

پلتفرم اختصاصی
مهندسی کنترل



CONTROL ENGINEERS

Dedicated Control Engineering Platform

 Website: www.controlengineers.ir

 Instagram: [@controlengineers.ir](https://www.instagram.com/controlengineers.ir)

 Telegram: [@controlengineers](https://www.telegram.com/@controlengineers)

فصل اول

مراجع:

1. “Instrumentation, measurement, and analysis”, B. C. Nakra, K. K. Chaudhry, 1985.
2. “Instrumentation and control, Fundamentals and Applications”, Chester L. Nachtigal, John Wiley & Sons Inc. 1990.
3. “Instrumentation Fundamentals and Applications”, Ralph Morrison, John Wiley & Sons Inc. 1984.

میان‌ترم: چهارشنبه ۲۱ اردیبهشت

۱-۱. مقدمه

ابزار دقیق، موضوعی است که در علوم، مهندسی و پزشکی دارای اهمیت اساسی است.

سیستم ابزار دقیق در حالت کلی جز یکی از دو نوع زیر است:

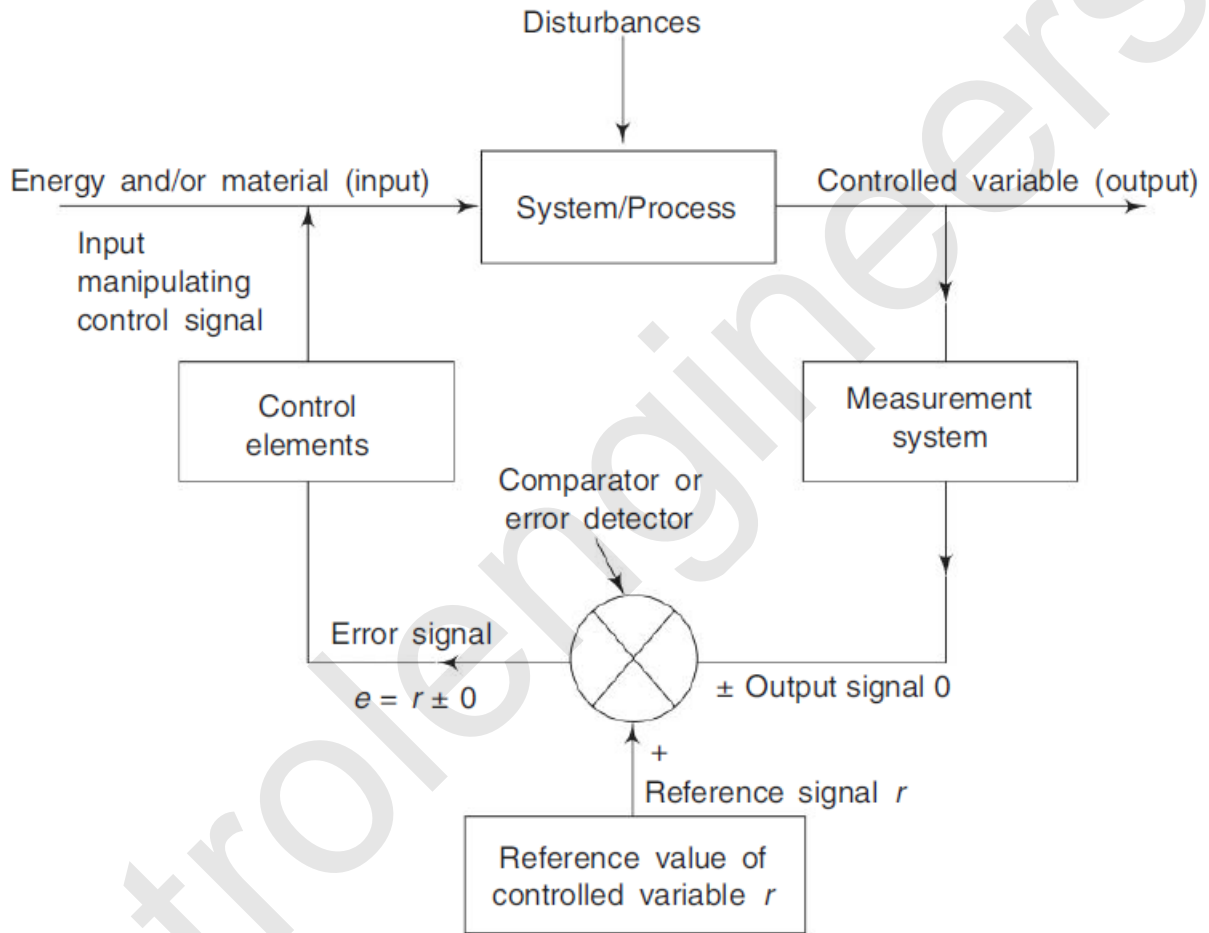
- نوع اول، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و یا تجربی است که برای قسمت‌های تحقیق و توسعه کاربرد دارد. در طراحی این نوع وسایل اندازه‌گیری کیفیت اجرای اندازه‌گیری مهم است.
- نوع دوم سیستم‌های ابزار دقیق، آنهایی هستند که قسمتی از یک وسیله را تشکیل می‌دهند که معمولاً این وسایل محصولات تجاری هستند، نظیر ابزارهای اندازه‌گیری در خودرو.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

۲-۱. کاربردهای نمونه سیستم‌های ابزار دقیق

- اندازه‌گیری اطلاعات- پارامترهای سیستم
- کنترل یک فرایند یا کارکرد معین



نمودار بلوکی نوعی از سیستم کنترل خودکار

- شبیه‌سازی شرایط سیستم
- مطالعات طراحی تجربی
- انجام دادن عملیات گوناگون

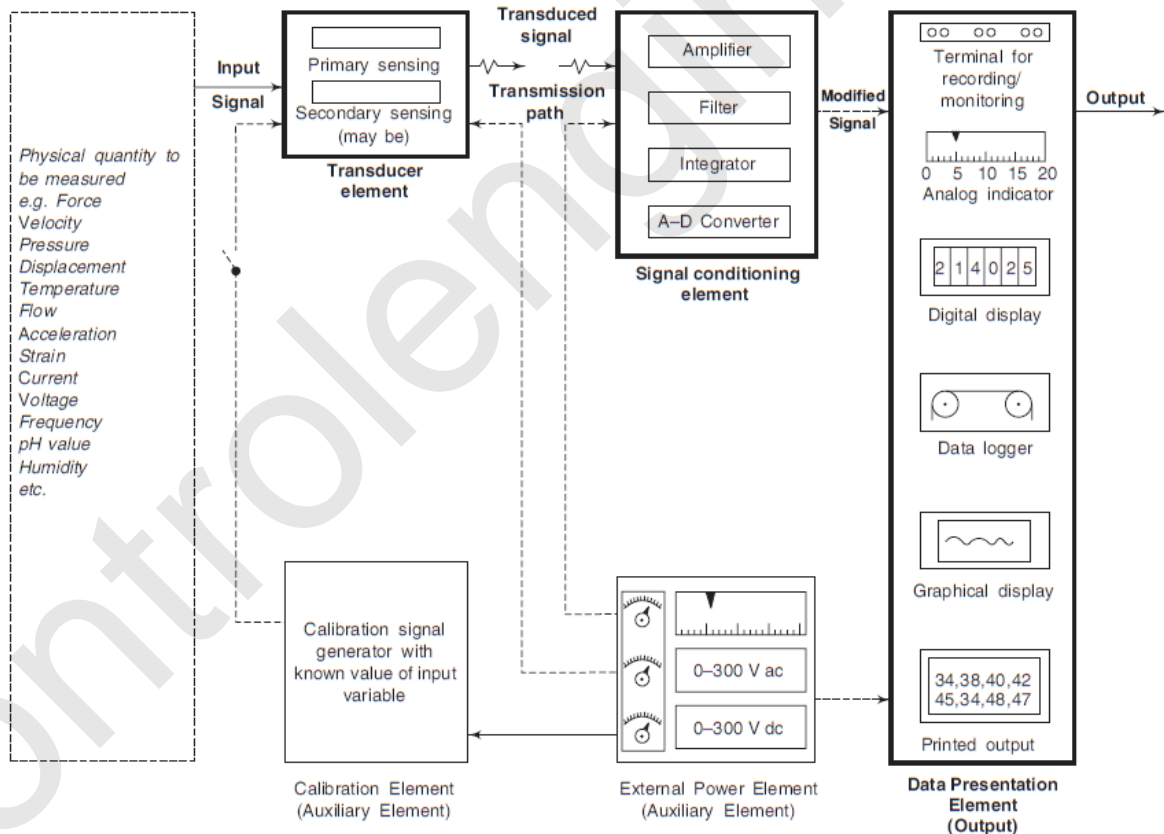
Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

- آزمون مواد، حفظ استانداردها و مشخصات محصولات
- اثبات پدیده‌های فیزیکی / نظریه‌های علمی
- کنترل کیفیت در صنعت

۳-۱. بخش‌های عملیاتی سیستم اندازه‌گیری

- بخش‌های عملیاتی اصلی (Transducer, signal conditioning, Data presentation)
- بخش‌های کمکی (کالیبراسیون، External power)



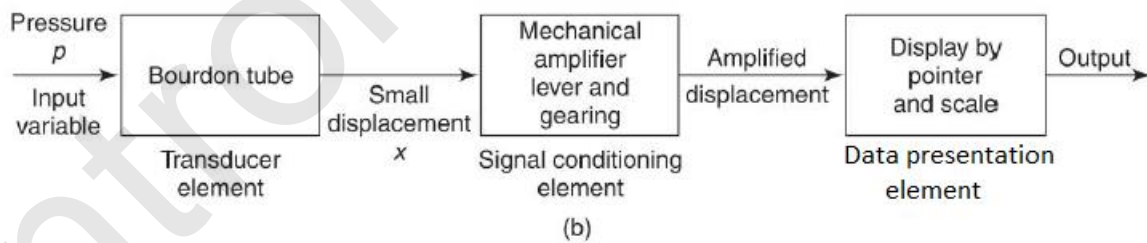
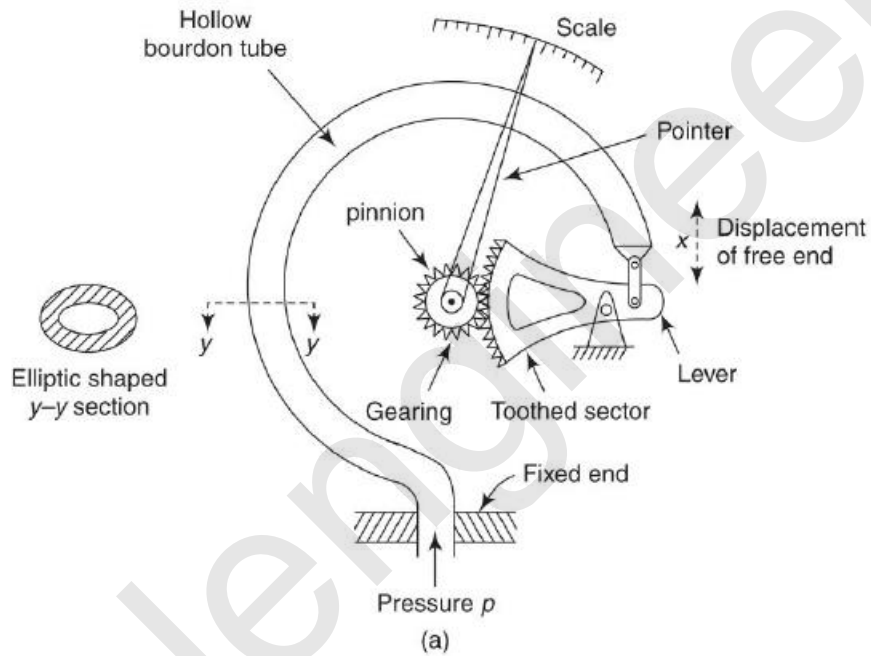
بخش‌های عملیاتی اصلی و کمکی سیستم اندازه‌گیری

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

فصل اول

مثال ۱. فشارسنج لوله بوردن

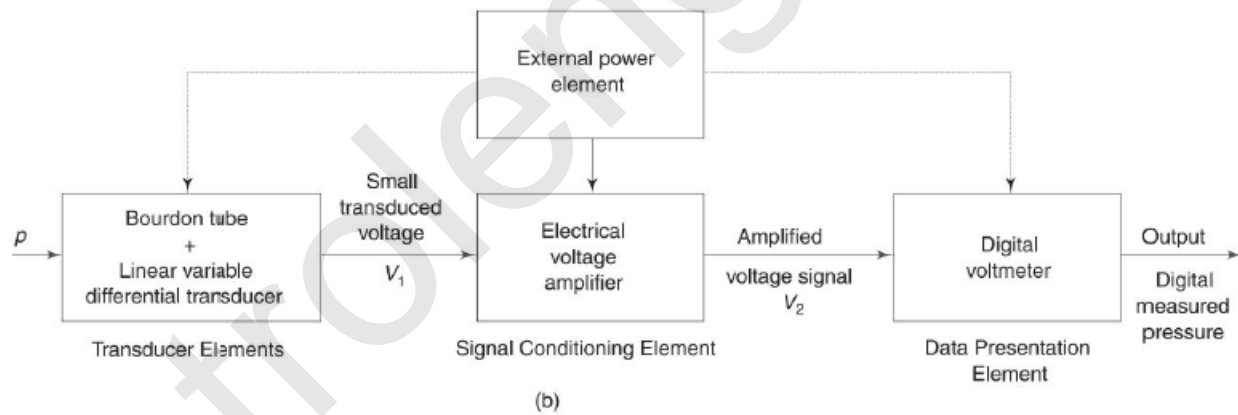
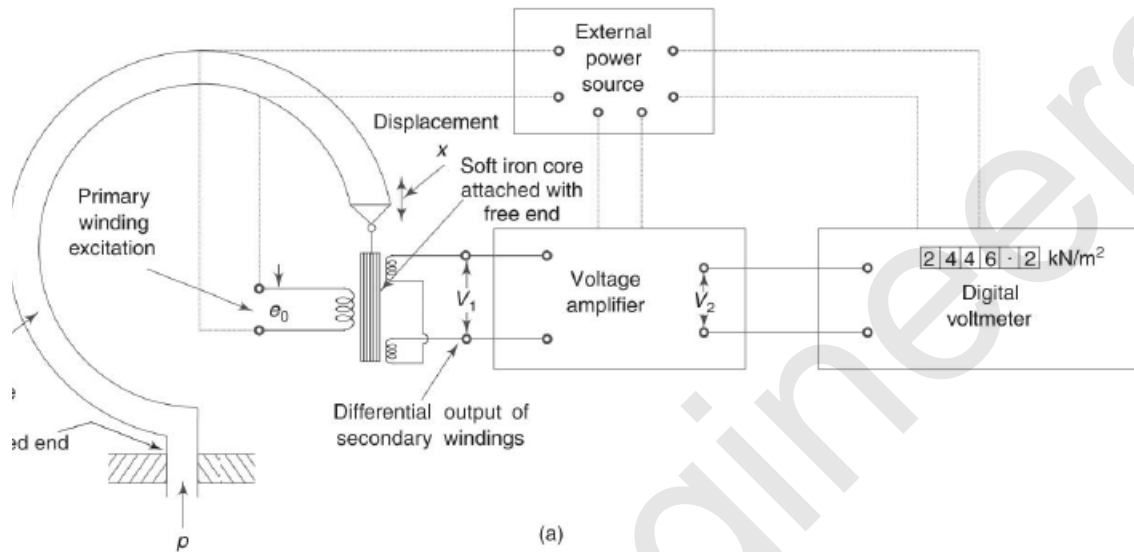


شکل ۱-۳. (a) فشارسنج لوله بوردن (b) عناصر عملکردی فشارسنج بوردن

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

مثال ۲. فشارسنج بوردن با خروجی الکتریکی



شکل ۱-۴. فشارسنج بوردن با خروجی الکتریکی و عناصر عملکردی آن

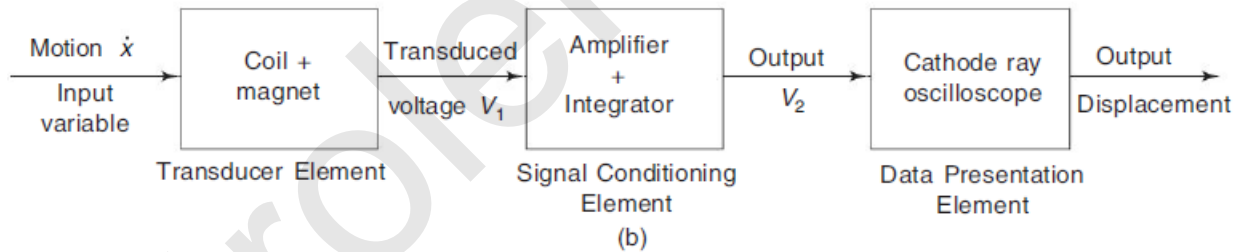
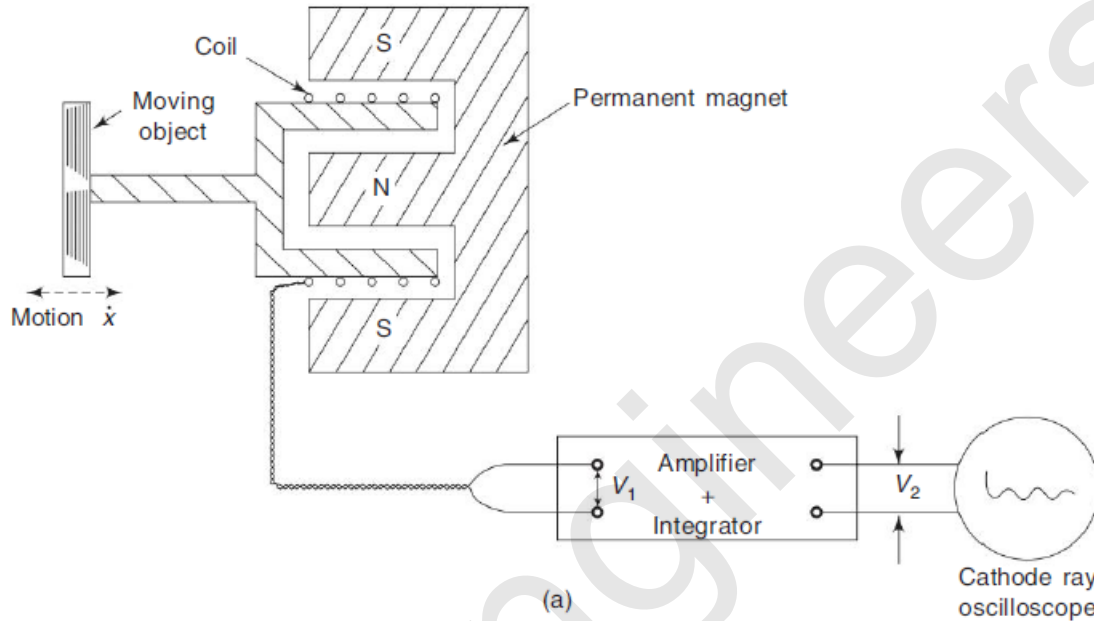
مزیت: خروجی ابزار الکتریکی است و مناسب برای signal conditioning

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

مثال ۳. وسیله اندازه‌گیری جابه‌جایی الکترو‌دینامیکی

برای اندازه‌گیری جابه‌جایی خطی، وسیله‌ای مبتنی بر اصل الکترو‌دینامیکی به کار می‌رود.



شکل ۱-۵. نوع الکترو‌دینامیکی وسیله اندازه‌گیری جابه‌جایی و عناصر عملکردی آن

۱-۳-۱. Transducer element

اگر واحدهای ابعادی سیگنال‌های ورودی و خروجی یکسان باشند، عنصر عملکردی ترانسفورماتور نامیده می‌شود.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

<i>S. No.</i>	<i>Input variable to transducer</i>	<i>Output variable of transducer</i>	<i>Principle of operation</i>	<i>Type of device</i>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1.	Temperature	Voltage	An emf is generated across the junctions of two dissimilar metals or semiconductors when that junction is heated	Thermocouple
2.	Temperature	Displacement	There is a thermal expansion in volume when the temperature of liquids or liquid metals is raised and this expansion can be shown as displacement of the liquid in the capillary	Liquid in Glass Thermometer
3.	Temperature	Resistance change	Resistance of pure metal wire with positive temperature coefficient varies with temperature	Resistance Thermometer
4.	Temperature	Resistance change	Resistance of certain metal oxides with negative temperature varies exponentially with temperature	Thermistor
5.	Temperature	Pressure	The pressure of a gas or vapour varies with the change in temperature	Pressure Thermometer
6.	Displacement	Inductance change	The differential voltage of the two secondary windings varies linearly with the displacement of the magnetic core	Linear Variable Differential Transducer (LVDT)
7.	Displacement	Resistance change	Positioning of a slider varies the resistance in a potentiometer or a bridge circuit	Potentiometric Device
8.	Motion	Voltage	Relative motion of a coil with respect to a magnetic field generates a voltage	Electrodynamic Generator
9.	Flow rate	Pressure	Differential pressure is generated between the main pipeline and throat of the Venturimeter/Orificemeter	Venturimeter/Orifice-meter

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
10.	Flow velocity	Resistance change	Resistance of a thin wire/film is varied by convective cooling in stream of gas/liquid flows	Hot Wire Anemometer (gas flows), Hot Film Anemometer (liquid flows)
11.	Pressure	Movement of a liquid column	The impressed pressure is balanced by the pressure generated by a column of liquid	Manometer
12.	Pressure	Displacement	The application of pressure causes displacement in elastic elements	Bourdon Gauge
13.	Vacuum pressure	Resistance change	Resistance of a heating element varies with the corresponding change in thermal conductivity	Pirani Gauge
14.	Force	Displacement	The application of force against a spring changes its length in proportion to the applied force	Spring Balance
15.	Force/torque	Resistance change	The resistance of metallic wire or semiconductor element is changed by elongation or compression due to externally applied stress	Resistance Strain Gauge
16.	Force	Voltage	An emf is generated when external force is applied on certain crystalline materials such as quartz	Piezo-electric Device
17.	Liquid level/thickness	Capacitance change	Variation of the capacitance due to the changes in effective dielectric constant	Dielectric gauge
18.	Speech/music/noise	Capacitance change	Sound pressure varies the capacitance between a fixed plate and a movable diaphragm	Condenser Microphone
19.	Light intensity	Voltage	A voltage is generated in a semiconductor junction when radiant energy stimulates the photoelectric cell	Light Meter/Solar Cell
20.	Light intensity	Resistance change	Resistance of certain semiconductors, which are light dependant resistors, varies with the intensity of light.	Photoconductive cell
21.	Light radiations	Current	Secondary electron emission due to incident radiations on the photo-sensitive cathode causes an electronic current	Photomultiplier tube
22.	Humidity	Resistance change	Resistance of a conductive strip changes with the moisture content	Resistance Hygrometer
23.	Blood flow/any other gas or liquid or two-phase flow	Frequency shift	The difference in the frequency of the incident and reflected beams of ultrasound known as Doppler's frequency shift is proportional to the flow velocity of the fluid	Doppler Frequency Shift Ultrasonic Flow Meter
24.	Magnetic flux/current	Hall effect voltage change	Hall effect voltage change is produced across a semiconductor plate in the direction perpendicular to both impressed magnetic field and applied current	Hall effect sensor

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

مشخصات مطلوب Transducer element :

- باید سیگنال ورودی موردنظر را بشناسد و حس کند و نسبت به سایر سیگنال‌های حاضر در محیط اندازه‌گیری غیرحساس باشد.
- نباید پدیده اندازه‌گیری شونده را تغییر دهد.
- خروجی ترجیحاً باید الکتریکی باشد تا بتوان از مزیت‌های دستگاه‌های محاسباتی و نمایشگر مدرن استفاده کرد.
- صحت (Accuracy) خوبی داشته باشد.
- تکرارپذیری (Reproducibility) خوبی داشته باشد.
- Linearity دامنه داشته باشد.
- پاسخ فرکانسی کافی (Adequate) داشته باشد.
- اعوجاج فاز (Phase distortion) ایجاد نکند.
- بتواند در محیط‌های نامناسب بدون آسیب دیدن مقاومت کند و بتواند صحت (Accuracy) را در محدوده قابل قبولی حفظ کند.
- سطح سیگنال بالا و امپدانس پایین داشته باشد.
- به سهولت در دسترس باشد و قیمت معقولی داشته باشد و ترجیحاً قابل حمل باشد.
- قابلیت اطمینان (Reliability) و استحکام (Ruggedness) خوبی داشته باشد.
- درجه‌بندی Transducer باید کافی باشد و نباید خراب شود.

