها عمل می‌کنند. آنها بوسیله فنر در حالت باز نگهداشته می‌شوند و از یک ماده فرومغناطیسی ساخته شده‌اند. وقتی یک مغناطیس بر روی آنها قرار بگیرد و یا حرکت کند، میدان مغناطیسی باعث بسته شدن کنتاکت ها خواهد شد. این کنتاکت ها داخل یک لوله غیرفلزی و تخلیه شده از هوا قرار می‌گیرند (مانند لامپ) . یک مغناطیس دائم داخل شناور تعبیه شده است. این شناور در پاسخ به

سطح مورد اندازه‌گیری، به بالا و یا پائین حرکت می‌کند. البته دو صفحه محدود کننده حرکت‌های انتهائی آنرا محدود می‌کنند. کنتاکت ها می‌توانند با dc و یا ac تا ولتاژ ۱۱۵ ولت تحریک شوند. بنابراین سادگی عمل استفاده از یک شناور برای اعمال ورودی به مدارهای منطقی یا دیجیتال میسر است. و نهایتا می‌توان از آنها برای تحریک کنترلر برنامه‌ریزی شونده استفاده کرد و یا می‌توانند بطور مستقیم تغذیه یک سیستم اعلام خطر یا عمل‌کننده را تحریک کنند.



ترنسدیوسرهای سطح گسسته (a) سوئیچ شناور (b) فوتوالکتریک

آشکارسازی نوری نیز می‌تواند به منظور احساس سطح مورد استفاده قرار گیرد، البته این در حالتی میسر است که خواص اپتیکی یا نوری ماده باعث ممانعت کامل از عبور نور شوند. چندین راه ممکن در شکل فوق نشان داده شده است. فرستنده‌های نوری معمولاً دیودهای نوری مادون قرمز یا لنزها و جهت‌دهنده های مناسب نوری هستند. گیرنده، یک ترانزیستور حساس به نور با یک فیلتر نوری مناسب برای گرفتن طول موج

نوری ارسال شده است. این موضوع باعث کم شدن خطاهای ناشی از نور محیط کار خواهد شد. وقتیکه سطح پائین‌تر از سنسور است نور به گیرنده میرسد و ترانزیستور نوری اشباع می‌شود و یک سطح پایین دیجیتال می دهد. وقتیکه سطح تانک مانع عبور نور می‌شود، فتوترانزیستور خاموش می‌گردد. علاوه بر یک منبع dc شما ممکن است نیاز به یک مقاومت پول آپ بین ترانزیستور با کلکتور باز و ولتاژی داشته باشید که سطح بالای منطقی شما را دارد.

گیرنده‌های نوری نیز موجودند که بجای فتوترانزیستور از فتوتایریستور استفاده می‌کنند. این گیرنده‌ها یک خروجی ۱۱۵ ولتی وقتی که شعاع نوری به آنها بخورد تولید می‌کنند.

دستگاه‌های با فرستنده و گیرنده در یک محل از نقطه نظر نصب نسبت به واحدهائی که دارای گیرنده و فرستنده مجزا هستند ساده‌تر می باشند. فقط یک دسته سیستم احتیاج است. چنانچه هدف به اندازه کافی بزرگ باشد تنظیم زیاد حساس نیست. مدارهای انتگرال شده فرستنده و گیرنده انعطاف بیشتری را میسر می‌کنند. بوسیله نصب آنها بر روی یک میله می‌توان سطح آنها را تغییر داده و پائین‌تر و بالاتر برد که در این صورت به سادگی می‌توان سطح آلارم را انتخاب نمود.

آشکار کننده‌های نوری عمر بیشتری نسبت به کلیدهای شناور دارند. چون هیچ قسمت مکانیکی که عمل نکند در آنها موجود نیست. فقط آشکار کننده‌های نوری احتیاج دارند که ماده مانع انتقال نور گردد. این موضوع کاربرد آنها را برای بعضی مواد محدود می‌کند.