۱-۲-۳. Signal conditioning element

انواع عملیات Signal conditioning :

• تقویت (Amplification)

• Signal filtration

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

- جبران سازی سیگنال / خطی سازی سیگنال
- مشتق گیری / انتگرال گیری
- تبدیل آنالوگ به دیجیتال
- متوسط گیری سیگنال / نمونه برداری سیگنال

انواع تقویت کننده:

- تقویت کننده مکانیکی نظیر اهرمها، چرخ دنده ها یا ترکیبی از هر دو
- تقویت کننده هیدرولیکی / نیوماتیکی با استفاده از انواع گوناگون شیرها یا موانع
- تقویت کننده نوری که در آن عدسی ها، آینه ها و ترکیبی از آنها به کار می رود.
- تقویت کننده الکتریکی که در آنها مدارهای ترانزیستوری، مدارهای مجتمع به کار می رود.

انواع Signal filtration:

- فیلترهای مکانیکی که شامل اجزا مکانیکی برای حفاظت Transducer element در برابر تاثیر سیگنال های نامربوط تداخل کننده گوناگون است.
- فیلترهای نیوماتیکی که شامل Orifice یا Venturi کوچکی برای فیلتر نوسانات سیگنال فشار است.
- فیلترهای الکتریکی که برای حذف اختلالات ناشی از میدان های الکتریکی و مغناطیسی ایجاد می شوند.

۱-۳-۳. بخش نمایش داده

ویژگی های این بخش:

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

- پاسخ تا حد ممکن سریع داشته باشد.
- مقاومت تا حد امکان کمی به سیستم وارد کند.
- لختی، اصطکاک و چسبندگی خیلی کمی داشته باشد.

اگر خروجی **Signal conditioning** به صورت دیجیتال باشد می توان آن سیگنال را به صورت تصویری بر روی یک وسیله نمایش دیجیتال نمایش داد. همچنین با استفاده از وسیله مناسب ضبط نمود.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

فصل اول

۴-۱. دسته‌بندی ابزار

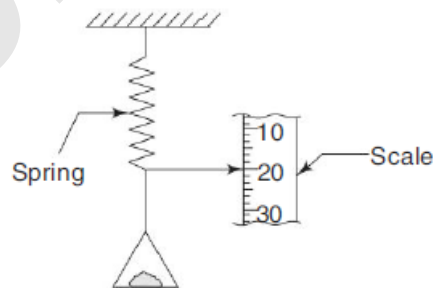
دسته‌بندی ابزاری که در عمل مورد استفاده قرار می‌گیرند:

- Deflection and Null Types
- Manually Operated and Automatic Types
- Analog and Digital Types
- Self-Generating and Power-Operated Types
- Contacting and Non-Contacting Types
- Dumb and Intelligent Types

۱-۴-۱. Deflection and Null Types

- Deflection type

وسایلی هستند که در آنها اثر فیزیکی ایجادشده توسط کمیت مورد اندازه‌گیری اثر مخالف معادلی در بعضی از قسمت‌های ابزار ایجاد می‌کند که به بعضی از متغیرها مانند جابه‌جایی مکانیکی در ابزار مربوط می‌شود.



شکل ۱-۶. دستگاه ترازوی فنری (نوع Deflection)

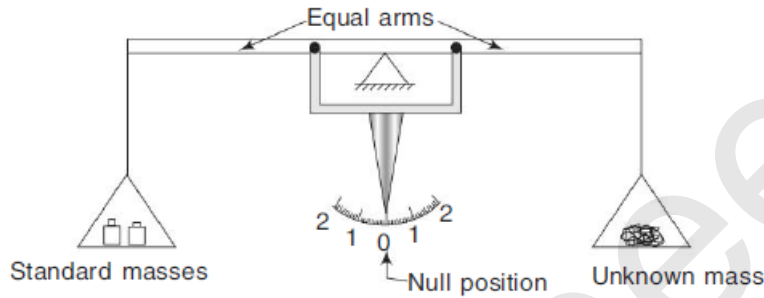
ابزار اندازه‌گیری بانحراف از نظر ساختار و عملکرد ساده‌اند.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

Null type •

وسیله‌ای است که با دستگاه متعادل‌کننده دستی یا خودکاری ایجاد می‌شود که اثر مقابله‌کننده معادلی را برای خشتی کردن اثر فیزیکی کمیت مورد اندازه‌گیری ایجاد می‌کند.



شکل ۱-۷. Equal arm beam balance

اندازه‌گیری این‌گونه ابزار بسیار دقیق است.

نوع دستی آن‌ها عملکرد بسیار کندی دارند.

۱-۴-۲. Manually Operated and Automatic Types

Manually Operated Type •

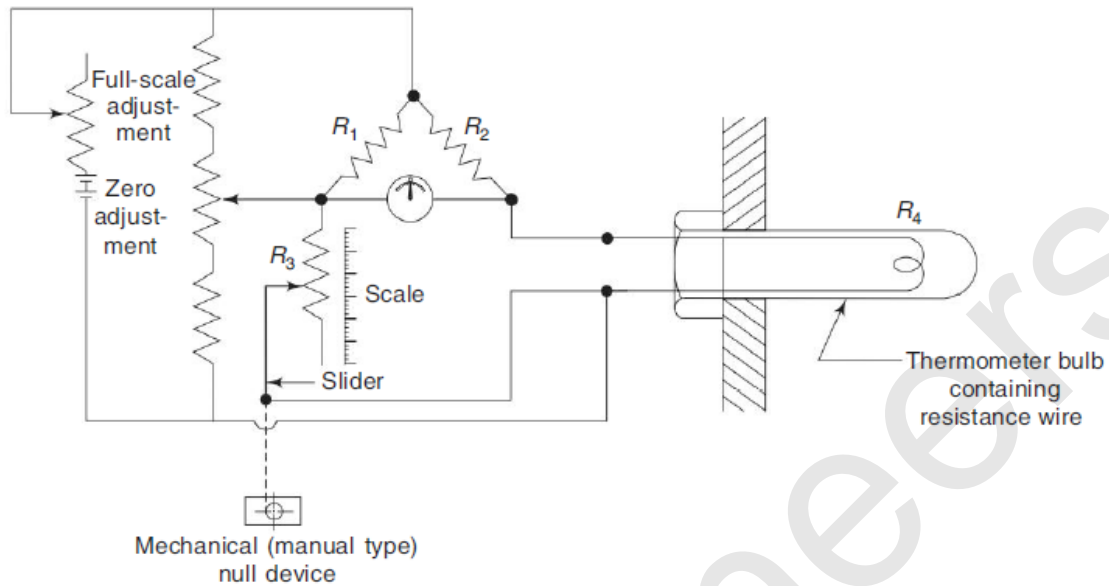
هر وسیله‌ای که به کمک عملگر انسانی نیاز داشته باشد، نوع دستی به‌شمار می‌رود.

Automatic Type •

اگر عملکرد دستی با یک وسیله کمکی تعبیه‌شده در وسیله جایگزین شود، وسیله خودکار می‌شود. پاسخ دینامیکی وسیله خودکار سریع است.

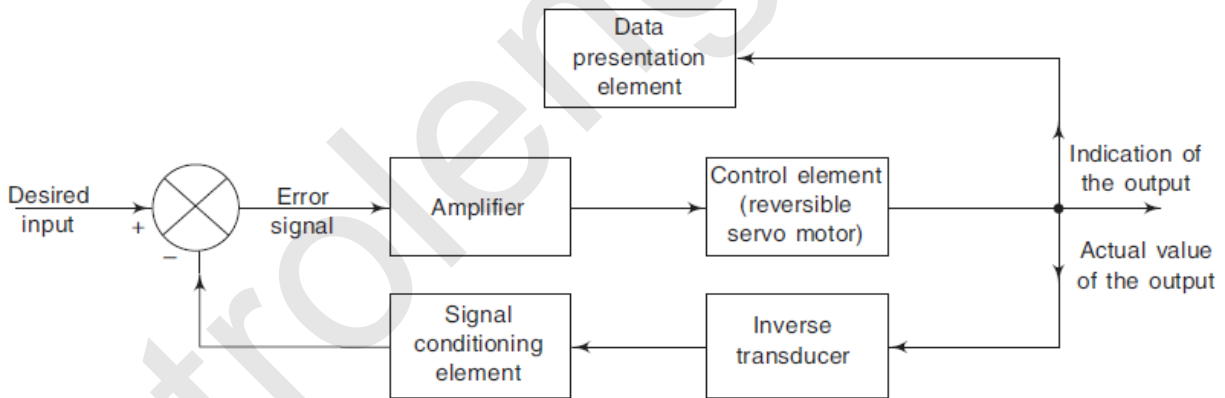
Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۸-۱ Manual type null-bridge resistance thermometer

برای به دست آوردن Null position نیاز به عملیات دستی دارد.



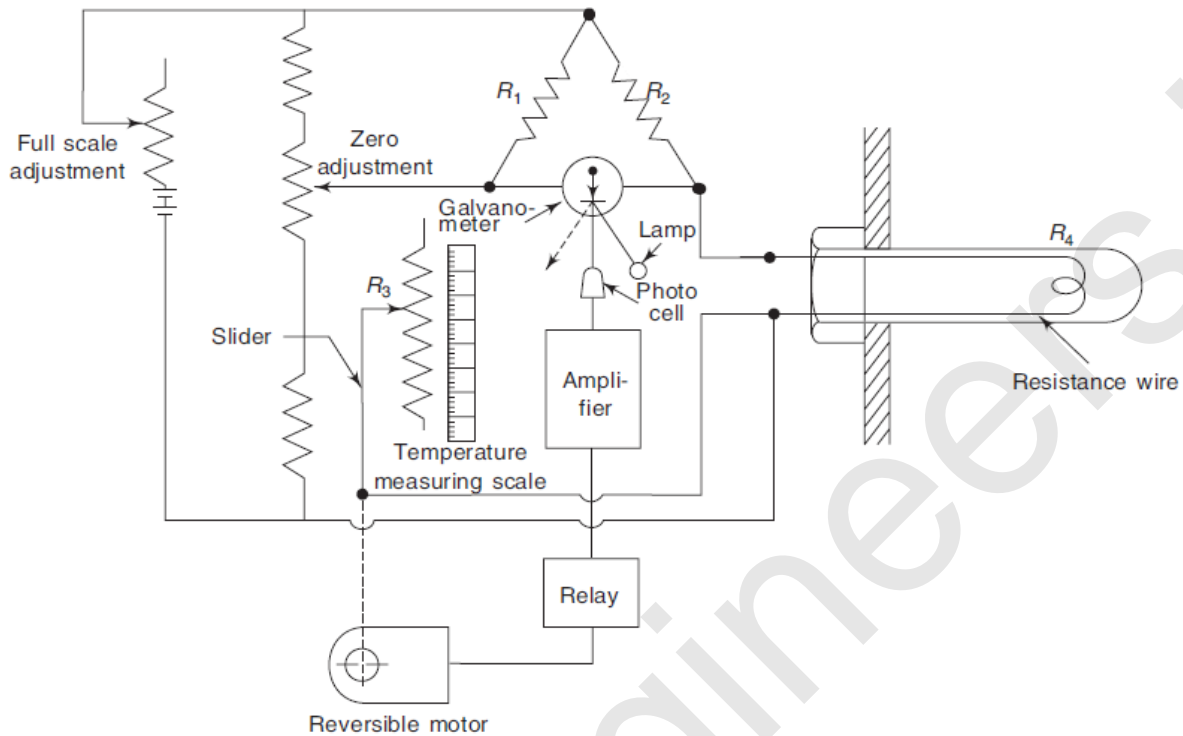
شکل ۹-۱. بلوک دیاگرام Automatic self-balancing feedback measuring system

حلقه فیدبک عمل ردیابی ورودی دلخواه را به طور اتوماتیک تا محوشدن سیگنال خطا انجام می دهد.

این وسیله برای وسایل Null-seeking potentiometric یا پل و تستون مناسب است.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۱-۱۰. Automatic type null-bridge resistance thermometer

مزیت: گالوانومتر تحت تاثیر هیچ بار فیزیکی قرار نمی گیرد.

وسایل اتوماتیک Servo-controlled یا Self-balancing به طور وسیع در صنعت استفاده می شوند.

۱-۴-۳. انواع آنالوگ و دیجیتال

- وسایل اندازه گیری آنالوگ

آنهایی هستند که متغیرهای فیزیکی مورد نظر را به شکل تغییرات پیوسته یا بدون پله نسبت به زمان نشان می دهند.

مزیت: قیمت آنها معمولا کم است و نگهداری و تعمیر آنها آسان است.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

وسایل دیجیتالی

آنهایی هستند که متغیرهای فیزیکی را توسط کمیت‌های دیجیتالی که به صورت منقطع و پله‌ای تغییر می‌کنند، نشان می‌دهند.

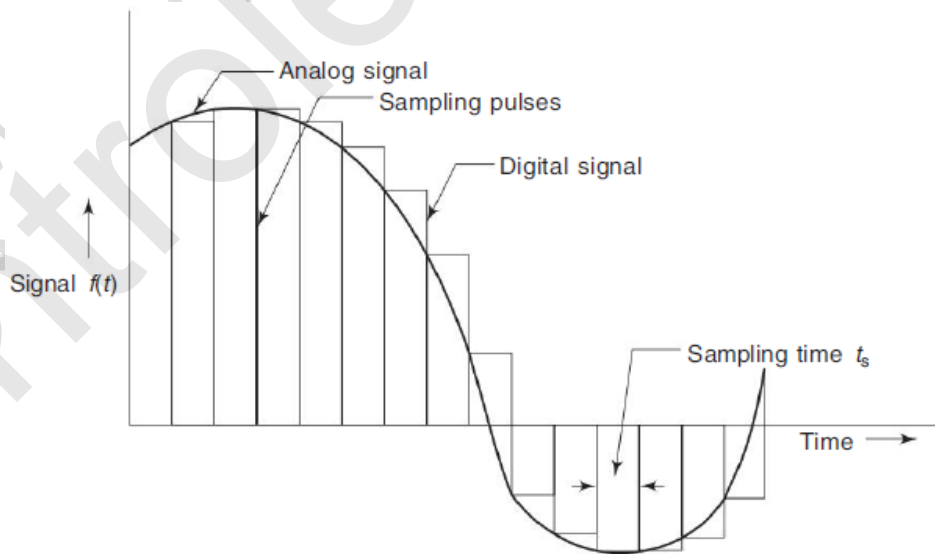
عیب: نمی‌توانند مقداری را که کسری از مقدار پله‌ای وسیله است، نشان دهد.

مزیت:

- استفاده آنلاین از کامپیوترهای دیجیتال برای پردازش داده‌ها
- ایمنی سیگنال‌های دیجیتال در برابر نویز در موقع انتقال

تبدیل آنالوگ به دیجیتال:

- مرحله اول: نمونه‌برداری
- مرحله دوم: تعیین مقدار دیجیتال مربوطه به صورت کد دودویی



شکل ۱-۱۱. نمونه‌برداری نوعی سیگنال آنالوگ برای مقادیر دیجیتال متناظر

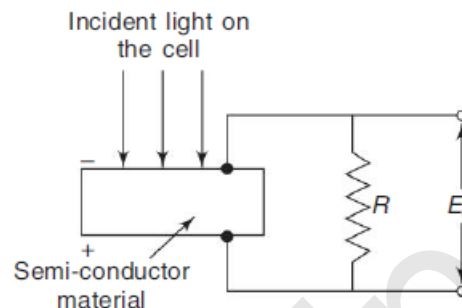
Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

۴-۴-۱. انواع Self-Generating و Power-Operated

• ابزار (Passive) Self-Generating

انرژی مورد نیاز کاملاً از سیگنال ورودی تامین می‌شود.



شکل ۱-۱۲. Schematic diagram of a photovoltaic cell (self-generating type of instrument)

نمونه‌های متداول: فشارسنج بردن، دماسنج جیوه‌ای، تاکومتر

• ابزار (Active) Power-Operated

آن‌هایی هستند که برای کارکردشان به نوعی منبع توان کمکی مانند هوای متراکم، منبع هیدرولیکی نیاز دارند. در این ابزار، سیگنال ورودی فقط بخش کوچکی از توان خروجی را تامین می‌کند. برای نمونه، ترانسفورماتور تفاضلی که در اندازه‌گیری جابه‌جایی، نیرو، فشار و ... به کار می‌رود.

۵-۴-۱. انواع Contacting و Non-Contacting

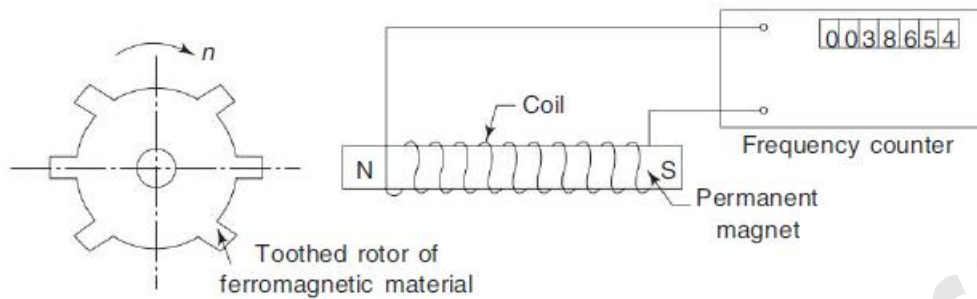
در نوع Contacting ابزار مستقیماً در محیط اندازه‌گیری قرار می‌گیرد نظیر دماسنج پزشکی.

در نوع Non-Contacting یا Proximity حتی اگر در تماس نزدیک با محیط اندازه‌گیری نباشند، ورودی مورد نظر

را اندازه‌گیری می‌کنند. نظیر Optical pyrometer monitors و دورسنج با مقاومت مغناطیسی متغیر

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



Schematic diagram of variable reluctance tachometer (proximity type of شکل ۱-۱۳. instrument)

۱-۴-۶. انواع Dumb و Intelligent

ابزار Dumb یا معمولی، ابزاری است که در آن متغیر ورودی اندازه‌گیری و نمایش داده می‌شود اما داده‌ها توسط ناظر پردازش می‌شوند. برای مثال Bourdon pressure gauge

ابزار Intelligent یا Smart شامل:

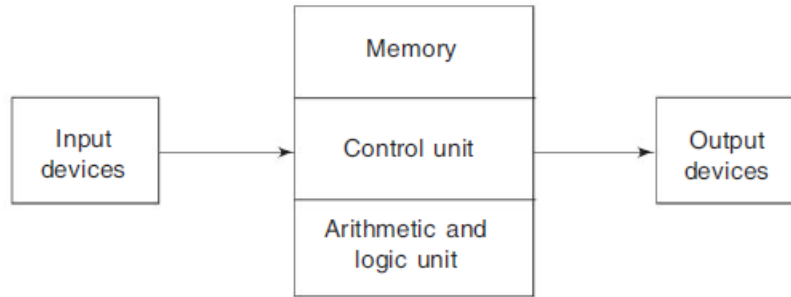
- خروجی ترنسدیوسر به شکل الکتریکی
- خروجی ترنسدیوسر باید به صورت دیجیتال باشد
- رابط (Interface) با کامپیوتر دیجیتال
- روتین‌های نرم‌افزاری برای کاهش نویز، تخمین خطا، خود کالیبراسیون، تنظیم بهره و ...
- روتین‌های نرم‌افزاری برای درایور خروجی برای نمایش مناسب یا ارائه خروجی کد ASCII سریال

۱-۵. ابزار مبتنی بر میکروپروسور

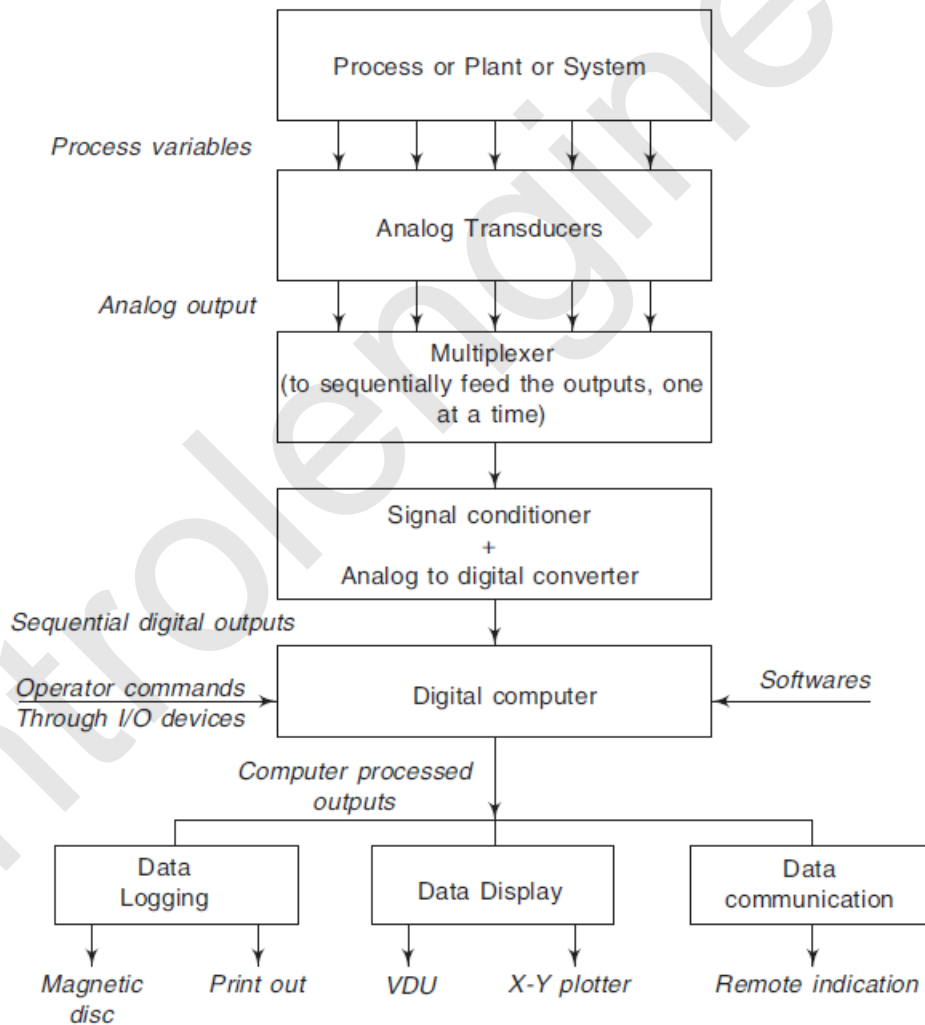
ابزار مبتنی بر میکروپروسور، ابزار هوشمند نیز نامیده می‌شوند.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۱-۱۴. Digital computer system



شکل ۱-۱۵. A typical digital computer based measurement system

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

مزیت‌ها:

- طوری برنامه‌ریزی شده‌اند که به‌طور اتوماتیک وظایف عادی مانند تصحیح Drift، کاهش/حذف نویز، تصحیح غیرخطی، تنظیم بهره، تنظیم رنج و اسپن، کالیبراسیون را انجام دهند.
- این ابزارها دارای Signal conditioning و نمایشگر داده هستند که فشرده و قابل اعتماد است و قادر به عملکرد در شرایط سخت، صنعتی، نظامی و ... هستند.
- اغلب آن‌ها زیربرنامه‌های تشخیصی داخلی دارند که می‌تواند عیب را تشخیص داده و به‌طور اتوماتیک آن‌را اصلاح کند. اگر نتواند عیب را اصلاح کند آلام مناسب تولید می‌کند.
- اندازه‌گیری، پردازش و نمایش داده‌های متغیرهای فرایند به‌صورت Real time انجام می‌شود.
- چنین ابزارهایی را می‌توان با کنترل از راه دور برنامه‌ریزی و یا تنظیم کرد.
- آن‌ها هزینه کمتر، Accuracy بالاتر و Flexibility بیشتری دارند.
- به‌دلیل Compact بودن، بیشتر از نوع قابل حمل هستند.
- به‌دلیل داشتن مصرف کم، می‌توانند با باتری کار کنند.
- نیازی به عملیات ماهرانه (Skilled Operation) ندارند.

معایب:

- آن‌ها نمی‌توانند برنامه‌نویس کامپیوتر یا طراح ابزارها را جایگزین کنند، یعنی نمی‌توانند برنامه‌ها را خودشان تغییر دهند.
- به داده‌های پردازشی در فرم دیجیتال نیاز دارند.
- نرم‌افزارهای کامپیوتری تجاری خیلی سریع منسوخ می‌شوند و به‌روزرسانی دوره‌ای آن مستلزم هزینه‌های اضافی است.
- آن‌ها مستعد مشکلات ویروسی هستند و می‌توانند غیرفعال شوند.

فصل اول

۱-۶. استانداردها و کالیبراسیون

اندازه‌گیری یک عمل مقایسه کمی بین یک استاندارد از قبل تعیین شده و مقدار نامعین یک کمیت فیزیکی است.