از اندازه‌گیری انتقال حرارت نیز می‌توان برای آشکار سازی وجود مواد در تانک استفاده نمود. یک سنسور درجه حرارت مقاومتی تغذیه می گردد که باعث گرم شدن خودش بشود. حرارت منتشر شده بداخل هوا از این سنسور کم است. و باعث می‌شود که سنسور درجه حرارت نسبتاً بالائی را آشکار کند. وقتی درون مایعی داخل شود یا مایع آنرا در بر گیرد، حرارت بسادگی بیشتری از سنسور منتقل شده و سنسور به مجرد در بر گرفته شدن بوسیله مایع، حرارت آن را دچار تغییر زیادی می‌نماید. یک مدار آماده‌سازی سیگنال خارجی برای به کار انداختن سنسور و تبدیل خروجی آن به سیگنال قابل استفاده مورد نیاز است. این تکنیک در صورتیکه حرارت عادی مایع نزدیک حرارت سنسور در هوا باشد و یا درجه حرارت مایع خیلی تغییر کند، دارای مساله خواهد بود.

در بعضی کاربردها فقط لازم است بدانیم که مایع بالاتر یا پائین‌تر از سطح خاصی است. این موضوع تنها اطلاعاتی است که یک ترانسدیوسر سطح غیرپیوسته به شما می‌دهد. گر چه در بیشتر فرآیندهای کنترلی، احتیاج به یک مقدار دقیق و خطی از مقدار مواد در یک تانک داریم. این موارد احتیاج به ترانسدیوسر سطح پیوسته دارند، روشهای متعددی برای تولید یک سیگنال که مقدار مواد داخل تانک را آشکار کند موجود است.

پنج روش در این قسمت توضیح داده می‌شوند:

۱ـ فشار در پائین تانک بطور خطی متناسب است با سطح مایع در تانک چه مایع و چه جامد. ۲ـ وزن تانک معرف مقدار ماده ای است که داخل آن است. ۳ـ از شناورها می‌توان برای آشکارسازی سطح مایعات استفاده

کرده و یک پتانسیومتر یا شیر را به حرکت درآورد ۴ـ برای مایعاتی که از نظر الکتریکی عـایق هـستند و یـا جامدها، تانک و یک الکترود می‌توانند تبدیل به یک خازن بزرگ شوند. ۵ـ بـا آشکارسـازهای اولتراسـونیک، مشابه آنهائی که برای آشکار سازی فاصله و تنظیم اتوماتیک دوربین‌ها استفاده می‌شوند، مـی‌تـوان بـسادگی فاصله با سطح مایع را بدست آورد.

در قسمت های قبل مشاهده نمودید که فشار در پائین ارتفاعی از مایع بوسیله هد تعریـف شـده و متناسـب است با ارتفاع مایع:

$$p = \rho hg$$

که در آن p، هد یا فشار است

ρ ، چگالی مایع و h، ارتفاع سطح مایع است.

بنابراین می‌توانید سطح مایع درون یک تانک را بوسیله اندازه‌گیری فشار در ته تانک تعیین کنید.

گر چه این تکنیک چندین پیش‌فرض دارد که شما بایستی از آن آگاه باشید.اول، برای اینکه نتـایج همیـشه تکرارپذیر و ثابت باشد مایع بایستی یکنواخت باشد. در حقیقت این بدین معنی اسـت کـه چگـالی بایـستی ثابت باشد. دوم، ارتفاع بدست آمده از اندازه‌گیری فشار مربوط به سطح بالای ترانسدیوسر است. بنابراین اگـر نتوان ترانسدیوسر فشار را در ته تانک نصب نمود، بایستی از یک مدار آماده‌سازی سیگنال برای اضافه یا کـم کردن و تنظیم صفر استفاده کنید. این موضوع در شکل زیر نشان داده شده است.

آخرین مطلب تحت بررسی وقتی از فشار برای نمایش سطح استفاده می‌کنیم، مربوط به فـشار بـالای تانـک است. اگر سر تانک باز و در فشار اتمسفر باشد. رابطه فشار معمولی قابـل اسـتفاده اسـت و مـی‌تـوان از یـک ترانسدیوسر فشار گیج(فشار با مبنای اتمسفر) استفاده نمود. گر چه اگر سـر تانـک مـسدود باشـد، فـشار در پائین تانک بستگی به هد یا ارتفاع مایع و همچنین فشار در بالای مایع دارد.

$$p_{bottom} = \rho hg + p_{top}$$

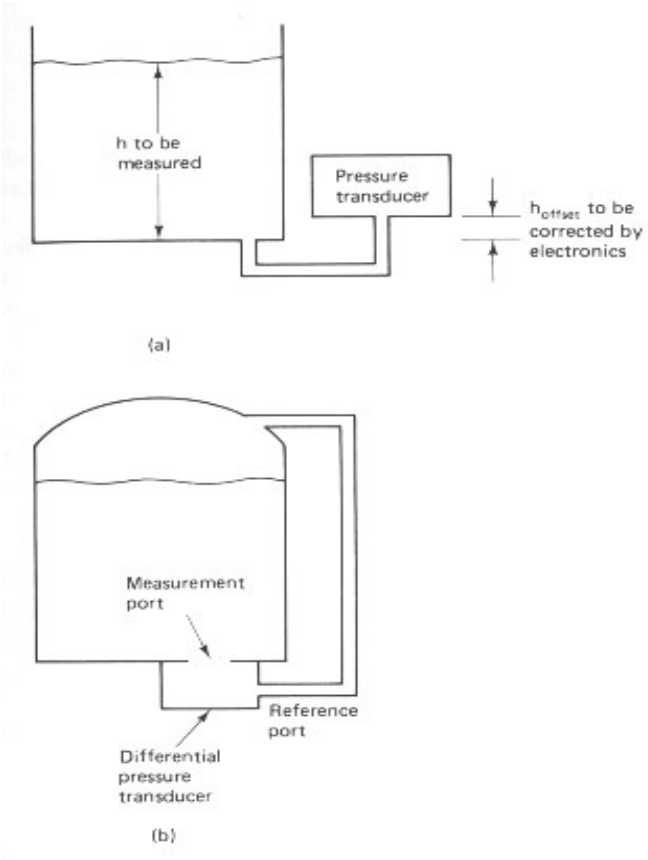
و یا

$$h = \frac{p_{bottom} - p_{top}}{\rho g}$$

برای محاسبه خودکار در این حالت، می‌توانید از یک ترانسدیوسر فشار تفاضلی یا تفاضـل بـا مبنـای متـصل شده به بالای تانک که در شکل فوق نشان داده شده استفاده کنید.

یک اندازه واقعی از مقداری که در تانک است، وزن آن است. این موضوع برای حالتهایی که تانک دارای مایع و یا جامد و یا مقداری بین آنها است معتبر می باشد. تانک را بایستی بر روی سلول‌های بار قرار داد. اگر نیاز به بیشتر از یک سلول بار باشد، بایستی یا مطمئن شوید که بار یکنواخت پخش شده باشـد و یـا بایـستی از نوعی مدار که بار اعمال شده به هر سلول بار را جمع می‌کند، استفاده نمایید. نهایتاً، مدار الکترونیک تنظـیم کننده سیگنال بایستی به نحوی عمل نماید که خروجی صفر در موقع خالی بودن تانک بدست آید. تمام این

احتیاجات به آن پیچیدگی که به نظر می‌رسد نیست. در بیشتر دستگاه‌ها، یک اندازه‌گیر اصلی و فرعی را می‌توان به سیستم حامل یا گیج متصل نمود. سپس می‌توانید یک دفعه سیستم را با پر کردن و خالی کردن کالیبره نموده و مقداری را که بایستی به مقادیر اندازه‌گیری شده بیافزایید، پیدا کنید.