اندازه‌گیری باید شروط زیر را برآورده کند:

- استاندارد که برای مقایسه به کار می‌رود باید **well-established** ، **highly accurate** و **reproducible** باشد.
- وسایل اندازه‌گیری و روش‌های کالیبراسیون به کار رفته در عمل اندازه‌گیری باید قابلیت اعتماد اثبات شده داشته باشند.

۱-۶-۱. استانداردهای اندازه‌گیری

استاندارد اندازه‌گیری به‌عنوان نمایش فیزیکی واحد اندازه‌گیری تعریف می‌شود.

واحد اندازه‌گیری عموماً با مراجعه به یک استاندارد ماده دلخواه یا به یک پدیده طبیعی که شامل ثابت‌های فیزیکی و اتمی است انتخاب می‌شود. برای مثال واحد SI جرم (کیلوگرم)

استانداردها براساس عملکرد و نوع کاربردشان به استانداردهای بین‌المللی، اولیه، ثانویه و کاری تقسیم‌بندی می‌شوند.

• International standards

استانداردهای بین‌المللی وسایلی هستند که برطبق مشخصات ارائه‌شده در یک گردهمایی بین‌المللی طراحی و ساخته می‌شوند.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

این استانداردها توسط International Bureau of Weights and Measures در سور فرانسه نگهداری می‌شوند.

نمونه ساخته‌شده بین‌المللی کیلوگرم، ساعت سزیمی به ترتیب استانداردهای بین‌المللی وزن و زمان هستند.

این استانداردها برای اهداف مقایسه‌ای و کالیبراسیون روزمره در دسترس کاربر عادی نیستند.

• Primary standards

استانداردهای اولیه وسایلی هستند که توسط موسسات استانداردها/آزمایشگاه‌های ملی در قسمت‌های مختلف جهان نگهداری می‌شوند.

این وسایل به صورت مستقل به وسیله اندازه‌گیری‌های مطلق (Absolute measurements) کالیبره می‌شوند.

یکی از عملکردهای مهم نگهداری استانداردهای اولیه، Calibrate/Check و Certify استانداردهای مرجع ثانویه است.

این استانداردها برای Verification/Calibration استانداردهای کاری به‌آسانی در دسترس کاربر عادی ابزار نیستند.

• Secondary standards

استانداردهای ثانویه استانداردهای مرجع پایه‌ای هستند که در آزمایشگاه‌های اندازه‌گیری صنعتی (همین‌طور در صنعت) به کار رفته و نگهداری می‌شوند.

یکی از کارهای مهم آزمایشگاه صنعتی نگهداری و کالیبراسیون تناوبی استانداردهای ثانویه نسبت به استانداردهای اولیه آزمایشگاه/سازمان استانداردهای ملی است.

استانداردهای ثانویه برای چک‌کردن و کالیبراسیون استانداردهای کاری، به‌آسانی در دسترس کاربر عادی ابزار است.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

Working standards •

این استانداردها وسایل High-accuracy هستند که به صورت تجاری موجودند و چنانچه باید و شاید نسبت به استانداردهای اولیه یا ثانویه چک و تایید می شوند.

استانداردهای کاری به طور وسیعی برای کالیبراسیون وسایل آزمایشگاهی عمومی، برای انجام دادن اندازه گیری های مقایسه ای یا برای چک کردن کیفیت (محدوده Accuracy) محصولات صنعتی به کار می روند.

۱-۶-۲. کالیبراسیون

کالیبراسیون عمل یا نتیجه مقایسه کمی بین یک استاندارد معلوم و خروجی سیستم اندازه گیری است که کمیت یکسانی را اندازه می گیرد.

اگر پاسخ ورودی خروجی سیستم خطی باشد، کالیبراسیون تک نقطه ای کافی است در غیر این صورت، مجموعه ای از ورودی های استاندارد معلوم به سیستم اندازه گیری برای کالیبراسیون خروجی های متناظر سیستم به کار می رود.

Primary Calibration •

وقتی که یک سیستم / وسیله نسبت به استانداردهای اولیه کالیبره می شود، روش را کالیبراسیون اولیه می نامند. برای مثال Standard resistor یا Standard cell.

Secondary Calibration •

وقتی که یک وسیله کالیبراسیون ثانویه برای کالیبراسیون بعدی وسیله دیگری که Accuracy کمی دارد به کار می رود، روش را کالیبراسیون ثانویه نامند.

وسایل کالیبراسیون ثانویه به طور وسیعی در کاربردهای آزمایشگاهی عمومی و صنعت به کار می روند.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

Direct Calibration with known input source •

از نظر مرتبه دقت با کالیبراسیون اولیه یکسان هستند. بنابراین وسایلی که مستقیماً کالیبره می‌شوند نیز به‌عنوان وسایل کالیبراسیون ثانویه به‌کار می‌روند (Flow meter توربینی).

Indirect Calibration •

کالیبراسیون غیرمستقیم مبتنی است بر تعادل دو وسیله مختلف که برای اندازه‌گیری یک کمیت فیزیکی معین به‌کار می‌روند (Flow meter توربینی).

Routine Calibration •

عبارت است از روش مقایسه تناوبی دقت و عملکرد مناسب هر وسیله با استانداردهایی که می‌دانیم به‌دقت قابل تولیدند.

مراحل معمول در روند کالیبراسیون:

- بررسی دقیق ابزار برای یافتن معایب فیزیکی مشهود
- بررسی ابزار برای نصب مناسب برطبق مشخصات داده‌شده از طرف سازنده
- تنظیم صفر کلیه نمایشگرها
- تراز کردن وسایلی که به این اقدام احتیاطی نیاز دارند
- آزمون‌های کاری توصیه‌شده برای یافتن معایب بزرگ
- کالیبره کردن ابزار به‌ترتیب صعودی و همچنین نزولی مقادیر ورودی
- داشتن سطح بالاتری از قابلیت ردیابی استاندارد دستگاه کالیبراسیون در مقایسه با دستگاه کالیبره‌شده

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

ControlEngineers.ir

فصل دوم

مشخصه‌های عملکرد استاتیکی ابزار

۱-۲. مقدمه

ویژگی‌های جزئی مشخصات کارکردی هر ابزار مشخصه‌های عملکرد (Performance characteristics) آن نامیده می‌شوند.

دسته‌بندی مشخصه‌های عملکرد ابزار:

- مشخصه‌های استاتیکی
- مشخصه‌های دینامیکی

نکته.

در حالت کلی کیفیت‌های عملکرد کمی وسایل اندازه‌گیری به وسیله هر دو مشخصه استاتیکی و دینامیکی آنها بیان می‌شوند.

در مورد سیگنال‌های مستقل از زمان تنها مشخصه‌های استاتیکی باید مدنظر قرار گیرند.

۲-۲. خطاها و عدم قطعیت‌ها در پارامترهای عملکرد

پارامترهای عملکرد استاتیکی مختلف ابزار با انجام‌دادن آزمایش‌های معینی بسته به نوع وسیله، طبیعت کاربرد و ... به دست می‌آیند.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

مشکلات:

- تغییر حساسیت وسایل اندازه‌گیری ناشی از برخی اغتشاش‌ها، معمولاً به‌اندازه مقدار خاصی، در همه مقادیر خروجی تاثیر می‌گذارد.
- ناتوانی وسیله اندازه‌گیری برای داشتن خروجی یکسان برای کاربردهای تکراری برای هر مقدار خاص ورودی.

۲-۲-۱. انواع خطاها

خطا: تفاوت بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار واقعی

فصل دوم

۲-۱-۲. انواع خطاها

خطا: تفاوت بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار واقعی

• Systematic or Cumulative Errors

خطاهای منظم یا تجمعی، مقدار و علامت یکسانی را برای مجموعه معینی از شرایط دارند.

این نوع خطا را معمولاً انحراف وسیله اندازه‌گیری نیز می‌نامند.

علل بروز این خطاها:

• خطاهای ابزار (Instrument errors)

علت: طراحی یا ساخت بد ابزار

با انتخاب ابزار مناسب برای کاربرد معین، اعمال تصحیح مناسب بعد از تعیین مقدار خطای ابزار و کالیبراسیون ابزار نسبت به یک استاندارد مناسب می‌توان از بروز خطاهای ابزار جلوگیری کرد.

• خطاهای محیطی (Environmental errors)

تغییرات معمول در شرایط محیطی نظیر تغییرات دما، فشارجو، رطوبت، نیروهای باد، میدانهای مغناطیسی و الکترواستاتیکی و ... ممکن است مشخصات ابزار را تحت تاثیر قرار دهند.

• خطاهای بارگذاری (Loading errors)

در اثر عمل اندازه‌گیری بر سیستم فیزیکی موردآزمایش حاصل می‌شود.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

تقسیم‌بندی خطاهای Systematic :

- خطاهای استاتیک (ناشی از محدودیت‌های ابزار و برخی کمبودها در فرایند اندازه‌گیری)
- خطاهای دینامیک (عدم پاسخ سریع ابزار)

راه‌کار حذف خطاهای Systematic: کالیبراسیون مناسب ابزار

• Accidental or Random Errors

این خطاها به علت تغییرات تصادفی در پارامتر یا سیستم اندازه‌گیری به وجود می‌آیند. از نظر مقدار تغییر می‌کنند و می‌توانند به طور شانسی مثبت یا منفی باشند.

آن‌ها را Chance or compensating type of errors نیز می‌نامند.

عوامل اصلی ایجاد Random errors:

- Inconsistencies associated with accurate measurement of small quantities

- Presence of certain system defects

معایبی نظیر تلرانس‌های ابعادی بزرگ در قطعات مجاور موجب خطای Backlash می‌شود

اصطکاک نیز باعث کندی در یاتاقان‌های ابزار می‌گردد

روش شناسایی و اصلاح: براساس Method of symmetry

- Effect of unrestrained and randomly varying parameters

• Miscellaneous Type of Gross Errors

خطاهایی هستند که تاحدی Systematic و تاحدی Random اند.

عوامل بروز این خطاها:

- خطاهای انسانی یا شخصی (Systematic و یا Random)
- خطاهای ناشی از اجزا معیوب / تنظیمها
- کاربرد نامناسب ابزار

۲-۲-۲. انواع Uncertainty

خطاهای Random و جز Random خطاهای Gross، منبع اصلی Uncertainty در آزمایشها را تشکیل می دهند.

انحرافات Random و علامت جبری آنها از تابع توزیع نرمال یا گوسی تبعیت می کند.

• برآورد یا تخمین خارجی Uncertainty

این پارامتر (U_E) معمولاً از معلومات آزمایش، محدودیت دستگاه، دفترچه راهنمای سازنده ابزار برآورد می شود. در صورت نبود اطلاعات، Resolution به عنوان برآورد خارجی Uncertainty در نظر گرفته می شود.

• برآورد یا تخمین داخلی Uncertainty

این نوع Uncertainty (U_I) پارامتری است که ذاتی خود دادهها است و تعیین کمی آنها برآورد داخلی Uncertainty می نامند.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

دلیل ایجاد: هر بار که ورودی معینی به ابزار داده می‌شود و سله ممکن است یک مقدار کمی متفاوت را نشان دهد.

برآورد داخلی Uncertainty (خطای معیار داخلی):

- تعداد نسبتاً زیادی از داده از اندازه‌گیری خاصی به دست می‌آید (Population) و فرض می‌شود که شامل همه مقادیر ممکن است.
- Population به قسمت‌های کوچکی به نام Sample تقسیم می‌شود. انتخاب نمونه‌ها بایستی به صورت Random sampling باشد.
- مقدار متوسط و انحراف معیار هر نمونه تعیین می‌شود که به ترتیب به عنوان مقدار واقعی و Uncertainty نمونه در نظر گرفته می‌شوند.
- برای به دست آوردن بهترین برآورد مقدار متوسط، متوسط Population محاسبه می‌شود.
- برای به دست آوردن برآورد کلی Uncertainty، انحراف معیار متوسط نمونه‌ها محاسبه می‌شود.

اگر در آزمایشی برآوردهای خارجی و داخلی Uncertainty از یک مرتبه بزرگی باشند، این آزمایش باثبات در نظر گرفته می‌شود. این معیار موجب حداقل شدن Uncertainty کلی می‌شود. اما اگر این دو خیلی متفاوت باشند، آن وقت معمولاً مقدار بزرگتر به عنوان Uncertainty آزمایش در نظر گرفته می‌شود.

فصل دوم

۲-۲-۲. انواع Uncertainty

خطاهای Random و جز Random خطاهای Gross، منبع اصلی Uncertainty در آزمایش‌ها را تشکیل می‌دهند.

انحرافات Random و علامت جبری آن‌ها از تابع توزیع نرمال یا گوسی تبعیت می‌کند.

• External estimate of uncertainty

این پارامتر (U_E) معمولاً از معلومات آزمایش، محدودیت دستگاه، دفترچه راهنمای سازنده ابزار برآورد می‌شود. در صورت نبود اطلاعات، Resolution به‌عنوان External estimate of uncertainty در نظر گرفته می‌شود.

• Internal estimate of uncertainty

این نوع Uncertainty (U_I) پارامتری است که ذاتی خود داده‌ها است و تعیین کمی آنرا Internal estimate of uncertainty می‌نامند.

هر بار که ورودی معینی به ابزار داده می‌شود وسیله ممکن است یک مقدار کمی متفاوت را نشان دهد.

Internal estimate of uncertainty (خطای Internal standard):

- تعداد نسبتاً زیادی از داده از اندازه‌گیری خاصی به‌دست می‌آید (Population) و فرض می‌شود که شامل همه مقادیر ممکن است.

- Population به قسمت‌های کوچکی به‌نام Sample تقسیم می‌شود. انتخاب نمونه‌ها بایستی به‌صورت Random sampling باشد.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

- مقدار Mean و Standard deviation هر نمونه تعیین می‌شود که به ترتیب به عنوان مقدار واقعی و Uncertainty نمونه در نظر گرفته می‌شوند.
- برای به دست آوردن بهترین estimate مقدار متوسط، متوسط Population محاسبه می‌شود.
- برای به دست آوردن برآورد کلی Overall estimate of uncertainty، Standard deviation متوسط نمونه‌ها محاسبه می‌شود.

اگر در آزمایشی estimate های خارجی و داخلی Uncertainty از یک مرتبه بزرگی باشند، این آزمایش باثبات در نظر گرفته می‌شود. این معیار موجب حداقل شدن Overall uncertainty می‌شود. اما اگر این دو خیلی متفاوت باشند، آن وقت معمولاً مقدار بزرگتر به عنوان Uncertainty آزمایش در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳. برآورد یا تخمین انتشار عدم قطعیت در کمیت‌های مرکب

برای محاسبه Overall uncertainty ناشی از اثر ترکیبی Uncertainty های متغیرهای مختلف رابطه کلی زیر را در نظر بگیرید:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

y : پارامتری است که به متغیرهای مستقل x_1 ، x_2 ، ... و x_n بستگی دارد

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n$$

کمیت‌های dy ، dx_1 ، dx_2 ، ...، dx_n ، Uy ، Ux_1 ، ...، Ux_n به ترتیب در کمیت‌های y ، x_1 ، x_2 ، ... و x_n

$$Uy = \frac{\partial y}{\partial x_1} Ux_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} Ux_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} Ux_n$$

بدترین حالت ممکن زمانی است که همه Uncertainty ها علامت یکسان داشته باشند.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

$$U_{y_{\max}} = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} U_{x_1} \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} U_{x_2} \right| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} U_{x_n} \right|$$

روش واقعی تر:

$$U_y^2 = \left\{ \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 (U_{x_1})^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 (U_{x_i})^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 (U_{x_n})^2 \right\} + \left\{ \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right) \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right) (U_{x_1}) (U_{x_2}) + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \right) (U_{x_i}) (U_{x_j}) + \dots \right\}$$

با توجه به احتمال مساوی برای مثبت یا منفی بودن می توان نوشت:

$$U_y = \pm \left\{ \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 (U_{x_1})^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 (U_{x_i})^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 (U_{x_n})^2 \right\}^{1/2}$$

$$\text{Overall internal estimate uncertainty : } (U_I)_{\text{overall}} = \pm \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 (U_{x_i})^2 \right]^{1/2}$$

مسئله.

در آزمایش انجام شده توسط n فرد مختلف، مقدار متوسط ضریب اصطکاک استاتیکی μ بین دو صفحه معین با تکرار آزمایش به تعداد m بار تعیین می شود. اگر خطای برآورد شده هر فرد از مرتبه انحراف معیار در داده هایش باشد، بهترین برآورد ضریب اصطکاک استاتیکی و Internal estimate of the uncertainty را بر مبنای نتایج همه افراد تعیین کنید.

حل:

$$(\bar{\mu})_{\text{pop}} = \frac{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n}{n}$$

با توجه به $(U_I)_{\text{overall}} = \pm \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 (U_{x_i})^2 \right]^{1/2}$ می توان نوشت:

$$(U_I)_{\text{overall}}^2 = \left(\frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \mu_1} \right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \mu_2} \right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial \bar{\mu}}{\partial \mu_n} \right)^2 \sigma_n^2$$

$$(U_I)_{\text{overall}}^2 = \left(\frac{1}{n} \right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{1}{n} \right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{1}{n} \right)^2 \sigma_n^2 = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2}{n^2}$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

Standard deviation: $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ در آزمایش هر فرد

فرض: Estimated error در هر مورد از مرتبه یکسان است

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_n = \sigma$$

$$\Rightarrow (U_I)_{overall}^2 = \frac{n\sigma^2}{n^2} \quad \Rightarrow (U_I)_{overall} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

نکته.

به طور کلی برآورد داخلی Uncertainty، خطای دقت وسیله اندازه گیری را نشان می دهد. بنابراین برای هر وسیله ای می توان نوشت:

$$x = \bar{X} \pm U_I$$

Population mean : \bar{X}

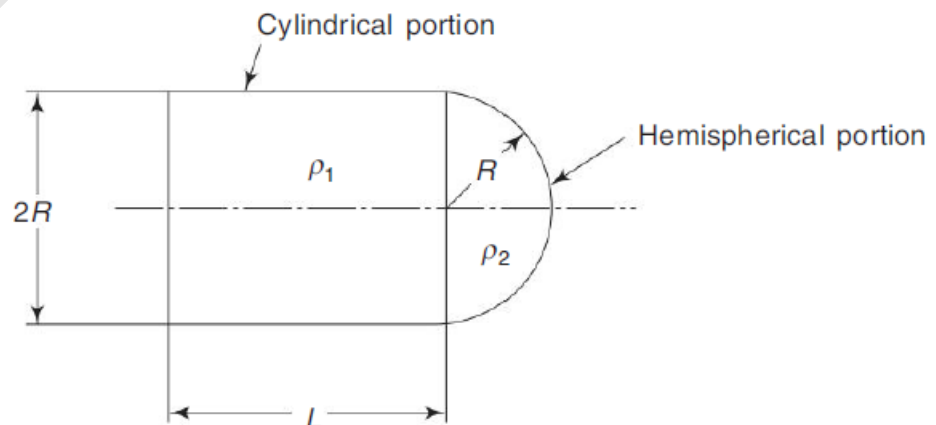
Internal estimate of the uncertainty : U_I

مثال ۱-۲.

ابعاد و چگالی تخمین زده شده جسم:

$$L = (10.0 \pm 0.1) \text{ cm} , \quad R = (4.00 \pm 0.05) \text{ cm}$$

$$\rho_1 = (3.50 \pm 0.10) \text{ g/cm}^3 , \quad \rho_2 = (2.50 \pm 0.05) \text{ g/cm}^3$$



Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

هدف: تعیین مقدار جرم کل جسم و Overall uncertainty

حل:

$$M_T = M_{cylinder} + M_{hemisphere}$$

$$M_T = \pi R^2 L \rho_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) \rho_2$$

$$(M_T)_{av} = \pi(4)^2(10) \times 3.5 + \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \pi \times 4^3 \right) \times 2.5 \Rightarrow (M_T)_{av} = 2094.39 \text{ g}$$

با توجه به $(U_T)_{overall} = \pm \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 (U_{x_i})^2 \right]^{1/2}$ می توان نوشت:

$$(U)_{M_T}^2 = \left(\frac{\partial M_T}{\partial R} \right)^2 U_R^2 + \left(\frac{\partial M_T}{\partial L} \right)^2 U_L^2 + \left(\frac{\partial M_T}{\partial \rho_1} \right)^2 U_{\rho_1}^2 + \left(\frac{\partial M_T}{\partial \rho_2} \right)^2 U_{\rho_2}^2$$

$$\left(\frac{\partial M_T}{\partial R} \right) = 2\pi R L \rho_1 + 2\pi R^2 \rho_2 = 2\pi R (L \rho_1 + R \rho_2)$$

$$\left(\frac{\partial M_T}{\partial L} \right) = \pi R^2 \rho_1$$

$$\left(\frac{\partial M_T}{\partial \rho_1} \right) = \pi R^2 L$$

$$\left(\frac{\partial M_T}{\partial \rho_2} \right) = \frac{2}{3} \pi R^3$$

$$\Rightarrow (U)_{M_T}^2 = \{ (2\pi)(4)((10 \times 3.5) + (4 \times 2.5)) \}^2 (0.05)^2 + (\pi \times 4^2 \times 3.5)^2 (0.1)^2 + (\pi \times 4^2 \times 10)^2 (0.1)^2 + \left(\frac{2}{3} \pi 4^3 \right)^2 (0.05)^2$$

$$\Rightarrow (U)_{M_T}^2 = 3080.91 \Rightarrow (U)_{M_T} = 55.51 \text{ g}$$

Total mass of the composite body: $M_T = 2094.39 \pm 55.51 \text{ g}$

$$\% \text{ Uncertainty in total mass: } = \frac{55.51}{2094.39} \times 100 = \pm 2.65\%$$

مثال ۲-۲.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

معادله Hagen-Poiseuille:

$$Q = \frac{\pi D^4}{128 \eta L} \Delta P$$

Q : نرخ فلوی حجمی سیال در لوله موئین

D : قطر لوله

η : ضریب ویسکوسیتی دینامیکی سیال

L : طول لوله

ΔP : اختلاف فشار در دو انتهای لوله

الف) اگر Q ، L ، D و ΔP با عدم قطعیت $\pm 1\%$ اندازه گیری شوند، η با چه دقتی به دست می آید.

ب) اگر Uncertainty اندازه گیری D با استفاده از ابزار بهبود یافته تا $\pm 0.1\%$ کاهش یابد، بهبود حاصل در عدم قطعیت η چقدر خواهد بود؟

حل:

الف) از معادله Viscometer:

$$Q = \frac{\pi D^4}{128 \eta L} \Delta P \Rightarrow \eta = \frac{\pi D^4}{128 Q L} \Delta P \Rightarrow \eta = f(D, Q, L, \Delta P)$$

با توجه به $(U_{\eta})_{overall} = \pm \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 (U_{x_i})^2 \right]^{1/2}$ می توان نوشت:

$$(U_{\eta})_{overall}^2 = \left(\frac{\partial \eta}{\partial D} \right)^2 U_D^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial Q} \right)^2 U_Q^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial L} \right)^2 U_L^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial (\Delta P)} \right)^2 U_{\Delta P}^2$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial D} = \frac{\pi D^3}{32 Q L} \Delta P$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

$$\frac{\partial \eta}{\partial Q} = -\frac{\pi D^4}{128 Q^2 L} \Delta P$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial L} = -\frac{\pi D^4}{128 Q L^2} \Delta P$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial (\Delta P)} = \frac{\pi D^4}{128 Q L}$$

برای محاسبه Overall uncertainty در اندازه‌گیری η :

$$\frac{(U_I)_{overall}^2}{\eta^2} = \left\{ \frac{\pi D^3 \Delta P}{32 Q L} \right\}^2 \cdot U_D^2 + \left\{ \frac{-\pi D^4 \Delta P}{128 Q^2 L} \right\}^2 \cdot U_Q^2 + \left\{ \frac{-\pi D^4 \Delta P}{128 Q L^2} \right\}^2 \cdot U_L^2 + \left\{ \frac{\pi D^4}{128 Q L} \right\}^2 \cdot U_{\Delta P}^2$$

$$\Rightarrow \frac{(U_I)_{overall}^2}{\eta^2} = 16 \left\{ \frac{U_D^2}{D^2} \right\} + \left\{ \frac{U_Q^2}{Q^2} \right\} + \left\{ \frac{U_L^2}{L^2} \right\} + \left\{ \frac{U_{\Delta P}^2}{(\Delta P)^2} \right\}$$

$$\Rightarrow \frac{(U_I)_{overall}}{\eta} = [16 (0.01)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2]^{1/2}$$

$$\Rightarrow \frac{(U_I)_{overall}}{\eta} = 0.0436 = 4.36\%$$

Overall uncertainty در اندازه‌گیری η در اثر ترکیب Uncertainty ها در اندازه‌گیری‌های D ، L ، Q و ΔP

برابر 4.36% ± است.

(ب)

$$\Rightarrow \frac{(U_I)_{overall}}{\eta} = [16 (0.001)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2]^{1/2}$$

$$\Rightarrow \frac{(U_I)_{overall}}{\eta} = 0.0178 = 1.78\%$$

بهبود در Overall uncertainty پارامتر η : $\frac{4.36 - 1.78}{4.36} \times 100 = 59.2\%$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

فصل دوم

۴-۲. پارامترهای عملکرد استاتیکی

۱-۴-۲. Accuracy

Accuracy در سیستم اندازه‌گیری به‌عنوان نزدیکی خروجی ابزار به مقدار واقعی کمیت اندازه‌گیری شده (مطابق استانداردها) تعریف می‌شود.

عملاً به‌عنوان درصد انحراف یا Inaccuracy اندازه‌گیری نسبت به مقدار واقعی بیان می‌شود.

Accuracy ابزار عمدتاً به محدودیت‌های ذاتی ابزار و نیز کاستی‌های فرایند اندازه‌گیری بستگی دارد. به‌عبارتی به خطاهای سیستماتیک مختلفی که در فرایند اندازه‌گیری نقش دارند بستگی دارد.

$$\text{درصد مقدار واقعی (درصد (TV) True value)} = \frac{\text{measured value} - \text{true value}}{\text{true value}} \times 100$$

$$\text{درصد انحراف مقیاس کامل (درصد (FSD) Full-scale deflection)} = \frac{\text{measured value} - \text{true value}}{\text{max scale value}} \times 100$$

نکته.

مشخصه درصد FSD نسبت به درصد TV ، Accuracy کمتری دارد.

۲-۴-۲. Precision

Precision به‌عنوان توانایی ابزار برای تولید مجدد دسته معینی از خوانده‌ها در محدوده Accuracy معینی تعریف

می‌شود.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

ابزار خیلی دقیق وسیله‌ای است که برای اطلاعات ورودی معین، هنگامی که قرائت به دفعات زیادی تکرار شود، اطلاعات خروجی یکسانی داشته باشد. در حقیقت دقت به تکرارپذیری ابزار بستگی دارد.

تعریف تکرارپذیری.

توانایی ابزار در تولید مجدد گروهی از اندازه‌گیری‌های یک کمیت معین، که توسط یک ناظر با استفاده از یک ابزار تحت شرایط یکسان صورت می‌گیرد.

نکته.

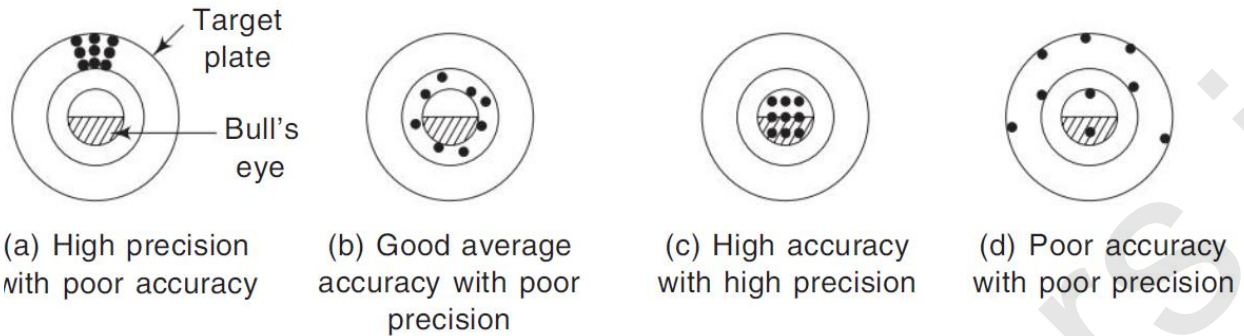
دقت ابزار به عواملی که موجب خطاهای Random or Accidental می‌شوند بستگی دارد.

نکته.

- Accuracy درجه درستی مقدار اندازه‌گیری شده را در مقایسه با مقدار واقعی نشان می‌دهد. از طرفی Precision درجه تکرارپذیری چندین اندازه‌گیری مستقل یک ورودی موردنظر در شرایط مبنای یکسان است.
- Accuracy به وسیله کالیبراسیون مناسب وسیله تعیین می‌شود و Precision به وسیله تحلیل آماری.
- اندازه‌گیری دقیق لزوماً صحیح نیست.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۲-۲. تشریح درجه Accuracy و Precision در یک آزمون نشانه‌گیری

۲-۴-۲ Resolution (or Discrimination)

به‌عنوان کوچکترین تغییر در مقدار اندازه‌گیری شده تعریف می‌شود که آن را ابزار با اطمینان می‌تواند تشخیص دهد.

کمترین شمارش هر ابزار به‌عنوان Resolution آن در نظر گرفته می‌شود.

۲-۴-۲ Threshold

حالت خاصی از Resolution است و به‌عنوان حداقل مقدار ورودی که در پایین‌تر از آن خروجی قابل تشخیص نیست، تعریف می‌شود.

نکته.

Resolution و Threshold به‌صورت مقادیر مطلق با واحدهای ورودی یا به‌صورت درصدی از FSD بیان

می‌شوند.

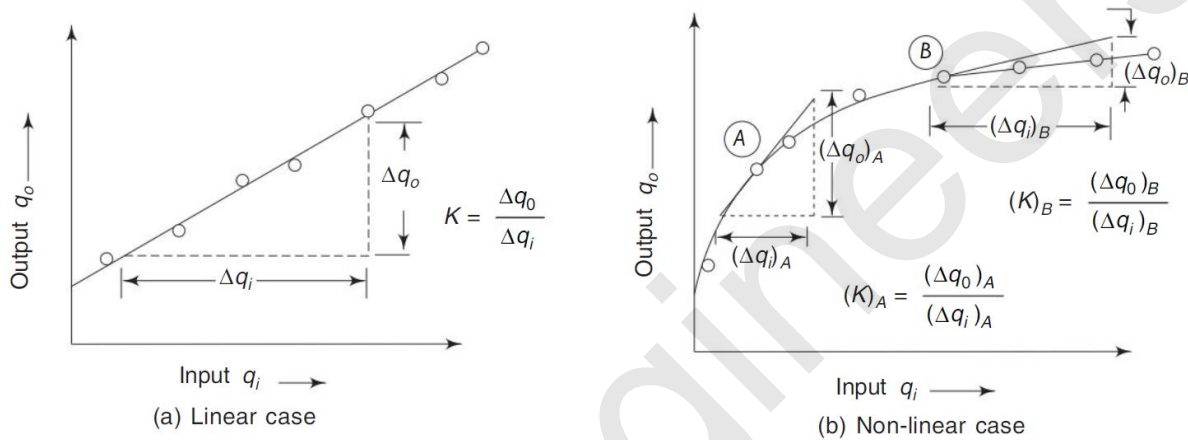
Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

Static sensitivity ۵-۴-۲

حساسیت استاتیکی ابزار به صورت زیر تعریف می شود:

$$(K) \text{ حساسیت استاتیکی} = \frac{\text{change of output signal}}{\text{change of input signal}} = \frac{\Delta q_o}{\Delta q_i}$$



شکل ۲-۳. حساسیت استاتیکی ابزار خطی و غیرخطی

اگر محورهای مختصات منحنی ورودی-خروجی با مقیاس‌های واقعی نشان داده شوند، حساسیت با شیب منحنی نشان داده می شود.

حساسیت استاتیکی ابزار از نتایج کالیبراسیون استاتیکی تعیین می شود:

• خطی: حساسیت استاتیکی ثابت است

$$K = \left. \frac{\Delta q_o}{\Delta q_i} \right|_{q_o}$$

• غیرخطی:

عکس حساسیت را Deflection factor می نامند.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

۲-۴-۶. Linearity

مقیاس خطی یکی از مطلوب‌ترین ویژگی‌های هر ابزار اندازه‌گیری است.

انحرافات از حالت ایده‌آل، Linearity error نامیده می‌شود.

روش تعیین حداکثر فاصله از Linearity.

- مستقل از ورودی

Non-linearity با حداکثر مقدار انحراف از بهترین خط مستقیم ایده‌آل در سمت مثبت یا منفی مشخص می‌شود (به صورت $\pm FSD\%$ بیان می‌شود).

- متناسب با ورودی

Non-linearity به صورت تابعی از ورودی تعیین می‌شود.

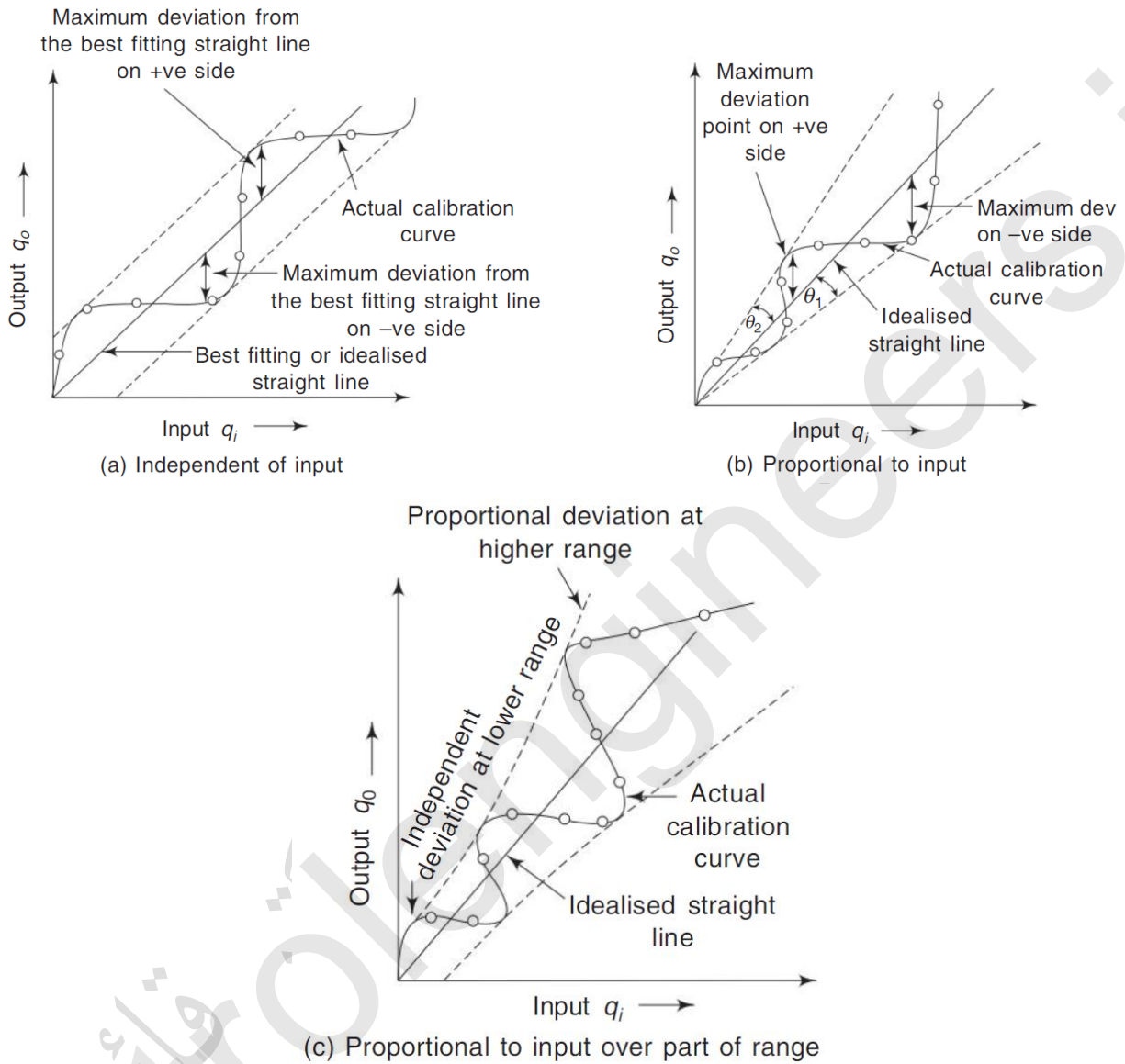
- ترکیبی از هر دو مورد مستقل و متناسب با ورودی

در این حالت حداکثر انحراف در محدوده‌ای که مستقل از ورودی (به صورت $\pm y\%$ از FSD) و در محدوده متناسب با ورودی (به صورت $\pm x\%$ از ورودی) تعیین می‌شود.

در عمل Non-linearity ابزار اندازه‌گیری، هرکدام که بزرگتر باشد در نظر گرفته می‌شود.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۲-۴. نمونه‌هایی از Non-linearity

۲-۴-۷. Range and Span

Range: هر سنسور یک بازه اندازه‌گیری و در واقع عملکردی دارد که سنسور یا مبدل برای این بازه طراحی شده است. به این بازه گستره عملکرد یا Range گفته می‌شود.

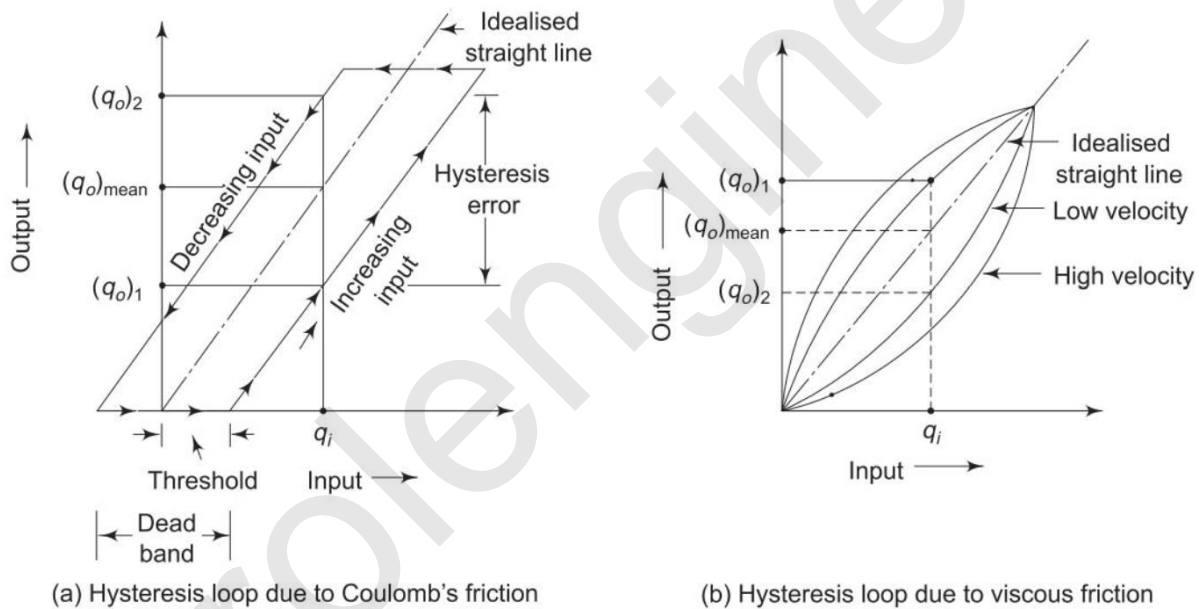
Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

Span : طول بازه فوق Span نامیده می شود.

۸-۴-۲ Hysteresis

هیستریزیس به عنوان مقدار خطایی تعریف می شود که برای مقدار معینی از ورودی هنگامی که از جهت های مخالف (افزاینده و کاهنده)، به این مقدار نزدیک شویم، ایجاد می شود. عمدتاً ناشی از اصطکاک است.



شکل ۵-۲. منحنی های ورودی-خروجی نوعی نشان دهنده آثار هیستریزیس

آثار هیستریزیس با در نظر گرفتن مشاهدات برای هر دو مقدار افزایشده و کاهنده ورودی و محاسبه میانگین حسابی آنها حذف می شوند.

$$(q_o)_{mean} = \frac{(q_o)_1 + (q_o)_2}{2}$$

در شکل ۵-۲:

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

Dead band .۹-۴-۲

بزرگترین تغییر کمیت اندازه‌گیری شونده است که ابزار به آن پاسخ نمی‌دهد.

Backlash .۱۰-۴-۲

به‌عنوان حداکثر فاصله یا زاویه‌ای که طی آن هر قسمت از سیستم مکانیکی ممکن است در یک جهت بدون به‌حرکت درآوردن قسمت دیگر، حرکت داده شود.

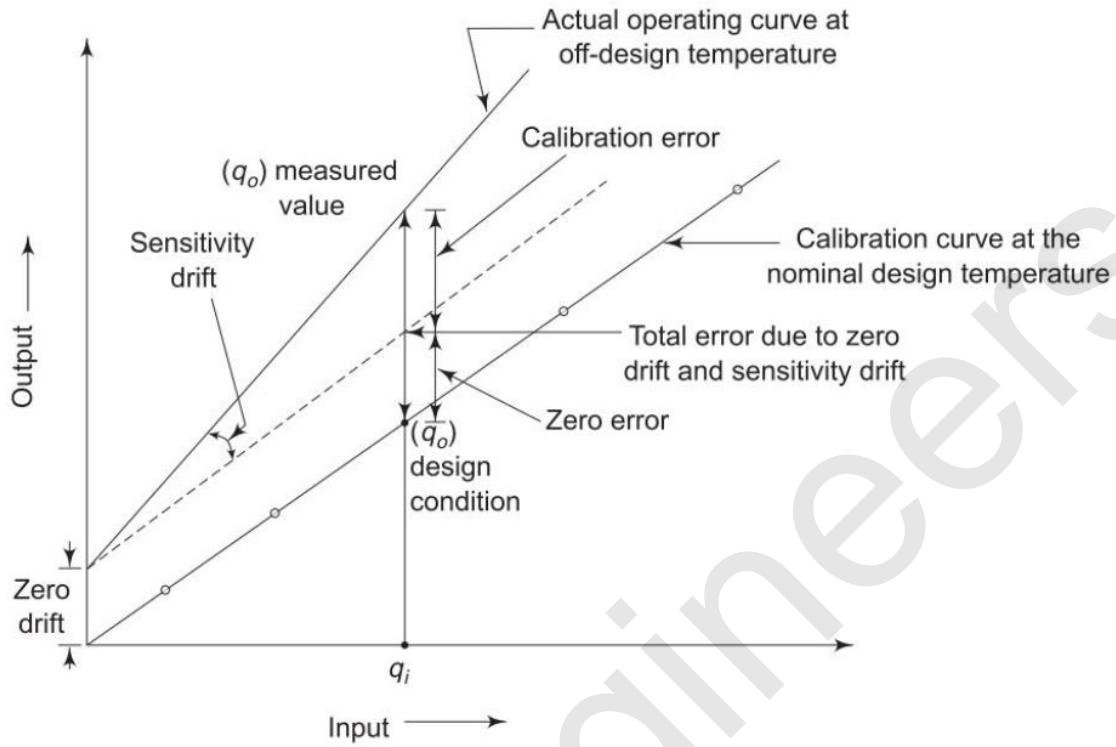
مشخصه‌های ورودی-خروجی یک سیستم اندازه‌گیری همراه با خطای Backlash مشابه حلقه هیستریزس ناشی از اصطکاک کلمب نشان داده شده در شکل ۲-۵ است.

Drift .۱۱-۴-۲

به‌عنوان تغییرات خروجی برای ورودی معینی تعریف می‌شود که در اثر تغییر حساسیت ابزار اندازه‌گیری نسبت به ورودی‌های مزاحم خاصی نظیر دما، ناپایداری قطعه و ... رخ می‌دهد.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۲-۶. آثار Zero drift و Sensitivity drift در مشخصه‌های ابزار اندازه‌گیری

فصل دوم

۵-۲. بارگذاری و تطبیق امپدانس

۱-۵-۲. بارگذاری امپدانس (Impedance Loading)

بارگذاری.

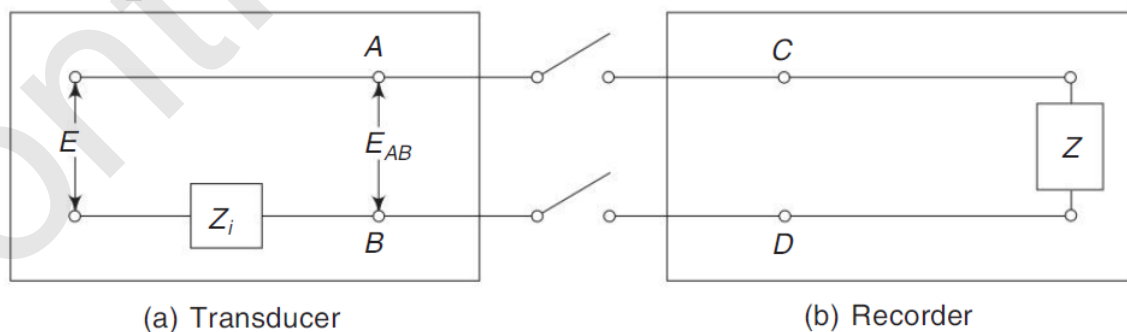
هر وسیله اندازه‌گیری با یک سیگنال ورودی منبع، مقداری انرژی جذب می‌کند که به این وسیله مقدار متغیر اندازه‌گیری را تغییر می‌دهد. این ایجاب می‌کند که سیگنال ورودی تغییری را در اثر اندازه‌گیری متحمل شود. این اثر بارگذاری نامیده می‌شود.

خطای بارگذاری در اندازه‌گیری‌ها هرگز نمی‌تواند صفر شود اما باید در حد امکان کوچک باشد.

بارگذاری امپدانس.

اصطلاح بارگذاری وقتی که برای یک مدار الکتریکی عمومی به کار می‌رود، بارگذاری امپدانس نامیده می‌شود.

یک ترنسدیوسر به صورت زیر در نظر بگیرید:



شکل ۷-۲. اثر بارگذاری رکورد بر ترنسدیوسر

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

وقتی ترنس دیوسر به طور سری به رکوردری با امپدانس ورودی Z وصل می شود، ولتاژ ثبت شده بین نقاط A و B :

$$E_{AB} = \frac{EZ}{Z + Z_s}$$

$$E_{AB} = E$$

در حالت بدون بارگذاری امپدانس (حالت ایده آل):

$$Z \gg Z_i$$

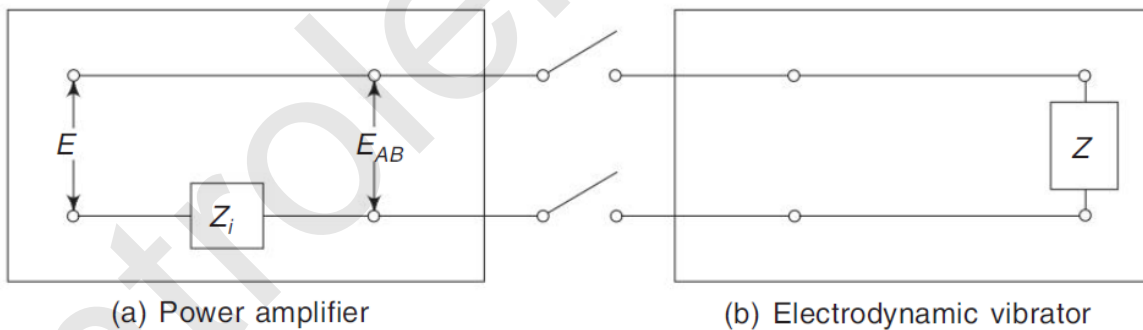
در عمل باید:

این اصل در اندازه گیری ولتاژها با استفاده از ولت سنچ لوله خلا (VTVM) به کار می رود.

۲-۵-۲. تطبیق امپدانس (Impedance Matching)

مسئله.

تقویت کننده توان متصل به طور سری با یک Vibrator الکترو دینامیکی زیر را در نظر بگیرید:



شکل ۲-۸ تطبیق امپدانس برای حداکثر توان

$$P = \frac{E_{AB}^2}{Z}$$

توان داده شده توسط تقویت کننده توان به Vibrator الکترو دینامیکی:

$$E_{AB} = \frac{EZ}{Z + Z_s}, \quad P = \frac{E_{AB}^2}{Z} \Rightarrow P = \frac{E^2}{Z} \left(\frac{Z}{Z + Z_s} \right)^2$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

برای انتقال حداکثر توان:

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = 0 \Rightarrow Z = Z_i$$

نکته.

برای داشتن حداکثر توان انتقالی از ابزار بایستی امپدانس بار خارجی به امپدانس داخلی آن منطبق شود.

مثال ۲-۳.

الف) ولت‌متری با مقاومت داخلی $200^{K\Omega}$ در دو سر یک مقاومت مجهول متصل شده است. ولت‌متر 250^V را نشان می‌دهد. یک میلی‌آمپر متر (با مقاومت داخلی خیلی کوچک) که به‌طور سری به همان مقاومت وصل شده است، مقدار 10^{mA} را نشان می‌دهد. مقاومت ظاهری، مقاومت واقعی و خطای بارگذاری ولت‌متر را تعیین کنید.