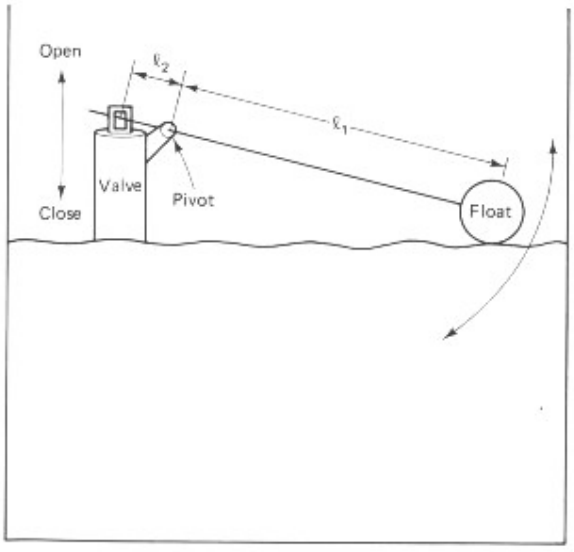
اندازه گیری سطح با حس کردن فشار با (a)یک ترنسدیوسر آفست و(b) یک مخزن درزگیری شده.

شاید مورد استفاده‌ترین ترانسدیوسر سطح و سیستم کنترل یک شیر شناور داخل تانک فلاش تانک منازل است. اصول کار آن در شکل زیر نمایش داده شده است. شناور بطرف بالا و پائین و بر روی سطح آب تانک حرکت می‌کند. از طریق یک تکیه‌گاه یک شیر کنترل می‌شود. وقتی سطح آب پائین است، شناور پائین آمده، شیر را باز می‌کند، همچنانکه شناور بالا می‌رود شیر را فشرده کرده و نهایتاً آنرا می‌بندد. بازوی متصل کننده شناور به شیر از طریق تکیه‌گاه بطور مکانیکی نیروی اعمال شده به شناور را با ضریب l_1/l_2 ، تقویت می‌نماید.

برای کنترل‌های پیچیده‌تر، بجای شیر از یک پتانسیومتر با حرکت خطی استفاده می‌شود. با حرکت شناور به بالا و پائین لغزنده پتانسیومتر حرکت می‌کند. از چرخ دنده می‌توان به منظور تبدیل حرکت بازوی l_2 به چرخش برای حرکت درآوردن پتانسیومترهای حرکت دورانی استفاده نمود.

این سیستم شناور و پتانسیومتر برای اندازه‌گیری سطح دارای مزایای متعددی نسبت به سایر ترانسدیوسرهایی که مطالعه گردید، است. سیگنال خروجی می‌تواند یک ولتاژ dc بزرگ باشد. که این موضوع

احتیاج به آماده‌سازی بیشتر سیگنال را حذف نموده و کنترل و نمایش الکترونیکی آن آسان مـی‌شـود. ثانیـاً سیستم ساده است، بنابراین هم کم قیمت و هم مطمئن می باشد.



سیستم کنترل سطح درایو شناور

هر چند، معایب متعددی نیز برای آن وجود دارد. شناور دارای محدوده رنج حرکت محدودی است. مکـانیزم بایستی داخل تانک و بطور صحیحی نصب شود. در بیشتر کاربردها، قرار دادن چیزی داخل تانک غیـرممکن است. همچنین، پتانسیومتر بایستی به دقت عایق شده و از داخل شدن آن به مایع جلوگیری شود.