ب) اگر همان ولت‌متر و میلی‌آمپر متر وقتی که به مقاومت دیگری متصل هستند به ترتیب 100^V و 2^A را نشان دهند. خطای بارگذاری در این حالت را تعیین کنید.

حل:

الف) مقاومت کل مدار:

$$R_T = \frac{V_T}{I_T} = \frac{250}{10 \times 10^{-3}} \Rightarrow R_T = 25^{K\Omega}$$

با صرف نظر کردن از مقاومت میلی‌آمپر متر، مقاومت مجهول مقدار ظاهری $R_{app} = 25^{K\Omega}$ را دارد.

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{act}} + \frac{1}{R_V} \Rightarrow R_{act} = \frac{R_T R_V}{R_V - R_T} = \frac{25 \times 200}{200 - 25} \Rightarrow R_{act} = 28.56^{K\Omega}$$

$$\% \text{ Loading error} = \frac{R_{act} - R_{app}}{R_{act}} \times 100 = \frac{28.56 - 25}{28.56} \times 100 \Rightarrow \% \text{ Loading error} = 12.46\%$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

(ب) در حالت دوم:

$$R_T = \frac{V_T}{I_T} = \frac{100}{2} \Rightarrow R_T = 50\Omega$$

با صرف نظر کردن از مقاومت میلی آمپر متر، مقاومت مجهول مقدار ظاهری $R_{app} = 50\Omega$ را دارد.

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{act}} + \frac{1}{R_V} \quad R_V = 200k\Omega \Rightarrow R_{act} = \frac{R_T R_V}{R_V - R_T} = \frac{50 \times 200}{200 - 0.05} \Rightarrow R_{act} = 50.0125\Omega$$

$$\% \text{ Loading error} = \frac{R_{act} - R_{app}}{R_{act}} \times 100 = \frac{50.0125 - 50}{50.0125} \times 100 \Rightarrow \% \text{ Loading error} = 0.025\%$$

۲-۶. ویژگی‌های مشخصه‌های استاتیکی ابزار

تفاوت‌های انواع ابزار موجود برای اندازه‌گیری در یک کاربرد خاص:

- اصل علمی که ابزار براساس آن ساخته شده
- مکانیزمی که این اصل از طریق آن اعمال می‌شود
- روش نمایش نتایج

اندازه‌گیری فشار:

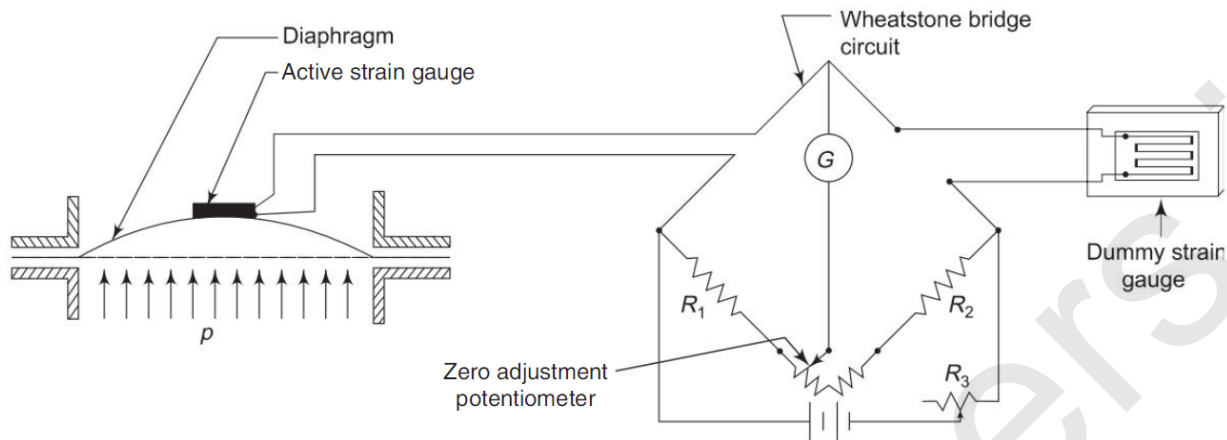
- Bourdon gauge مکانیکی ساده
- Diaphragm gauge

نمایش تغییر شکل دیافراگم در اثر فشار وارده:

- استفاده از LVDT (برای اندازه‌گیری دینامیکی مناسب نیست)
- اندازه‌گیری خازنی (داشتن مشخصه غیرخطی)
- با نمایش تغییر در Strain یا Stress در مرکز دیافراگم

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۲-۹. یک Diaphragm pressure gauge نمونه با استفاده از Strain gauges مقاومت الکتریکی

مشخصات سیستم اندازه گیری نمونه:

- | | |
|---|----------------------------|
| 1. Maximum bridge excitation | = 20 V dc |
| 2. Recommended bridge excitation | = 12 V dc |
| 3. Pressure range | = 200 kPa |
| 4. Bridge output | = 0.1 mV/V/kPa |
| 5. Accuracy | = ±0.5% of FS (Full Scale) |
| 6. Repeatability | = ±0.2% of FS |
| 7. Linearity and hysteresis | = ±0.4% of FS |
| 8. Thermal zero shift | = less than 0.02% FS/°C |
| 9. Thermal sensitivity shift | = less than 0.02%/°C |
| 10. Bridge resistance | = 350 Ω |
| 11. Minimum required impedance of output for indicating/recording unit to be used | = 2 kΩ |
| 12. Overload capacity | = 250% of FS |

۲-۷. انتخاب ابزار

معمولاً روند انتخاب ابزار به دنبال حداکثر کردن "Pay-off ratio" یا "Transfer function" است.

$$\frac{\text{Value of useful information}}{\text{Necessary total cost}}$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

ملاحظات کیفیت ابزار:

- مشخصه‌های Accuracy و Precision شامل سایر ویژگی‌ها نظیر Sensitivity ، Linearity ، هیستریزیس، Dead band و Zero and Sensitivity Drift
- طبیعت و نوع اطلاعات در دسترس (آنالوگ، دیجیتال، پیوسته یا نمونه‌برداری شده)
- طبیعت و نوع قرائت (نمایش‌گر یا رکورد)
- طبیعت محاسباتی اضافی داده‌ها، در صورت لزوم
- مشخصه‌های سیگنال به نویز ترنس‌دیوسر و پایداری سیستم به‌خصوص وقتی که انتقال مقدار زیادی داده مطرح باشد.
- مشخصه‌های پاسخ دینامیکی اگر سیگنال ورودی تابع زمان باشد.
- آسیب‌پذیری در برابر اختلالات محیطی

ملاحظات راحتی ابزار:

- مناسب بودن برای کاربرد معین، یعنی برای استفاده در آزمایشگاه ، کارگاه یا هردو.
- سازگاری با اندازه‌های مختلف ورودی
- آسانی کالیبراسیون (در مواقع لزوم)
- سادگی و سهولت تشخیص رفتار ابزار
- نگهداری، تعمیر، نمایندگی محلی و تحویل منظم
- Self-indication آماده یا تعیین زمان بررسی ابزار در مورد بدکارکردن ابزار
- ایمنی در بهره‌برداری
- شکل مناسب، ظاهر خوشایند و پوشش حفاظتی لازم

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

هزینه‌ها:

- هزینه اولیه تهیه ابزار، نصب شامل ضمام و ملحقات مختلف
- نگهداری، تعمیر و کالیبراسیون مجدد
- هزینه بهره‌برداری
- طول عمر مورد انتظار با در نظر گرفتن مقدار بازیافت

نکته.

در انتخاب هر ابزار خاص ، نکات مثبت و منفی هر ابزار شامل قیمت غالب بازار و دسترس پذیری آن به همراه تجربه بایستی در نظر گرفته شود.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

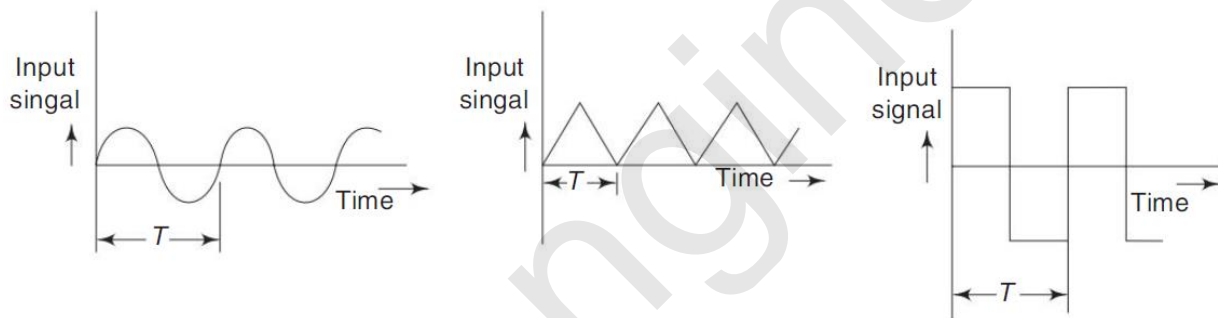
فصل سوم

مشخصه‌های دینامیکی ابزار

۱-۳. مقدمه

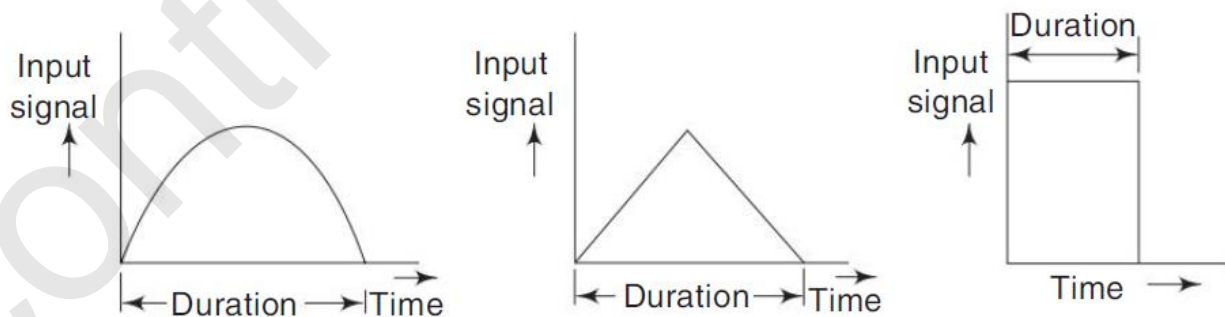
انواع ورودی‌های دینامیکی ابزار:

- ورودی Periodic



شکل ۱-۳. سیگنال‌های Periodic

- ورودی Transient

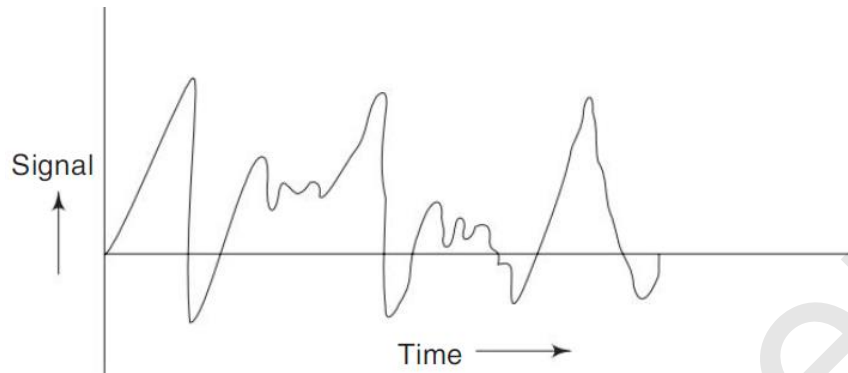


شکل ۲-۳. سیگنال‌های Transient

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

• ورودی Random



شکل ۳-۳. سیگنال‌های Random

۳-۲. فرم کلی معادلات حاکم بر ابزار

برای مطالعه مشخصه‌های دینامیکی ابزار، باید هر ابزار با مدل ریاضی‌اش معرفی شود تا از آن رابطه حاکم بین ورودی و خروجی آن به دست آید.

۳-۲-۱. معادله تعمیم‌یافته حاکم بر ابزار مرتبه دوم

معادله کلی ابزار مرتبه دوم:

$$a_2 \frac{d^2 x_o}{dt^2} + a_1 \frac{dx_o}{dt} + a_0 x_o = b_0 x_i(t)$$

$x_i(t)$: سیگنال ورودی متغیر با زمان

$x_o(t)$: سیگنال خروجی متغیر با زمان

a_0 ، a_1 ، a_2 و b_0 : ثابت‌های بیان‌گر پارامترهای سیستم

$$\frac{a_2}{a_0} \frac{d^2 x_o}{dt^2} + \frac{a_1}{a_0} \frac{dx_o}{dt} + x_o = \frac{b_0}{a_0} x_i(t)$$

$$D = \frac{d}{dt} \Rightarrow \left(\frac{a_2}{a_0} D^2 + \frac{a_1}{a_0} D + 1 \right) x_o = \frac{b_0}{a_0} x_i(t)$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

فرم تعمیم یافته معادله ابزار مرتبه دوم:

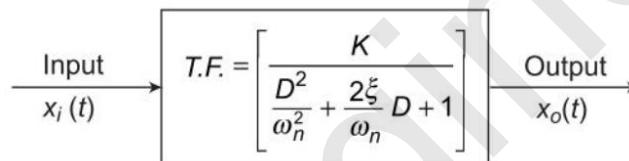
$$\left(\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n}D + 1\right)x_o(t) = K x_i(t)$$

$$\text{فرکانس طبیعی نامیرا: } \omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$$

$$\text{نسبت میرایی: } \xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0a_2}}$$

$$\text{ثابت حساسیت استاتیکی: } K = \frac{b_0}{a_0}$$

$$T.F = \frac{x_o(t)}{x_i(t)} = \frac{K}{\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n}D + 1}$$



شکل ۳-۴. بلوک دیاگرام ابزار مرتبه دوم

۳-۲-۲. معادله تعمیم یافته حاکم بر ابزار مرتبه اول

معادله کلی ابزار مرتبه اول:

$$a_1 \frac{dx_o}{dt} + a_0 x_o = b_0 x_i(t)$$

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dx_o}{dt} + x_o = \frac{b_0}{a_0} x_i(t) \quad \Rightarrow \quad \frac{a_1}{a_0} Dx_o + x_o = \frac{b_0}{a_0} x_i(t)$$

$$\Rightarrow \left(\frac{a_1}{a_0}D + 1\right)x_o = \frac{b_0}{a_0}x_i(t)$$

فرم تعمیم یافته معادله ابزار مرتبه اول:

$$(\tau D + 1)x_o(t) = K x_i(t)$$

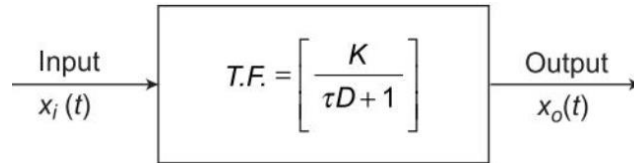
$$\text{ثابت زمانی ابزار: } \tau = \frac{a_1}{a_0}$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

$$K = \frac{b_0}{a_0} : \text{ثابت حساسیت استاتیکی}$$

$$T.F = \frac{x_o(t)}{x_i(t)} = \frac{K}{\tau D + 1}$$



شکل ۳-۵. بلوک دیاگرام ابزار مرتبه اول

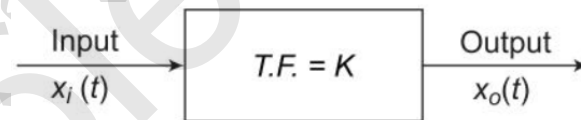
۳-۲-۳. معادله تعمیم یافته حاکم بر ابزار مرتبه صفر

معادله کلی سیستم مرتبه صفر:

$$a_0 x_o(t) = b_0 x_i(t) \quad \text{or} \quad x_o(t) = \frac{b_0}{a_0} x_i(t) \quad \text{or} \quad x_o(t) = K x_i(t)$$

$$K = \frac{b_0}{a_0} : \text{ثابت حساسیت استاتیکی}$$

$$T.F = \frac{x_o(t)}{x_i(t)} = K$$



شکل ۳-۶. بلوک دیاگرام سیستم مرتبه صفر

۳-۳. فرموله کردن معادلات سیستم

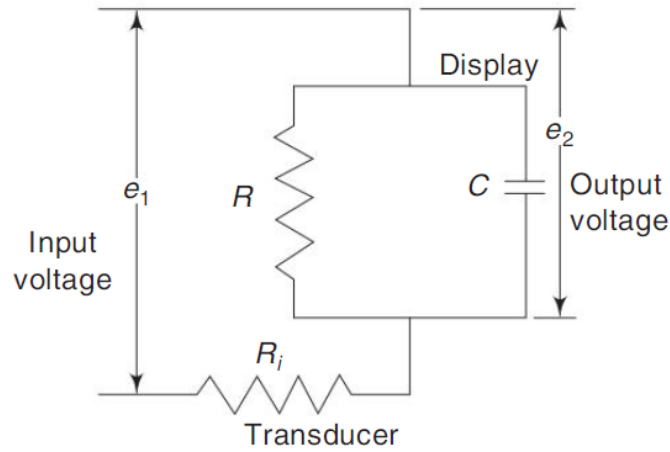
۳-۳-۱. ترنسدیوسر مقاومتی متصل به واحد نمایشگر

e_1 : ولتاژ ورودی e_2 : ولتاژ خروجی

Z : امپدانس نمایشگر

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۳-۷. ترنسیدیوسر مقاومتی متصل به واحد نمایش‌گر

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{Z}{R_i + Z}$$

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + \frac{1}{1/DC}, \quad D = \frac{d}{dt}$$

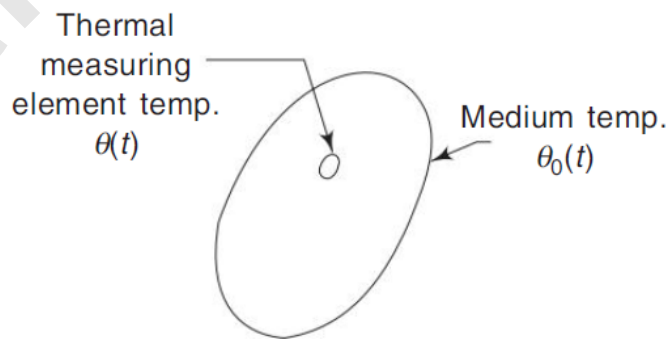
$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{1}{1 + R_i \left(\frac{1}{R} + CD \right)}$$

در عمل $\frac{R_i}{R}$ کوچک است ولذا:

$$(1 + \tau D)e_2 = e_1, \quad \tau = R_i C$$

$$\tau \frac{de_2}{dt} + e_2 = e_1(t) \Rightarrow \text{معادله مرتبه اول}$$

۳-۳-۲. المان حرارتی



شکل ۳-۸ Thermal element

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

آهنگ جریان حرارت (Rate of heat flow) به المان حرارتی:

$$q = ha(\theta_o - \theta)$$

Medium temp. : $\theta_o(t)$

$\theta(t)$: دمای المان اندازه‌گیر حرارتی (ترموکوپل، دماسنج)

a : سطح المان اندازه‌گیر

h : ضریب انتقال حرارتی

q : نرخ یا آهنگ آنتالپی به دست آمده توسط المان

$$q = mc \frac{d\theta}{dt}$$

m : جرم المان حرارتی

c : گرمای ویژه

$$\Rightarrow q = ha(\theta_o - \theta) = mc \frac{d\theta}{dt}$$

$$\text{or } \tau D\theta + \theta = \theta_o(t) \quad , \quad \tau = \frac{mc}{ha} \quad \Rightarrow \quad \text{First order system}$$

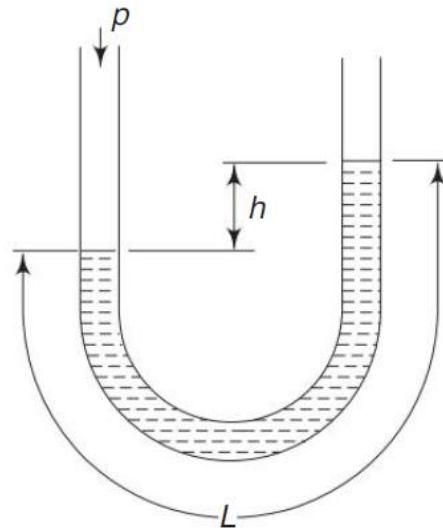
۳-۳-۳. مانومتر لوله U شکل

p : ورودی فشار که اندازه‌گیری می‌شود

h : اختلاف سطح بین دو شاخه لوله (خروجی)

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۳-۹. U-tube manometer

$$\text{Inertia force of the liquid column} = AL\rho \frac{d^2h}{dt^2}$$

$$\text{Pressure force} = pA$$

$$\text{Gravity force} = \rho ghA$$

$$\text{Friction force} = (\Delta p)A$$

L : افت فشار در طول

معادله Hagen-Poiseuille :

$$\Delta p = \frac{128 \mu L Q}{\pi D^4}$$

Viscosity : μ سیال

D : قطر لوله

$Q = VA$: نرخ حجمی فلو

$V = \frac{dh}{dt}$: سرعت

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

$$A = \frac{\pi D^2}{4}, \quad Q = VA, \quad \Delta p = \frac{128 \mu L Q}{\pi D^4} \Rightarrow \text{Friction force} = 8\pi \mu L \frac{dh}{dt}$$

$$AL\rho \frac{d^2h}{dt^2} = pA - (\rho g A)h - 8\pi \mu L \frac{dh}{dt}$$

$$L\rho \frac{d^2h}{dt^2} + \frac{32\mu L}{D^2} \frac{dh}{dt} + (\rho g)h = p \Rightarrow \text{Second order instrument}$$

$$\text{Static pressure: } h = \frac{p}{\rho g}$$

۴-۳-۳. Forced vibration type of spring, mass and damper system

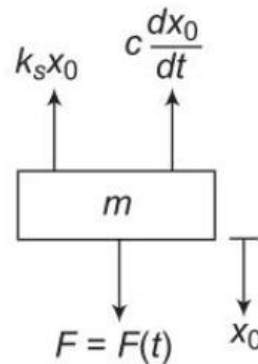
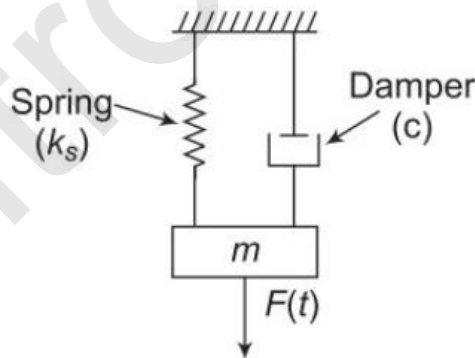
قانون حرکت نیوتن:

$$m \frac{d^2 x_0}{dt^2} = F(t) - k_s x_0 - c \frac{dx_0}{dt}$$

(Stiffness of spring) فنر سختی $(\frac{N}{m})$: k_s

(Damping constant) ثابت میرایی $(\frac{N}{m/s})$: c

mean position جابه‌جایی جرم از x_0



شکل ۳-۱۰. مدل مکانیکی Forced vibration system و دیاگرام Free body سیستم

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

$$\Rightarrow \frac{m}{k_s} \frac{d^2 x_0}{dt^2} + \frac{c}{k_s} \frac{dx_0}{dt} + x_0 = \frac{1}{k_s} F(t)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_s}{m}}, \quad \xi = \frac{c}{2\sqrt{k_s m}}, \quad K = \frac{1}{k_s} \Rightarrow \frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 x_0}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} \frac{dx_0}{dt} + x_0 = K F(t) \Rightarrow \text{Second order system}$$

برای Rotating system :

$$J \frac{d^2 \theta_0}{dt^2} + c \frac{d\theta_0}{dt} + k_s \theta_0 = T(t) \Rightarrow \text{Second order system}$$

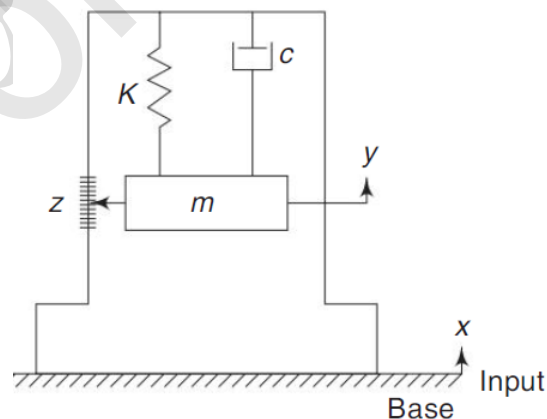
(Polar mass moment of inertia) ($kg.m^2$) : J

(Torsional stiffness constant) ($\frac{Nm}{rad}$) : k_s

(Damping constant) ثابت میرایی ($\frac{Nm}{rad/s}$) : c

گشتاور دینامیکی ($N.m$) : $T(t)$

۳-۳-۵. ترنسدیوسر حرکت لرزه‌ای (Seismic motion transducer)