ظرفیت خازن صفحات موازی مساویست با

$$C = \frac{A\varepsilon}{d}$$

که در آن C، ظرفیت خازنی

A، سطح صفحات

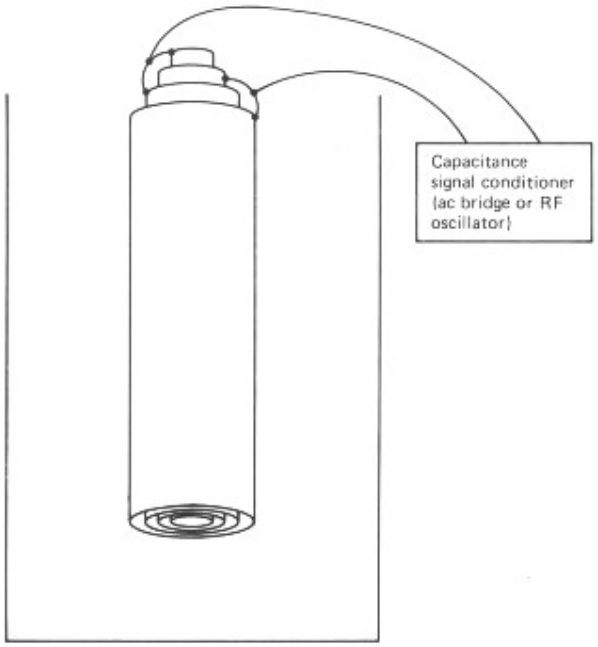
ε ، ضریب دی الکتریک

و d، فاصله بین صفحات است.

ثابت دی الکتریک هوا تقریباً ۱، آب دارای ثابت ۸۰ مرتبه بالاتر است. در حالی که بعضی از جامدات ممکـن است دارای ضریب دی‌الکتریک ۱۰۰۰۰ یا بیشتر باشد. این تغییرات زیاد در ثابت دی‌الکتریک را می‌توان بـه منظور استفاده کردن در اندازه‌گیری سطح استفاده کرد. به شکل زیر توجه کنید.

پروبهای هم مرکز داخل تانک قرار داده شده‌اند. همچنانکه سطح بالا می‌رود، مقدار ثابت دی‌الکتریک متوسط نیز بطور خطی افزایش می‌یابد. بنابراین ظرفیت اندازه‌ای از سطح داخل تانک است. برای افزایش اثرات خازنی می‌توان از چندین الکترود هم مرکز استفاده کرد. متصل کردن صفحات به صورت یک در میـان بـه یکـدیگر

سطح را افزایش می‌دهد. مشابه با دیگر ترانسدیوسرهای خازنی نشان داده شده در این فصل، ترانسدیوسر خازنی سطح بایستی با مدار آماده‌سازی سیگنال الکترونیکی تجهیز شده باشد تا بتوان ظرفیت را به یک سیگنال که از آن می‌توان ساده‌تر استفاده کرد تبدیل نمود. با یک پل ac دامنه ظرفیت تعیین کننده دامنه سیگنال خروجی پل است. استفاده از خازنهای حساس به سطح برای تنظیم فرکانس یک اسیلاتور تولید یک فرکانس که مستقیماً در رابطه با سطح تانک است می‌کند.



ترانسدیوسر سطح خازنی

اگر تانک هادی باشد، امکان آن است که یک الکترود به تانک داخل کرده و از خود تانک بعنوان صفحه دیگر خازن استفاده کنیم. گر چه با در نظر گرفتن دقیق محدودیت‌ها، بعنوان دلایل ایمنی تانکهای فلزی بایستی به زمین متصل شوند، که این موضوع ممکن است از نقطه‌نظر الکترونیک تنظیم کننده سیگنال مهم باشد. همچنین ممکن است باعث نویز الکتریکی بدلیل وجود حلقه‌های زمین بشویم. و یا بدلیل اتفاقات سیگنالهای گمراه کننده بداخل تانک تزریق و بنابراین مدار کنترل بشود.

اگر مایعی که سطح آنرا اندازه می‌گیریم هادی باشد، می‌توان از اندازه‌گیری مقاومت بجای ظرفیت استفاده کرد. بجای صفحات هم محور شکل فوق از دو سیم مقاومتی استفاده می‌شود. بایستی مقاومت سیم، بالا و پایدار باشد و مقاومت آن در واحد طول بخوبی تعیین شده باشد. همچنانکه سطح بالا می‌رود، سیم بیشتری اتصال کوتاه شده و مقاومت کل را پایین می‌آورد. پس مقاومت بطور معکوس متناسب با سطح است. این تکنیک وقتی که می‌خواهیم ارتفاع سطح جیوه را در یک مانومتر و یا سنجش فشار خون اندازه‌گیری کنیم خیلی معمولی است.

با اختراع سیستم اتوماتیک فوکوس دوربین عکاسی یک آشکارساز فاصله اولتراسونیک کم قیمت، ساده برای استفاده و مدولار بدست آمده است. برای اندازه‌گیری سطح با یک اندازه‌گیر مسافت اولتراسونیک ، بایستی

سیستم را بالای تانک نصب کنید بصورتی که بطرف پائین متمرکز شده باشد. یک پالس برای شروع اندازه‌گیری به سیستم اعمال می‌شود. وقتیکه سیگنال اولتراسونیک فرستاده می‌شود، سیستم یک پالس در خروجی می‌دهد. وقتی سیگنال برگشتی دریافت شد، یک پالس دیگر از خروجی سیستم داده می‌شود. با استفاده از یک شمارنده خارجی بایستی زمان بین پالس ارسال شده و پالس مربوط به سیگنال برگشتی را اندازه‌گیری بنمائید. چون سیگنال اولتراسونیک با سرعت حرکت می‌کند، زمان بین ارسال و دریافت سیگنال اندازه‌ای از فاصله با سطح مایع است. فواصل مورد اندازه‌گیری بین 0.5 تا ۱۰ متر بایستی باشد.

$$d = 0.5\upsilon t$$

که در آن d، فاصله تا سطح مایع

υ، سرعت صوت = 331.5 m/s در سطح دریا و دمای 0^oC

t، زمان کل رفت و برگشت است.

نصب فاصله یاب اولتراسونیک بر بالای تانک خیلی مناسب است. دسترسی و نصب آن آسان و لازم نیست سیستم را ایزوله نموده و در مقابل تأثیر مواد بر روی آن محافظت نمائیم. هر چند، همچنانکه تانک پر می‌شود، فاصله بین سنسور و سطح کوچکتر و کوچکتر شده. این باعث زمانهای کوچکتر و شمارش کمتر در تایمر خروجی می‌شود. بعبارت دیگر هر چه سطح بالاتر می‌رود، اطلاعات جمع‌آوری شده تولید شماره کمتری می‌کند. دو راه حل موجود است، یکی استفاده از آشکارساز اولتراسونیک که با مواد داخل تانک کار می کند. سیستم را در ته تانک قرار دهید. شعاع از سطح مایع منعکس شده و زمان بیشتری را برای رفت و برگشت به سطح مایع نیاز دارد. راه حل دوم استفاده از یک سیستم آماده‌سازی اطلاعات **Data manipulation** با یک شمارنده برای تصحیح اطلاعات دریافت شده از آشکارساز اولتراسونیک نصب شده در بالای تانک است.

مثال- بلوک دیاگرام و روابط مربوط به استفاده از یک آشکارساز فاصله اولتراسونیک را برای اندازه‌گیری تانکی به عمق ۵ متر بدست آورید. دستگاه بایستی دارای خروجی صفر در موقع خالی بودن تانک و خروجی ۱۰۰۰ در موقع پربودن آن باشد.

حل ـ بلوک دیاگرام در شکل زیر نشان داده شده است. سنسور اولتراسونیک در فاصله 0.5 متر بالای سطح تانک پر نصب می‌شود. وقتیکه تانک خالی است امواج 5.5 متر را طی کرده و برمی‌گردند. که این امر در مدت