شکل ۳-۱۱. Seismic motion transducer

خروجی : حرکت z جرم نسبت به frame

ورودی : حرکت x پایه

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

معادله حرکت:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{d}{dt}(y-x) + K(y-x) = 0$$

c : ثابت میرایی Viscous damper

y : حرکت مطلق جرم

$$z = y - x$$

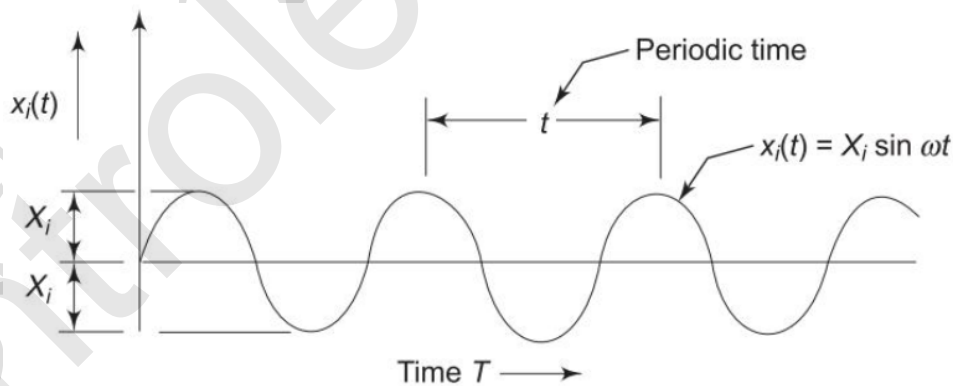
حرکت نسبی:

$$\Rightarrow m \frac{d^2 z}{dt^2} + c \frac{dz}{dt} + K z = -m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

۳-۴. پاسخ دینامیکی

۳-۴-۱. Periodic Input-Harmonic signal

- سیستم مرتبه اول با ورودی سینوسی



شکل ۳-۱۲. Periodic harmonic signal

$$(\tau D + 1)x_o = K x_i(t) \quad , \quad x_i(t) = X_i \sin \omega t$$

K : حساسیت استاتیکی

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

$$x_o(t) = A \sin \omega t + B \cos \omega t$$

با فرض حالت پایایی:

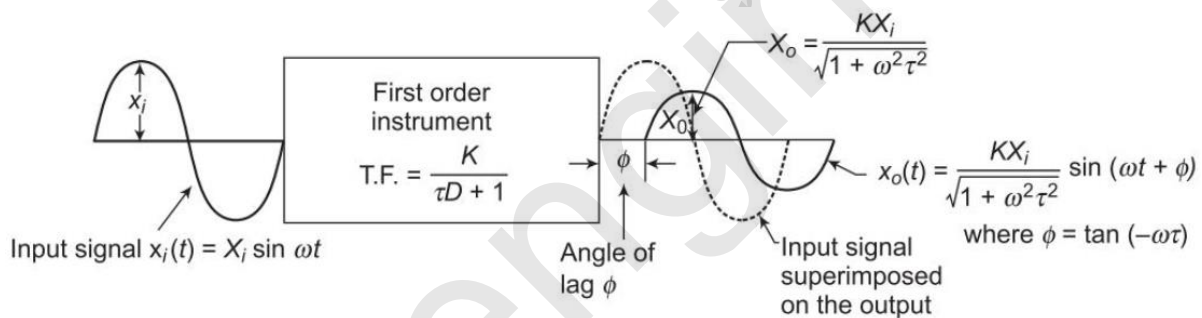
$$\Rightarrow \begin{cases} \tau \omega A + B = 0 \\ -\tau \omega B + A = KX_i \end{cases} \Rightarrow A = \frac{KX_i}{1 + \tau^2 \omega^2}, \quad B = \frac{-K\tau \omega X_i}{1 + \tau^2 \omega^2}$$

$$\Rightarrow x_o(t) = \frac{KX_i}{1 + \tau^2 \omega^2} [\sin \omega t - \omega \tau \cos \omega t]$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}, \quad \sin \varphi = \frac{-\omega \tau}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

با فرض:

$$\Rightarrow x_o(t) = \frac{KX_i}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \sin(\omega t + \varphi), \quad \varphi = \tan^{-1}(-\omega \tau)$$



شکل ۳-۱۳. پاسخ سیستم مرتبه اول به ورودی سینوسی

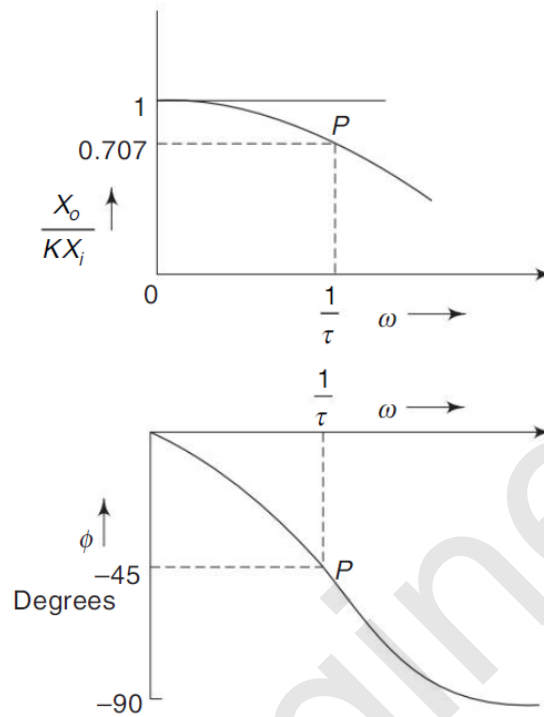
روش دیگر به دست آوردن پاسخ فرکانسی است.

$$\frac{X_o}{X_i} = \frac{K}{1 + j\omega\tau}$$

$$\text{Amplitude ratio :A.R.} = \frac{X_o}{KX_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۳-۱۴. پاسخ فرکانسی سیستم مرتبه اول

برای ثابت زمانی کوچک پاسخ فرکانسی ثابت می شود.

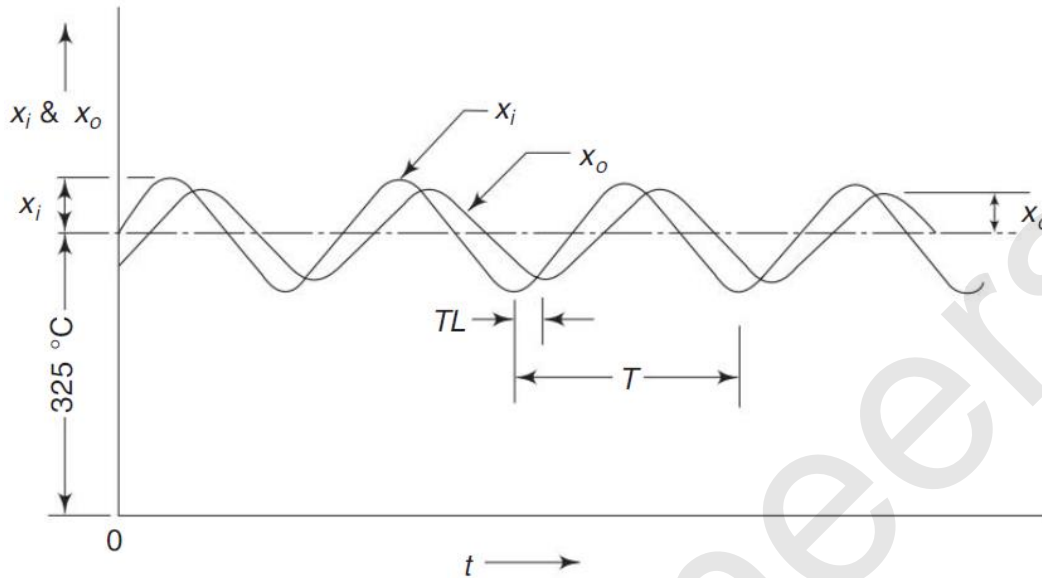
مثال ۳-۱.

یک سیستم اندازه گیری دما، با ثابت زمانی 2^{sec} ، برای اندازه گیری دمای یک وسیله گرم کننده که به صورت سینوسی با زمان تناوب 20^{sec} بین 300°C و 350°C تغییر می کند، به کار می رود. حداکثر و حداقل مقادیر دما که توسط سیستم اندازه گیری نمایش داده می شود و تاخیر زمانی بین سیگنال های ورودی و خروجی را پیدا کنید.

حل:

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۳-۱۵. سیستم مرتبه اول

$$(1 + \tau D)x_o = x_i(t)$$

سیستم به صورت مرتبه یک:

دمای متوسط سیستم: 325°C

$$\text{Amplitude } x_i = \frac{350 - 300}{2} = 25^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{X_o}{X_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tau^2 \omega^2}}, \quad \tau = 2^{\text{sec}}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{20} = 0.314 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow \frac{X_o}{X_i} = 0.847$$

$$\frac{X_o}{X_i} = 0.847, \quad X_i = 25^{\circ}\text{C} \Rightarrow X_o = 21.2^{\circ}\text{C}$$

بازه تغییرات دمای نشان داده شده:

$$325^{\circ}\text{C} - 21.2^{\circ}\text{C} = 303.8^{\circ}\text{C}, \quad 325^{\circ}\text{C} + 21.2^{\circ}\text{C} = 346.2^{\circ}\text{C}$$

$$\varphi = -\text{tg}^{-1} \tau \omega = -32.1^{\circ}\text{C}$$

$$\text{تاخیر زمانی} : TL = \frac{32.1}{360} \times 20 = 1.78^{\text{sec}}$$

فصل سوم

مشخصه‌های دینامیکی ابزار

۳-۴. پاسخ دینامیکی

۳-۴-۱. Periodic Input-Harmonic signal

- سیستم مرتبه دو با ورودی سینوسی

رابطه ورودی-خروجی سیستم مرتبه دو:

$$\left(\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n}D + 1\right)x_o(t) = Kx_i(t) = KX_i \sin \omega t$$

$$x_o(t) = A \sin \omega t + B \cos \omega t$$

با فرض حالت ماندگار:

$$\Rightarrow \begin{cases} 2\xi \frac{\omega}{\omega_n} A + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right) B = 0 \\ -2\xi \frac{\omega}{\omega_n} B + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right) A = KX_i \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{frequency ratio} \\ \Rightarrow \\ \frac{\omega}{\omega_n} = r \end{matrix} \quad A = \frac{KX_i(1-r^2)}{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}, \quad B = \frac{-KX_i(2\xi r)}{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}$$

$$\Rightarrow x_o(t) = \frac{KX_i}{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2} [(1-r^2) \sin \omega t - (2\xi r) \cos \omega t]$$

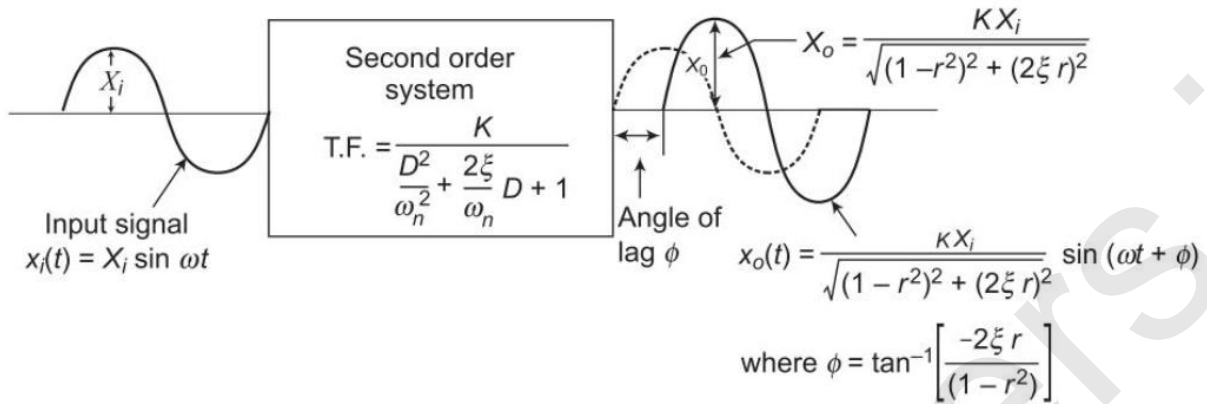
$$\cos \varphi = \frac{(1-r^2)}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}}, \quad \sin \varphi = \frac{-2\xi r}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad \text{با فرض:}$$

$$\Rightarrow x_o(t) = \frac{KX_i}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \sin(\omega t + \varphi), \quad \text{Angle of lag} = \varphi = \text{tg}^{-1}\left(\frac{-2\xi r}{1-r^2}\right) = -\text{tg}^{-1}\left(\frac{2\xi r}{1-r^2}\right)$$

$$\text{or } x_o(t) = X_o \sin(\omega t + \varphi), \quad X_o = \frac{KX_i}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}}$$

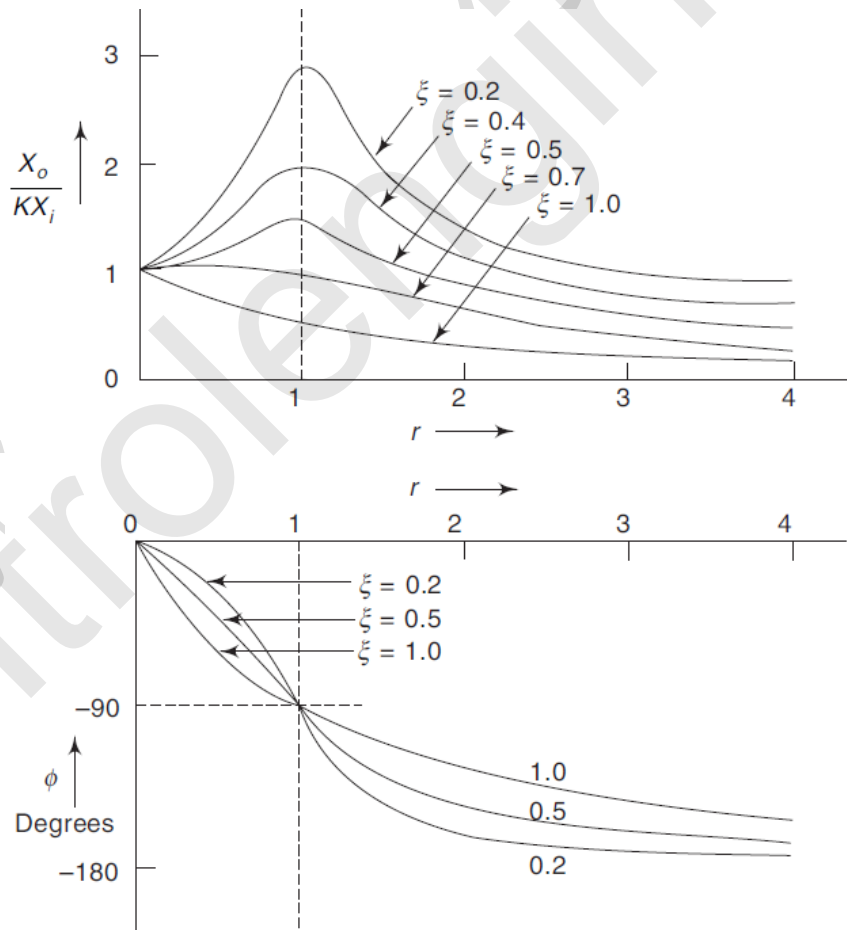
Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۳-۱۶. پاسخ سیستم (ابزار) مرتبه دوم به ورودی سینوسی

Amplitude ratio : A.R. = $\frac{X_o}{K X_i} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}}$



شکل ۳-۱۷. پاسخ فرکانسی سیستم مرتبه دوم

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

برای استفاده از ابزار مرتبه دوم در فرکانس زیاد ω ، بایستی ω_n زیاد باشد و نیز مقدار ξ باید در حدود $\xi = 0.7$ باشد.

مثال ۲-۳

به یک ابزار مرتبه دو، یک ورودی سینوسی داده می‌شود. فرکانس طبیعی نامیرا 3^{Hz} و نسبت میرایی $\xi = 0.5$ است. حساسیت استاتیکی را برابر یک در نظر بگیرید. نسبت دامنه و زاویه فاز را برای یک ورودی با فرکانس 2^{Hz} محاسبه کنید.

حل:

$$\left(\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n}D + 1\right)x_o(t) = K x_i(t)$$

$$\frac{X_o}{KX_i} = \frac{X_o}{X_i} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}}, \quad r = \frac{\omega}{\omega_n}$$

$$\begin{cases} \omega_n = 2\pi \times 3 = 18.85 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \\ \omega = 2\pi \times 2 = 12.57 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \end{cases} \Rightarrow r = \frac{\omega}{\omega_n} = 0.67$$

$$\frac{X_o}{X_i} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \Rightarrow \frac{X_o}{X_i} = 1.153$$

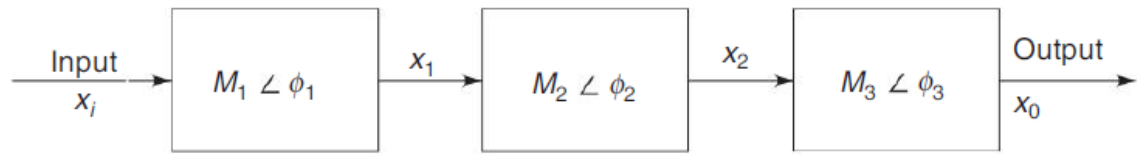
$$\varphi = -\text{tg}^{-1}\left(\frac{2\xi r}{1-r^2}\right) = -50.6^\circ$$

• سیستم مرتبه بالا با ورودی سینوسی

در سیستم‌های مرتبه بالا بهتر است پاسخ فرکانسی سیستم با استفاده از دیاگرام Bode رسم شود.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۳-۱۸. پاسخ فرکانسی سیستم‌های مرتبه بالا

$$\frac{x_1}{x_i}(\omega) = M_1 \angle \phi_1 \quad , \quad \frac{x_2}{x_1}(\omega) = M_2 \angle \phi_2 \quad , \quad \frac{x_o}{x_2}(\omega) = M_3 \angle \phi_3$$

$$\Rightarrow \frac{x_o}{x_i}(\omega) = M_1 M_2 M_3 \angle (\phi_1 + \phi_2 + \phi_3) = M \angle \phi$$

سیستم مرتبه اول:

$$(1 + \tau D)x_o(t) = K x_i(t) \quad , \quad x_i(t) = X_i \sin \omega t$$

$$\text{Amplitude ratio } M = \frac{X_o}{X_i} = \frac{K}{\sqrt{1 + \tau^2 \omega^2}}$$

$$\begin{aligned} \text{M in decibels} &= 20 \log \frac{K}{\sqrt{1 + \tau^2 \omega^2}} \\ &= 20 \lg K - 10 \log (1 + \tau^2 \omega^2) \end{aligned}$$

$$M = -10 \log (1 + \tau^2 \omega^2) \quad \text{dB}$$

با فرض $K=1$:

سیستم مرتبه دوم:

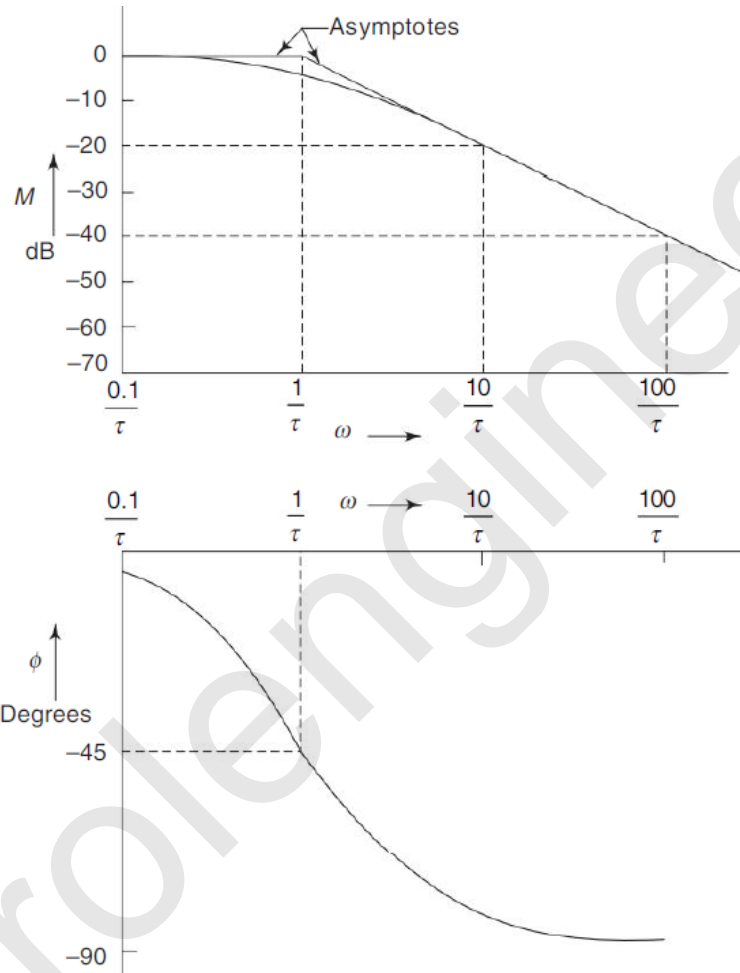
$$\left(\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} D + 1\right)x_o(t) = K x_i(t) \quad , \quad x_i(t) = X_i \sin \omega t$$

$$M = 20 \log \frac{X_o}{X_i} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}}$$

$$M = -10 \log [(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2] \quad , \quad r = \frac{\omega}{\omega_n}$$

Instrumentation

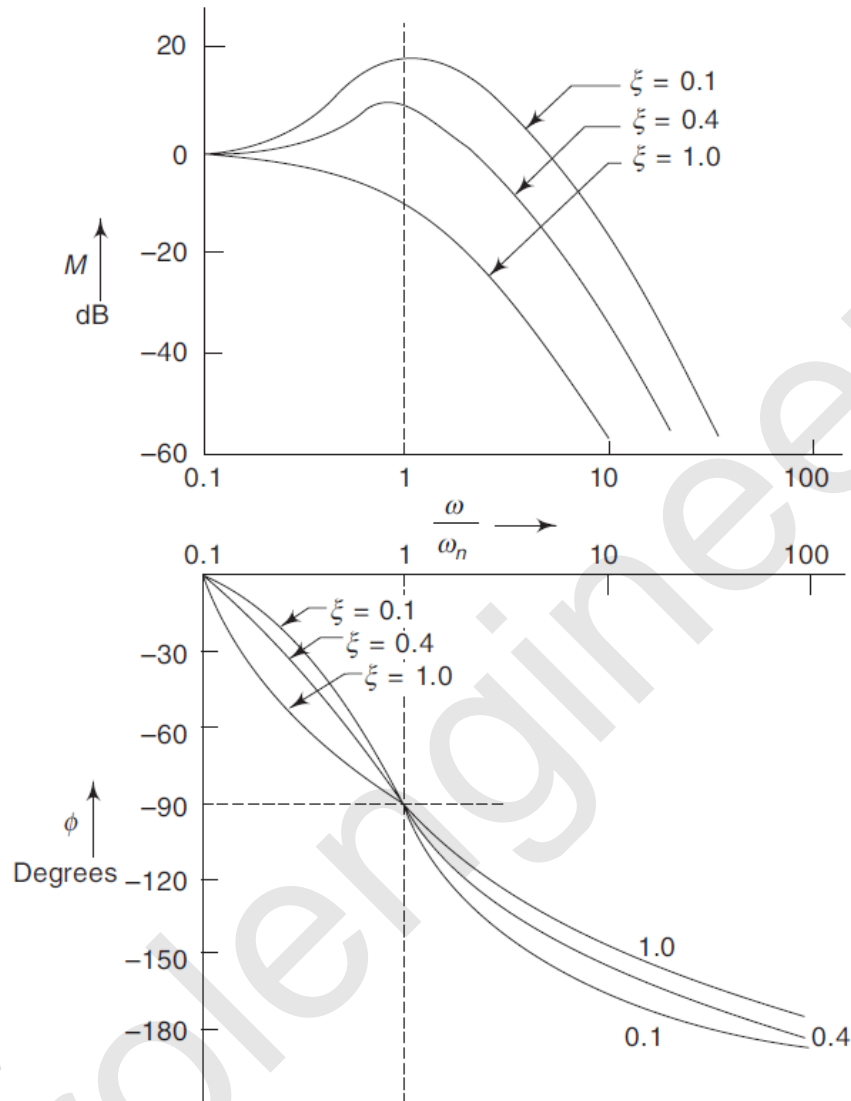
COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz



شکل ۳-۱۹. دیاگرام Bode سیستم مرتبه اول

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۳-۲. دیاگرام Bode سیستم مرتبه دوم

مثال ۳-۳.

ابزاری از یک سنسور مرتبه اول و یک نمایش‌گر داده مرتبه دوم تشکیل شده است. ثابت زمانی سنسور 0.01^{sec} و حساسیت استاتیکی آن $4\text{mV}/^\circ\text{C}$ است. نمایش‌گر داده نیز فرکانس طبیعی نامیرای 100rad/s و نسبت میرایی 0.5 دارد و حساسیت استاتیکی آن 5mm/mV است. دیاگرام Bode سیستم را رسم کنید.

(بر عهده دانشجو)

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

۲-۴-۳. Periodic Input-Non-harmonic signal

اگر سیگنال ورودی تابعی از زمان باشد به طوری که خودش را در فواصل زمانی ثابتی تکرار کند و هارمونیک نباشد، با استفاده از سری فوریه می توان آنرا به صورت سینوسی با فرکانس های متغیر نشان داد.

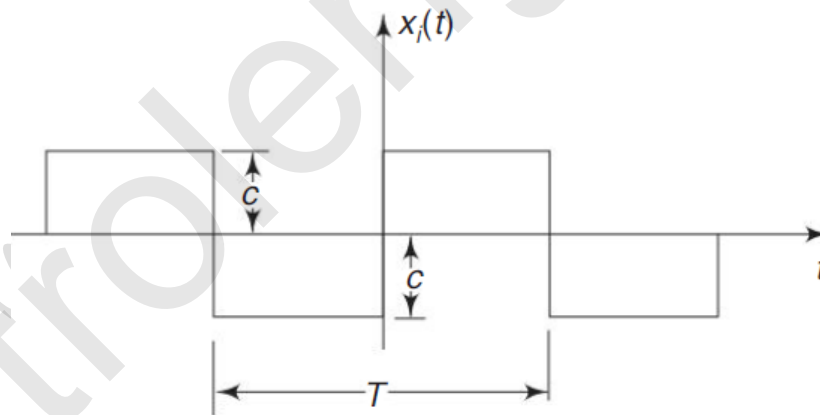
$$x_i(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi}{T}nt + b_n \sin \frac{2\pi}{T}nt \right) \quad T: \text{ زمان تناوب}$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_i(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_i(t) \cos \left(\frac{2\pi}{T}nt \right) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_i(t) \sin \left(\frac{2\pi}{T}nt \right) dt$$

سیگنال موج مربعی:



شکل ۳-۲۱. ورودی موج مربعی متناوب

$$x_i(t) = \begin{cases} -C & , \quad -\frac{T}{2} < t < 0 \\ C & , \quad 0 < t < \frac{T}{2} \end{cases}$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_i(t) dt = \frac{2}{T} \left[\int_{-T/2}^0 -C dt + \int_0^{T/2} C dt \right] = 0 \quad \Rightarrow \quad a_0 = 0$$

ضرایب سری فوریه:

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_i(t) \cos\left(\frac{2\pi}{T}nt\right) dt = \frac{2}{T} \left[\int_{-T/2}^0 -C \cos\left(\frac{2\pi}{T}nt\right) dt + \int_0^{T/2} C \cos\left(\frac{2\pi}{T}nt\right) dt \right] = 0 \Rightarrow a_n = 0$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_i(t) \sin\left(\frac{2\pi}{T}nt\right) dt = \frac{2}{T} \left[\int_{-T/2}^0 -C \sin\left(\frac{2\pi}{T}nt\right) dt + \int_0^{T/2} C \sin\left(\frac{2\pi}{T}nt\right) dt \right]$$

$$\Rightarrow b_n = \frac{C}{n\pi} [2 - \cos n\pi - \cos(-n\pi)] \Rightarrow b_n = \frac{4C}{n\pi}, \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

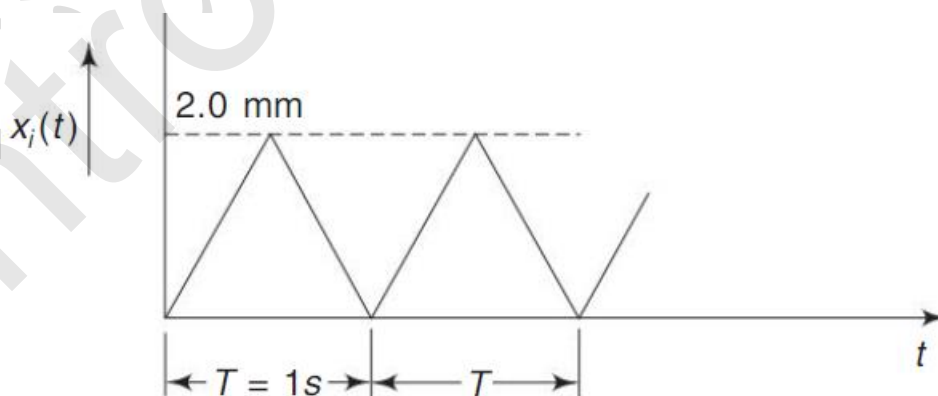
$$\Rightarrow b_n = \begin{cases} \frac{4C}{n\pi}, & n = 1, 3, 5, \dots \\ 0, & n = 2, 4, 6, \dots \end{cases}$$

$$x_i(t) = \sum \frac{4C}{n\pi} \sin \frac{2\pi nt}{T}, \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

مثال ۳-۴.

الف) تقریب سری فوریه برای تابع شکل ۳-۲۲ را بنویسید. به طوری که در $t = 0, \frac{T}{3}, \frac{T}{2}, \frac{2T}{3}, T$ مقدار خطا صفر باشد. تابع تقریبی به دست آمده را رسم کنید.

ب) اگر تابع به دست آمده در قسمت (الف) به عنوان سیگنال ورودی به یک ابزار مرتبه دو با $\omega_n = 10 \text{ rad/s}$ ، $\xi = 0.3$ و $K = 5 \text{ mV/mm}$ اعمال شود، خروجی حالت ماندگار ابزار را به دست آورید.



شکل ۳-۲۲. شکل مثال ۳-۴

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

حل:

$$x_i(t) = \frac{1}{2}a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi t}{T} + a_2 \cos \frac{4\pi t}{T} + b_1 \sin \frac{2\pi t}{T} + b_2 \sin \frac{4\pi t}{T}$$

$$x_i(0) = 0 \quad , \quad x_i\left(\frac{T}{3}\right) = \frac{4}{3} \quad , \quad x_i\left(\frac{T}{2}\right) = 2 \quad , \quad x_i\left(\frac{2T}{3}\right) = \frac{4}{3} \quad , \quad x_i(T) = 0$$

$$x_i(0) = 0.5a_0 + a_1 + a_2 = 0$$

$$x_i\left(\frac{T}{3}\right) = 0.5a_0 - 0.5a_1 - 0.5a_2 + 0.87b_1 - 0.87b_2 = \frac{4}{3}$$

$$x_i\left(\frac{T}{2}\right) = 0.5a_0 - a_1 + a_2 = 2$$

$$x_i\left(\frac{2T}{3}\right) = 0.5a_0 - 0.5a_1 - 0.5a_2 - 0.87b_1 + 0.87b_2 = \frac{4}{3}$$

$$x_i(T) = 0.5a_0 + a_1 + a_2 = 0$$

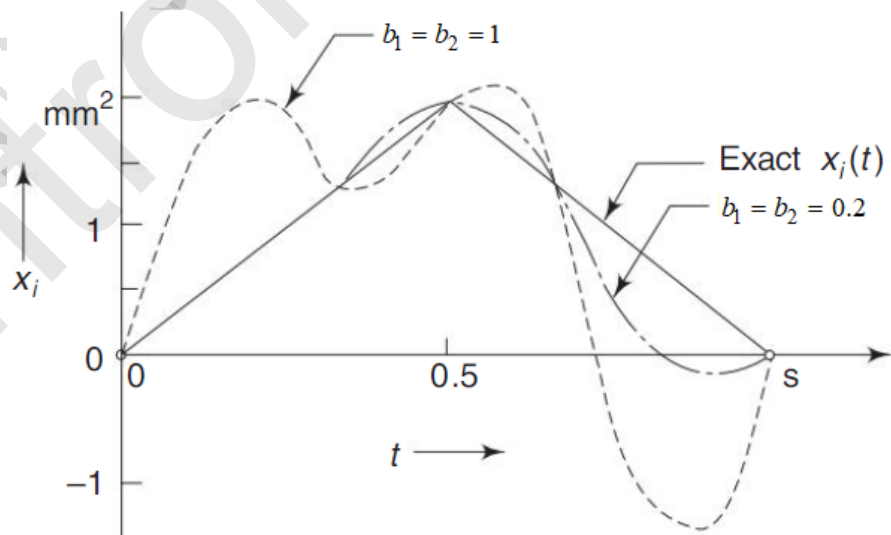
$$\Rightarrow a_0 = \frac{16}{9} \quad , \quad a_1 = -1 \quad , \quad a_2 = \frac{1}{9} \quad , \quad b_1 = b_2$$

با انتخاب $b_1 = b_2 = 1$

$$x_i(t) = \frac{8}{9} - \cos \frac{2\pi t}{T} + \frac{1}{9} \cos \frac{4\pi t}{T} + \sin \frac{2\pi t}{T} + \sin \frac{4\pi t}{T}$$

با انتخاب $b_1 = b_2 = 0.2$

$$x_i(t) = \frac{8}{9} - \cos \frac{2\pi t}{T} + \frac{1}{9} \cos \frac{4\pi t}{T} + 0.2 \sin \frac{2\pi t}{T} + 0.2 \sin \frac{4\pi t}{T}$$



شکل ۳-۲۳. شکل مثال ۳-۴

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

$$\left(\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n}D + 1\right)x_o(t) = K x_i(t) \quad (\text{ب})$$

$$\omega_n = 10, \quad \xi = 0.3, \quad K = 5 \Rightarrow (D^2 + 6D + 100)x_o(t) = 500x_i(t)$$

$$x_i(t) = \frac{8}{9} - \cos \frac{2\pi t}{T} + \frac{1}{9} \cos \frac{4\pi t}{T} + 0.2 \sin \frac{2\pi t}{T} + 0.2 \sin \frac{4\pi t}{T}$$

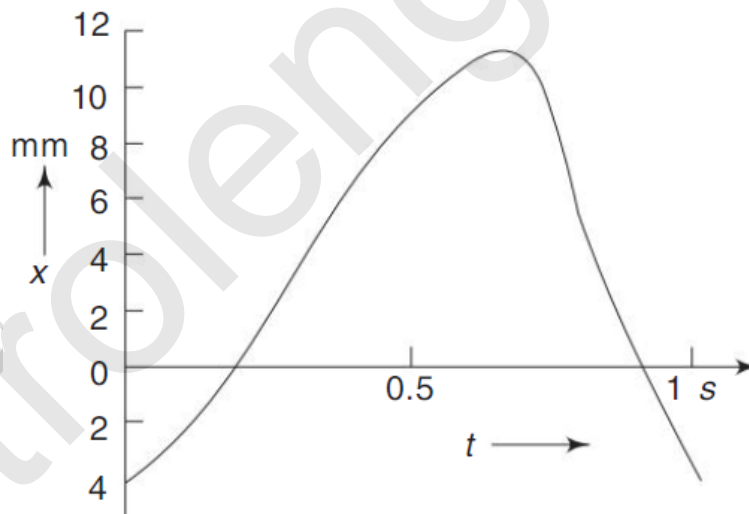
$$T = 1 \Rightarrow (D^2 + 6D + 100)x_o(t) = \frac{4000}{9} - 500 \cos 2\pi t + \frac{500}{9} \cos 4\pi t + 100 \sin 2\pi t + 100 \sin 4\pi t$$

می توان نشان داد:

$$(D^2 + 6D + 100)x_o(t) = F \cos \omega t \Rightarrow x_o(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t$$

$$(D^2 + 6D + 100)x_o(t) = F \sin \omega t \Rightarrow x_o(t) = A \sin \omega t - B \cos \omega t$$

$$\Rightarrow x_o(t) = \frac{40}{9} - 6.69 \cos 6.28t - 2.51 \sin 6.28t - 1.84 \cos 12.56t - 0.68 \sin 19.56t$$



شکل ۳-۲۴. شکل مثال ۳-۴

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

Transient Input ۳-۴-۳

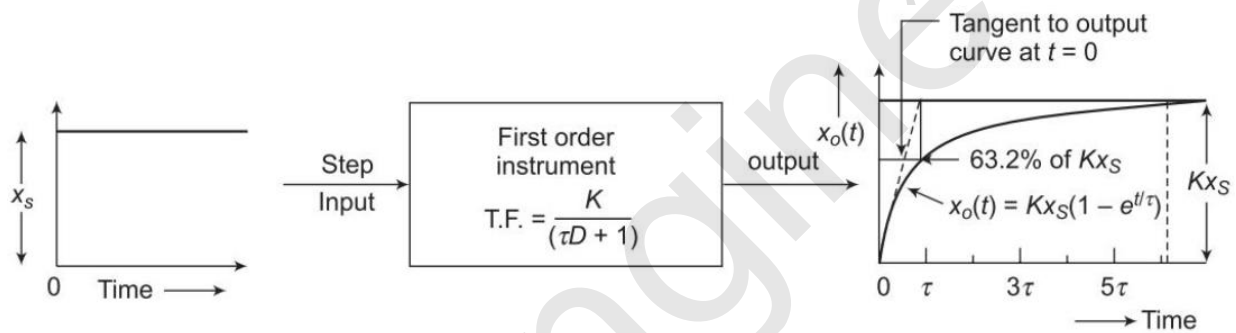
• روش حل معادله دیفرانسیلی

پاسخ پله سیستم مرتبه اول:

$$(\tau D + 1)x_o = K x_s, \quad t > 0$$

معادله:

$$\Rightarrow x_o(t) = K x_s (1 - e^{-t/\tau})$$



شکل ۳-۲۵. پاسخ ابزار مرتبه اول به ورودی پله

پاسخ پله سیستم مرتبه دوم:

$$\left(\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} D + 1\right)x_o(t) = K x_i(t)$$

معادله:

$$x_i(t) = x_s \Rightarrow \left(\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} D + 1\right)x_o = K x_s$$

با فرض شرایط اولیه صفر:

Over damped case ($\xi > 1$):

$$\frac{x_o(t)}{K x_s} = 1 + \frac{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} e^{(-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t} - \frac{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} e^{(-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t}$$

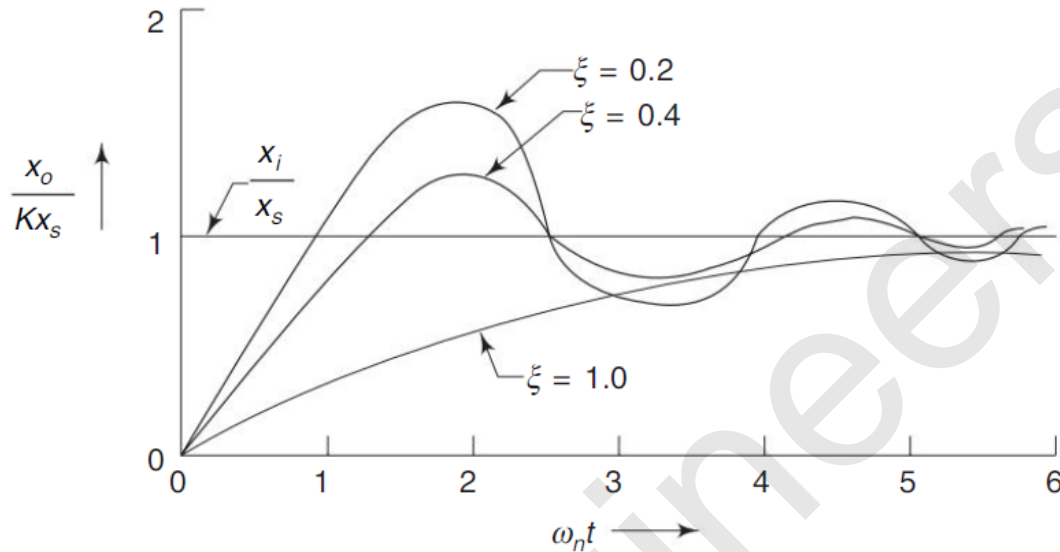
Critical damping case ($\xi = 1$):

$$\frac{x_o(t)}{K x_s} = 1 - (1 + \omega_n t) e^{-\omega_n t}$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

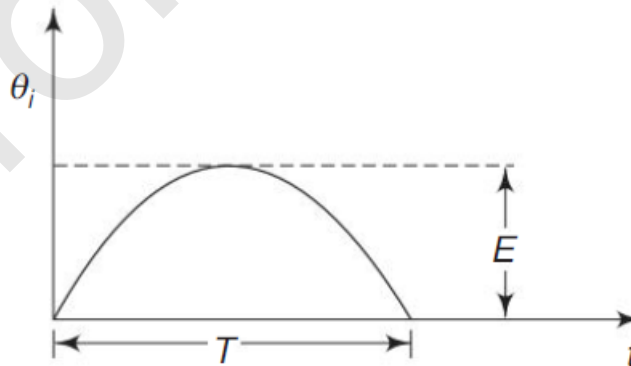
Under damped case ($\xi < 1$): $\frac{x_o(t)}{Kx_s} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin(\sqrt{1-\xi^2} \omega_n t + \varphi)$, $\varphi = \sin^{-1} \sqrt{1-\xi^2}$



شکل ۳-۲۶. پاسخ ابزار مرتبه دوم به ورودی پله

مثال ۳-۵

ترموکوپلی با مشخصه پاسخ مرتبه یک برای اندازه‌گیری یک تک‌پالس دمایی به شکل نیم‌موج سینوسی (شکل ۳-۲۷) به کار می‌رود. پاسخ خروجی ترموکوپل را برای الف) $T=4\tau$ و ب) $T=10\tau$ به دست آورید.



شکل ۳-۲۷. مثال ۳-۵

حل:

دمای ترموکوپل : $\theta_o(t)$

دمای مورد اندازه‌گیری : $\theta_i(t)$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

$$(\tau D + 1)\theta_o = \theta_i(t)$$

$$\theta_i(t) = E \sin \frac{\pi t}{T} = E \sin \omega t \quad , \quad \omega = \frac{\pi}{T}$$

$$(\tau D + 1)\theta_o = E \sin \omega t$$

Complementary solution: $\theta_o = Ae^{-t/\tau}$

particular solution: $\theta_o = B \sin \omega t + C \cos \omega t$

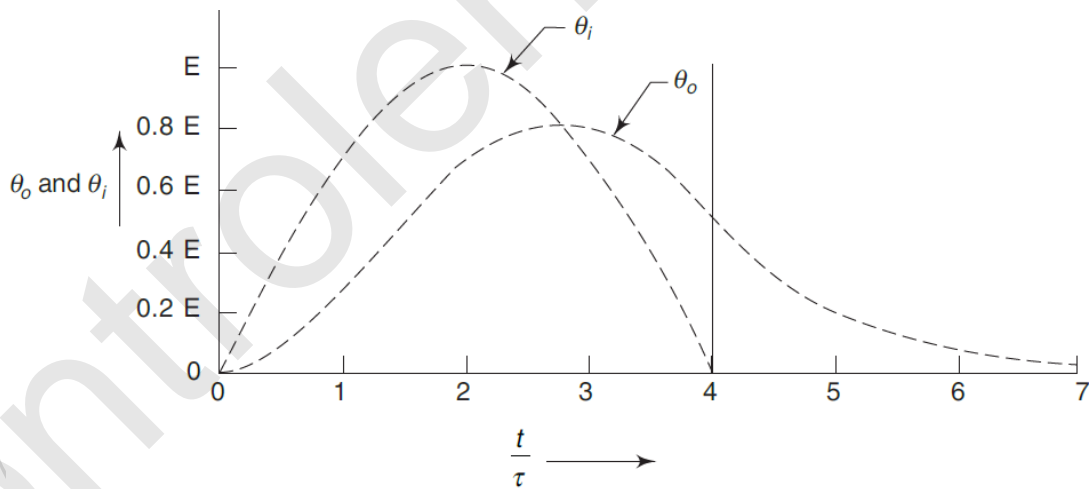
$$\theta_o = Ae^{-t/\tau} + \frac{E}{1 + \omega^2 \tau^2} [\sin \omega t - \omega \tau \cos \omega t]$$

initial condition: $\theta_o(0) = 0 \Rightarrow A = \frac{E\tau\omega}{1 + \omega^2 \tau^2}$

$$\Rightarrow \theta_o = \frac{E}{1 + \omega^2 \tau^2} [\tau\omega e^{-t/\tau} + \sin \omega t - \omega \tau \cos \omega t]$$

$$\omega = \frac{\pi}{4\tau} \quad \text{or} \quad T = 4\tau \quad (\text{الف})$$

$$\Rightarrow \theta_o = E [0.486 e^{-t/\tau} + 0.168 \sin \frac{\pi t}{4\tau} - 0.486 \cos \frac{\pi t}{4\tau}]$$



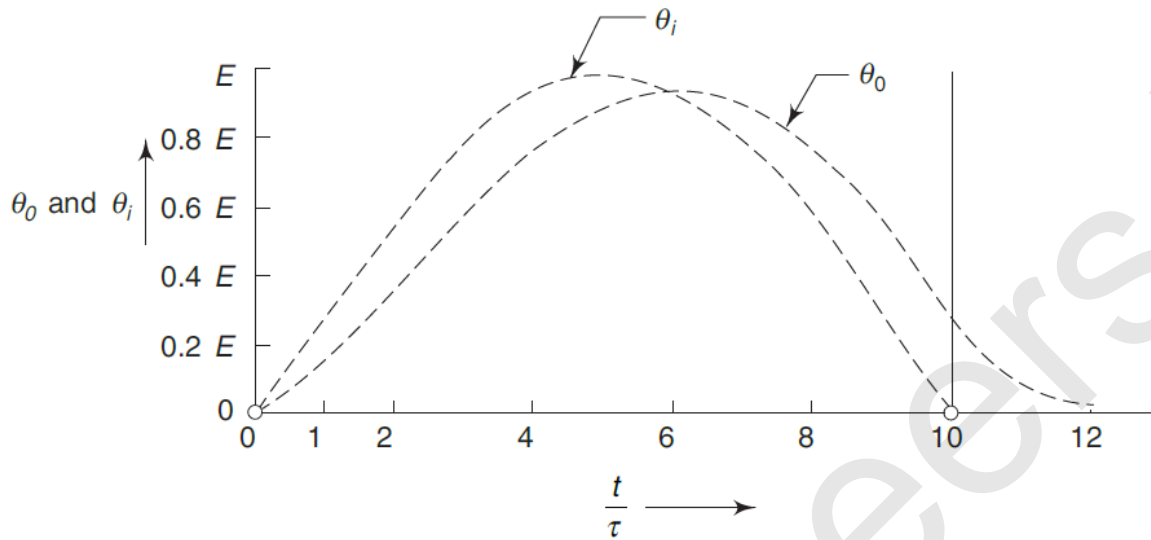
شکل ۳-۲۸. مثال ۳-۵

$$\omega = \frac{\pi}{10\tau} \quad \text{or} \quad T = 10\tau \quad (\text{ب})$$

$$\Rightarrow \theta_o = E [0.286 e^{-t/\tau} + 0.91 \sin \frac{\pi t}{10\tau} - 0.286 \cos \frac{\pi t}{10\tau}]$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۳-۲۹. مثال ۳-۵

برای $t > T$:

$$(\tau D + 1)\theta_o = 0 \Rightarrow \theta_o = A e^{-t/\tau}$$

$$\omega = \frac{\pi}{4\tau} \quad \text{or} \quad T = 4\tau \quad (\text{الف})$$

$$\theta_o(T) = 0.495 \Rightarrow A = 27.03 \Rightarrow \theta_o = 27.03 e^{-t/\tau}$$

$$\omega = \frac{\pi}{10\tau} \quad \text{or} \quad T = 10\tau \quad (\text{ب})$$

$$\Rightarrow A = 6300 \Rightarrow \theta_o = 6300 e^{-t/\tau}$$

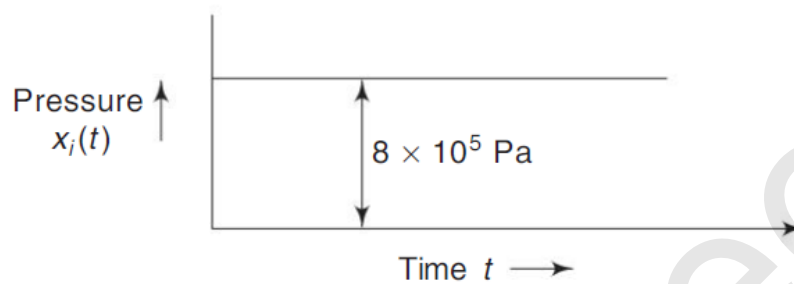
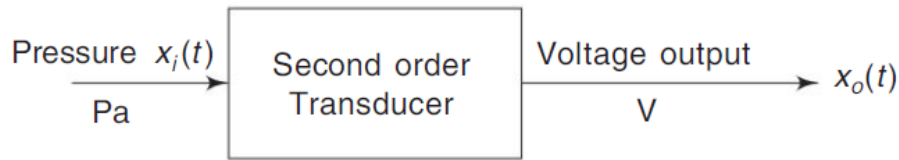
نکته: در حالت ورودی‌های گذرا مدت زمان ورودی باید خیلی بزرگتر از ثابت زمانی سیستم مرتبه یک باشد.