$$t_{empty} = \frac{5.5m}{(0.5)(331.5m/s)}$$
$$= 33.183\,ms$$

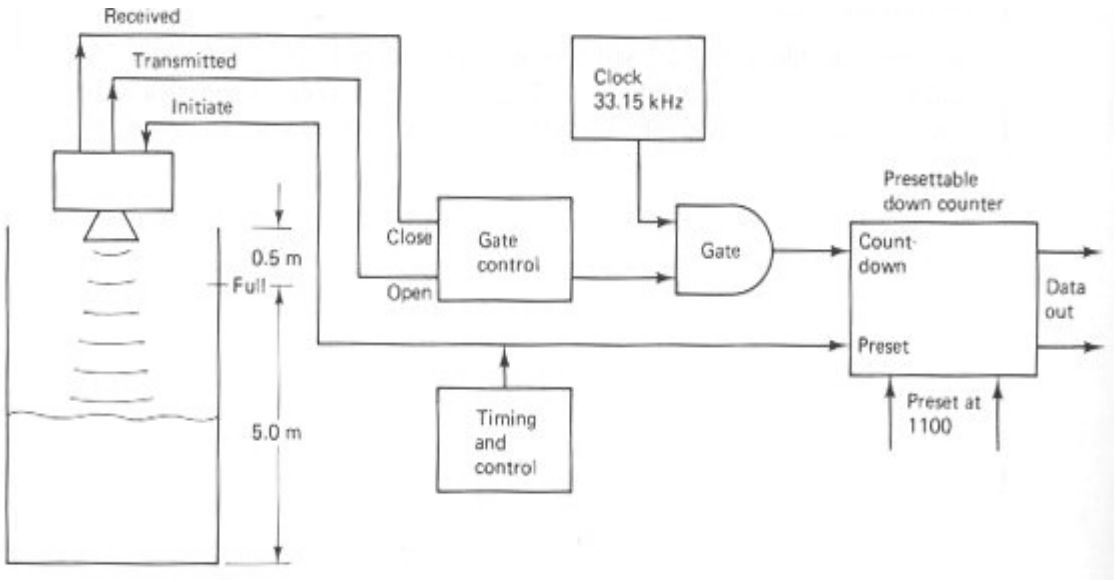
صورت می‌گیرد. زمانیکه تانک پر است امواج 0.5 متر را طی کرده و برمی‌گردند. که این امر در مدت

$$t_{full} = \frac{0.5m}{(0.5)(331.5\,m/s)}$$
$$= 3.017\,ms$$

صورت می‌گیرد. اختلاف زمان بین وضعیت‌های پروخالی مساویست با

$$t_{diff} = 33.183\,ms - 3.017\,ms$$
$$= 30.167\,ms$$

این اختلاف در زمان بایستی تولید یک شمارش ۱۰۰۰ بشود،



سنسور سطح آلترا سونیک Top-mounted

بنابراین زمان بین و شمارش مساویست با

$$t_{per\ count} = \frac{30.167 ms}{1000} = 30.167\,\mu s$$

این سیگنال شمارش را می‌توان بوسیله یک ساعت که در سرعت

$$f_{clock} = \frac{1}{30.167 \mu s} = 33.15\,kHz$$

کار می‌کند درست کرد. اکنون به دقت به بلوک دیاگرام شکل ۷۸ـ۳ دقت کنید. زمان گیری و بلوک کنترل، اندازه‌گیری را با اعمال یک پالس به ترانسدیوسر و شمارنده تنظیم شده از قبل شروع می‌کند. شمارنده به اندازه ۱۱۰۰ پر شده است. وقتی ترانسدیوسر موج صوتی را می‌فرستد، یک پالس هم ایجاد می‌کند. این باعث باز شدن گیت شده و شروع به کاهش شمارش از ۱۱۰۰ برای هر 30.17 μs می‌کند. اگر تانک پر باشد پس از 3.017 ms خط دریافت سیگنال پالس‌دار شده و گیت مسدود می‌شود. در طول این مدت شمارنده فقط ۱۰۰ تا شمرده و شمارنده را باندازه ۱۰۰۰ گذاشته است. اگر تانک خالی باشد. در زمان 33.183 ms خط دریافت سیگنال پالس‌دار شده و گیت را مسدود می‌کند. در طی این زمان شمارنده ۱۱۰۰ بار شمرده و شماره ۰ بر جای مانده است.