مثال ۳-۶

به یک ترانسدیوسر فشار با $\omega_n = 30 \text{ rad/s}$ ، $\xi = 0.1$ و $K = 1 \mu\text{V}/\text{Pa}$ ، فشار ورودی پله‌ای $8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ اعمال می‌شود. خروجی آنرا به دست آورید.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۳-۳۰. مثال ۳-۶

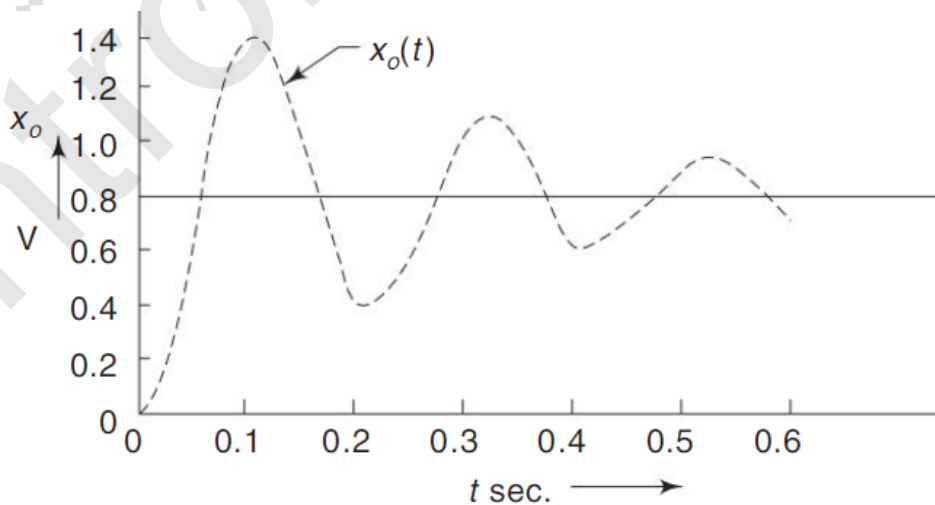
حل:

$$\left(\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n}D + 1\right)x_o(t) = K x_i(t)$$

$$\left(\frac{D^2}{30^2} + \frac{0.2}{30}D + 1\right)x_o(t) = \frac{8 \times 10^5}{10^6} = 0.8$$

$$x_o(t) = K \left[1 - e^{-\xi\omega_n t} \left(\cos \omega_n \sqrt{1-\xi^2} t + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \omega_n \sqrt{1-\xi^2} t \right) \right]$$

$$x_o(t) = 0.8 \left[1 - e^{-3t} (\cos 29.85t + 0.1005 \sin 29.85t) \right]$$



شکل ۳-۳۱. مثال ۳-۶

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

ControlEngineers.ir

فصل سوم

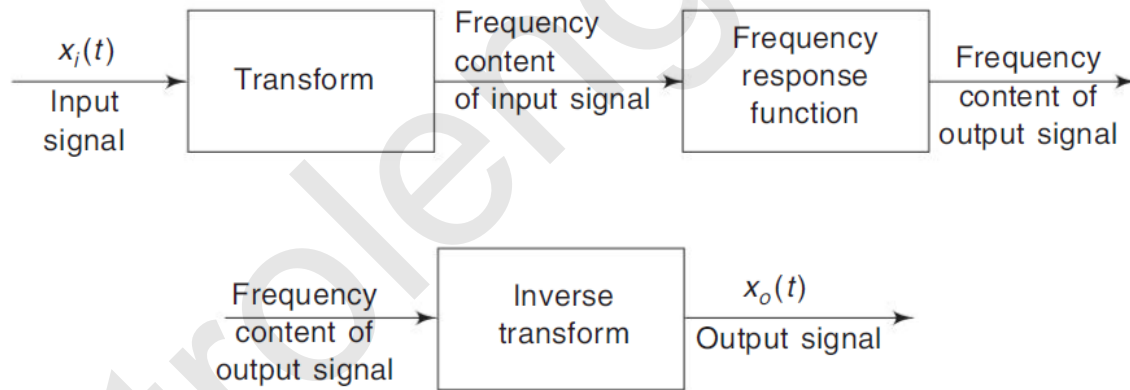
مشخصه‌های دینامیکی ابزار

۳-۴. پاسخ دینامیکی

۳-۴-۳. Transient Input

• روش تبدیل فوریه

در این روش سیگنال ورودی که تابعی از زمان است با استفاده از تبدیل فوریه به تابعی از فرکانس تبدیل می‌شود. نتیجتاً خروجی نیز به صورت تابعی از فرکانس به دست می‌آید.



شکل ۳-۳۲. کاربردهای تبدیل فوریه و معکوس

شرایط لازم:

- به‌طور قطعه قطعه پیوسته و در فاصله مشخصی تعریف شده باشد.
- انتگرال آن در این بازه موجود باشد.
- در هر نقطه ناپیوستگی با استفاده از مقدار میانگینش قابل تعریف باشد.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

تبدیل فوریه:

$$f(\omega) = \int_0^{\infty} x_i(t) e^{-j\omega t} dt, \quad 0 \leq \omega \leq \infty$$

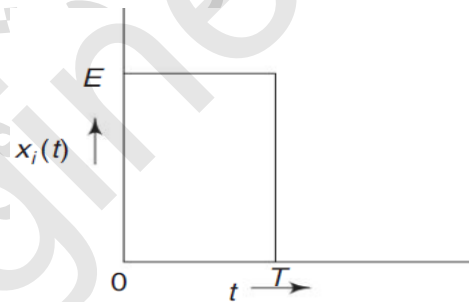
$$f(\omega) = \int_0^{\infty} x_i(t) \cos \omega t dt - j \int_0^{\infty} x_i(t) \sin \omega t dt$$

تبدیل معکوس فوریه:

$$x_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} f(\omega) d\omega$$

پالس مستطیلی به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$x_i(t) = \begin{cases} E, & 0 < t < T \\ 0, & t > T \end{cases}$$



$$f(\omega) = \int_0^T E e^{-j\omega t} dt = \frac{E}{\omega} \sin \omega T + j \frac{E}{\omega} (\cos \omega T - 1) = R \angle \varphi$$

$$R(\omega) = \frac{E}{\omega} \sqrt{2 - 2 \cos \omega T}, \quad \varphi = \tan^{-1} \frac{\cos \omega T - 1}{\sin \omega T}$$

اگر این پالس به یک ابزار مرتبه یک اعمال شود، خروجی برحسب فرکانس مطابق شکل ۳-۳۳ خواهد بود.

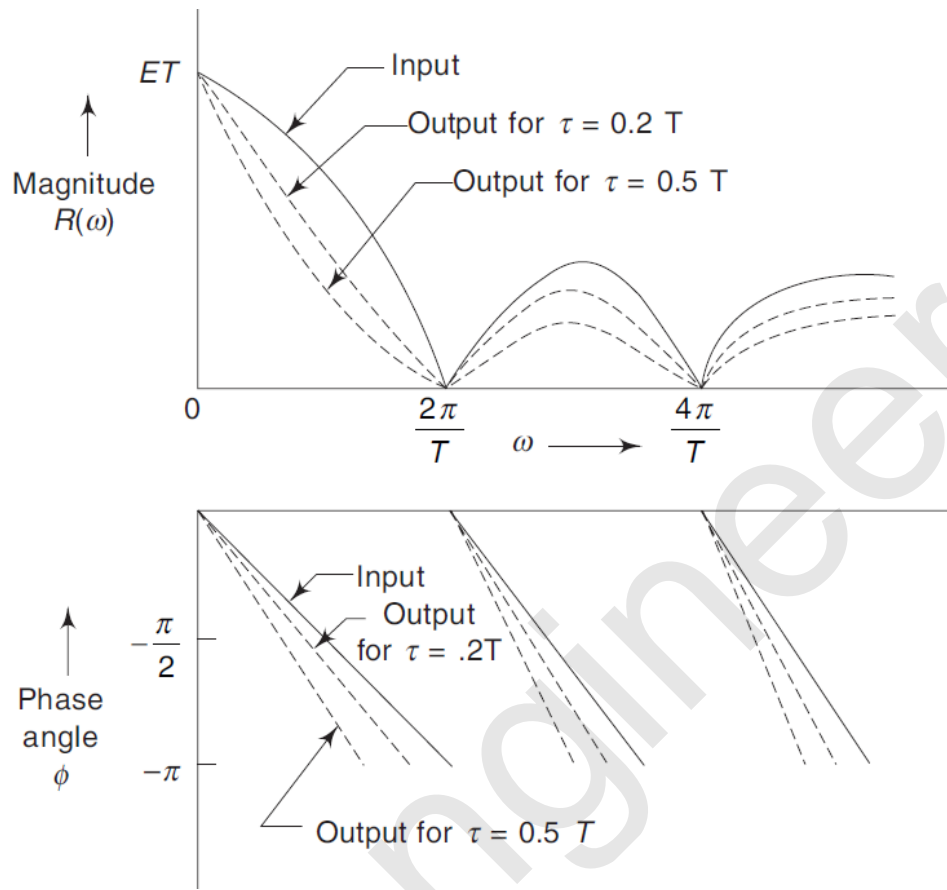
$$(\tau D + 1)x_o(t) = K x_i(t)$$

$$x_o = \frac{K x_i}{\sqrt{1 + \tau^2 \omega^2}} \angle \varphi_1, \quad \varphi_1 = \tan^{-1}(\tau \omega)$$

$$\xrightarrow{FT} x_o(\omega) = K \frac{E}{\omega} \frac{\sqrt{2 - 2 \cos \omega T}}{\sqrt{1 + \tau^2 \omega^2}} \angle (\varphi + \varphi_1)$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۳-۳۳. محتوای فرکانسی سیگنال‌ها

۳-۴-۳. Random Input

سیگنال‌های تصادفی ساکن را می‌توان در روی زمان تناوب معینی به‌طور آماری بیان کرد.

ویژگی‌های آماری:

- میانگین سیگنال Random
- مقدار rms یا مقدار ریشه مجذور میانگین
- میانگین مجذور چگالی طیفی
- تابع خودهمبستگی

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

• میانگین مقدار سیگنال Random

$$\bar{x}_i(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_i(t) dt$$

• میانگین مجذور سیگنال Random

$$\bar{x}_i^2(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_i^2(t) dt$$

تعیین پاسخ ابزار با معلوم بودن چگالی طیفی میانگین ورودی:

$$x_i(t) = X_i \sin \omega t$$

$$x_o(t) = M(\omega) X_i \sin \omega t$$

$$S_o(\omega) = [M(\omega)]^2 S_i(\omega)$$

$M(\omega)$: پاسخ فرکانسی ابزار

$S_i(\omega)$: چگالی طیفی میانگین سیگنال ورودی

$S_o(\omega)$: چگالی طیفی میانگین سیگنال خروجی

۳-۵. تکنیک‌های جبران‌سازی برای بهبود پاسخ دینامیکی

۳-۵-۱. جبران‌سازی سیستم مرتبه یک

$$(1 + \tau D)V_1 = K\theta_1(t)$$

سیستم مرتبه یک (ترموکوپل):

τ : ثابت زمانی

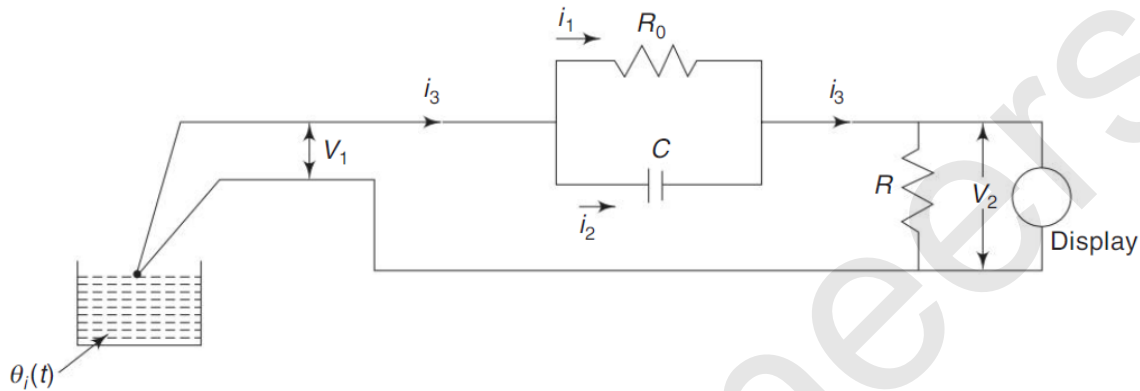
K : حساسیت استاتیکی

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

$\theta_i(t)$: دمای ورودی که اندازه‌گیری می‌شود

V_1 : ولتاژ خروجی



شکل ۳-۳۴. سیستم مرتبه یک با جبران‌سازی

برای کاهش مقدار موثر ثابت زمانی، ولتاژ V_1 را می‌توان به مداری مانند شکل ۳-۳۴ که خروجی‌اش V_2 است اعمال کرد.

$$V_2 = i_3 R = (i_1 + i_2) R$$

$$i_1 = \frac{V_1 - V_2}{R_0}, \quad i_2 = C \frac{d}{dt} (V_1 - V_2)$$

$$\Rightarrow V_2 = \left[\frac{V_1 - V_2}{R_0} + C \frac{d}{dt} (V_1 - V_2) \right] R$$

$$\Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \alpha \left[\frac{1 + \tau_0 D}{1 + \alpha \tau_0 D} \right], \quad \alpha = \frac{R}{R + R_0}, \quad \tau_0 = R_0 C$$

اگر با انتخاب R_0 و C مقدار τ_0 به نحوی انتخاب شود که $\tau_0 = \tau$ شود:

$$\Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \alpha \left[\frac{1 + \tau D}{1 + \alpha \tau D} \right] \quad \begin{matrix} (1 + \tau D)V_1 = K\theta_i \\ \Rightarrow \end{matrix} \quad (1 + \alpha \tau D)V_2 = \alpha K\theta_i(t)$$

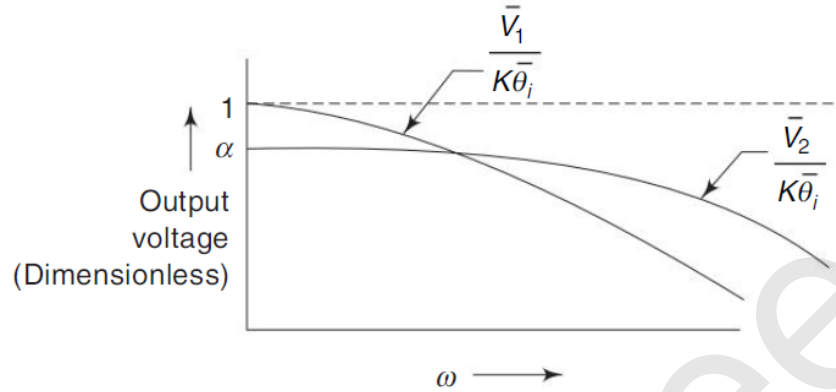
ثابت زمانی موثر: $\alpha \tau$ ($\alpha < 1$)

حساسیت استاتیکی: αK ($\alpha < 1$)

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

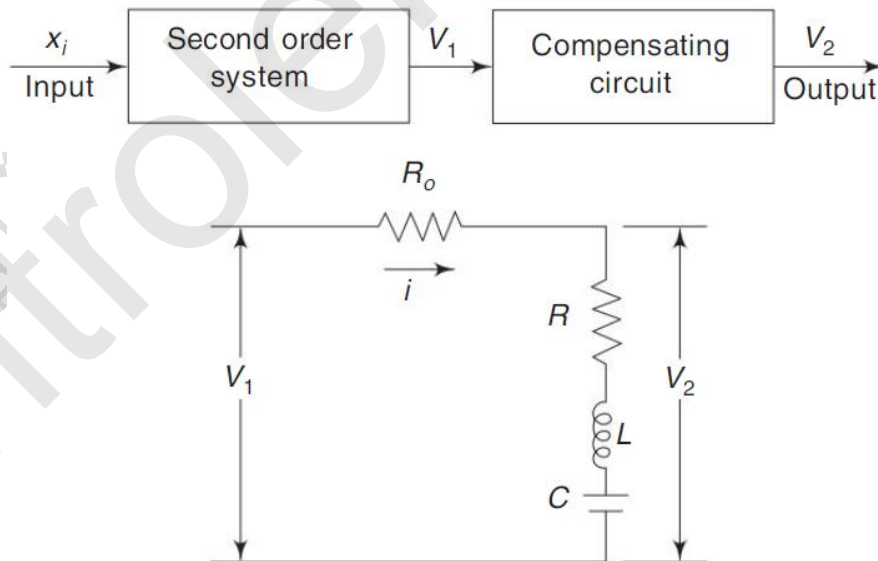
به‌ازای ورودی: $\theta_i = \bar{\theta}_i \sin \omega t$



شکل ۳-۳۵. پاسخ فرکانسی سیستم‌های جبران‌سازی شده و جبران‌سازی نشده

۳-۵-۱. جبران‌سازی سیستم مرتبه دو

معمولاً میرایی در عمل کوچک است.



شکل ۳-۳۶. جبران‌سازی سیستم مرتبه دو

$$V_1 = (R_0 + R + LD + \frac{1}{CD})i$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

$$V_2 = V_1 - i R_0$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{LCD^2 + RCD + 1}{LCD^2 + (R_0 + R)CD + 1}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{D^2}{\omega_1^2} + \frac{2\xi_1}{\omega_1} D + 1}{\frac{D^2}{\omega_1^2} + \frac{2\xi_2}{\omega_1} D + 1}, \quad \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad \xi_1 = \frac{R}{2\sqrt{L/C}}, \quad \xi_2 = \frac{R + R_0}{2\sqrt{L/C}}$$

$$\left(\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} D + 1\right)V_1 = K x_i$$

اگر مدار جبران‌ساز طوری طراحی شود که $\omega_1 = \omega_n$ و $\xi_1 = \xi$:

$$\left(\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi_2}{\omega_n} D + 1\right)V_2 = K x_i$$

با توجه به اینکه $\xi_2 > \xi_1$ میرایی موثر با جبران‌سازی افزایش می‌یابد.

مثال ۳-۷.

ترموکوپلی با ثابت زمانی $\tau = 0.3^{\text{sec}}$ و حساسیت استاتیکی $0.04 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ناگهان درون روغن داغ با دمای 100°C فرو برده می‌شود. دمای اولیه اتصال‌های اندازه‌گیری و مبنای ترموکوپل 25°C است.

الف) در $t = 0.1, 0.3, 1^{\text{sec}}$ خروجی را به دست آورید.

ب) یک مدار جبران‌ساز طراحی کنید که ثابت زمانی نصف شود. برای این سیستم خروجی را در زمان‌های داده شده در قسمت (الف) تعیین کنید.

حل:

(الف)

$$100 - 25 = 75^{\circ}\text{C}$$

حداکثر اختلاف بین اتصال‌های اندازه‌گیری و مبنا:

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

برای ورودی پله‌ای با $\theta_i = 75^\circ C$ ولتاژ خروجی:

$$V_1 = K[1 - e^{-t/\tau}] \theta_i$$

$$V_1 = 0.04 \times 75 [1 - e^{-t/0.3}] \Rightarrow V_1 = 3 [1 - e^{-t/0.3}]$$

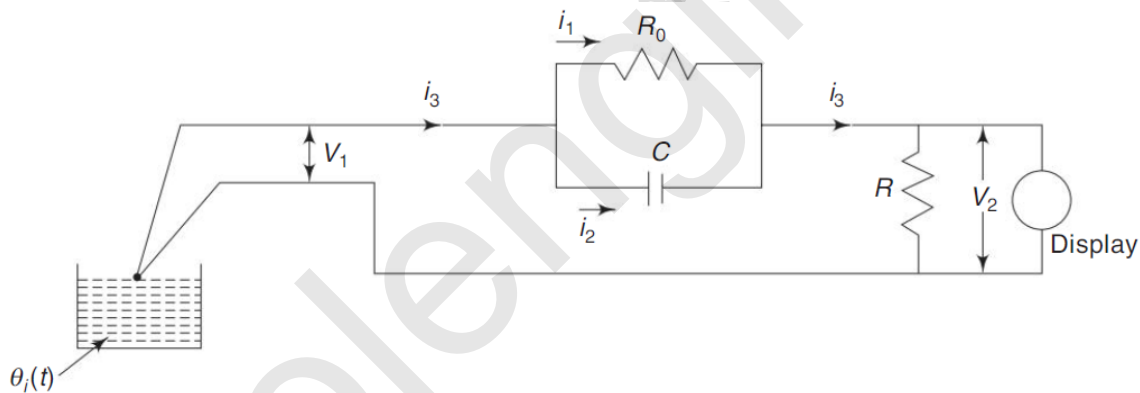
$$t = 0.1 \text{ sec} \Rightarrow V_1 = 3 [1 - e^{-0.1/0.3}] = 0.85 \text{ mV}$$

$$t = 0.3 \text{ sec} \Rightarrow V_1 = 3 [1 - e^{-0.3/0.3}] = 1.9 \text{ mV}$$

$$t = 1 \text{ sec} \Rightarrow V_1 = 3 [1 - e^{-1/0.3}] = 2.89 \text{ mV}$$

(ب)

$$\tau = 0.3 \quad , \quad \tau_{eff} = \alpha \tau = 0.15$$



$$\tau = \tau_0 = R_0 C = 0.3$$

$$\alpha = 0.5 = \frac{R}{R + R_0} \quad , \quad \tau = 0.3 = R_0 C$$

$$\Rightarrow R_0 = 1 \text{ M}\Omega \quad , \quad C = 0.3 \mu\text{F}$$

با فرض: $R = 1 \text{ M}\Omega$

با جبران‌سازی:

$$\tau_{eff} = 0.15 \quad , \quad K_{eff} = \alpha K = 0.02 \text{ mV}/^\circ C$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

برای $\theta_i = 75^\circ C$ ولتاژ خروجی:

$$V_2 = K[1 - e^{-t/\tau}] \theta_i$$

$$V_2 = 0.02 \times 75 [1 - e^{-t/0.15}] \Rightarrow V_2 = 1.5 [1 - e^{-t/0.15}]$$

$$t = 0.1^{\text{sec}} \Rightarrow V_2 = 1.5 [1 - e^{-0.15}] = 0.729 \text{ mV}$$

$$t = 0.3^{\text{sec}} \Rightarrow V_2 = 1.5 [1 - e^{-0.45}] = 1.297 \text{ mV}$$

$$t = 1^{\text{sec}} \Rightarrow V_2 = 1.5 [1 - e^{-6.67}] = 1.498 \text{ mV}$$

مثال ۳-۸

یک سیستم مرتبه دو با $\omega_n = 1000 \text{ rad/s}$ ، $\xi = 0.2$ و $K = 10 \text{ mV/mm}$ ، پارامترهای شبکه جبران‌ساز را به دست آورید به طوری که نسبت میرایی تا $\xi = 0.7$ افزایش یابد.

حل:

$$\omega_1 = \omega_n = 1000 \text{ rad/s}$$

$$\xi_1 = \xi = 0.2$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC}} = 1000, \quad \xi_1 = \frac{R}{2\sqrt{L/C}} = 0.2, \quad \xi_2 = \frac{R+R_0}{2\sqrt{L/C}} = 0.7$$

با فرض: $L = 10 \text{ H}$

$$\Rightarrow C = 10^{\mu\text{F}}, \quad R = 4000\Omega, \quad R_0 = 10 \text{ K}\Omega$$

فصل چهارم

المان‌های ترنسدیوسر

۴-۱. مقدمه

مزیت سیگنال الکتریکی به‌عنوان سیگنال خروجی:

- فقدان آثار لختی و اصطکاک برخلاف ترنسدیوسرهایی با خروجی‌های مکانیکی
- تقویت نسبتاً آسان صورت می‌گیرد
- نمایش و ثبت بسیار آسان می‌شود
- ترنسدیوسرها را می‌توانند به‌صورت فشرده و قابل‌حمل باشند

دسته‌بندی آنالوگ ترنسدیوسرها:

- انواع الکترومکانیکی، شامل انواع مقاومت پتانسیومتر، القایی، خازنی، پیزوالکتریک، استرین گیج مقاومتی، یونیزاسیون و مکانو-الکترونیکی
- ترنسدیوسرهای نوری-الکتریکی، شامل انواع Photo-emissive، Photo-conductive و Photo-voltaic

دسته‌بندی دیجیتالی ترنسدیوسرها:

- انواع مولد فرکانسی
- انواع اینکدر دیجیتالی

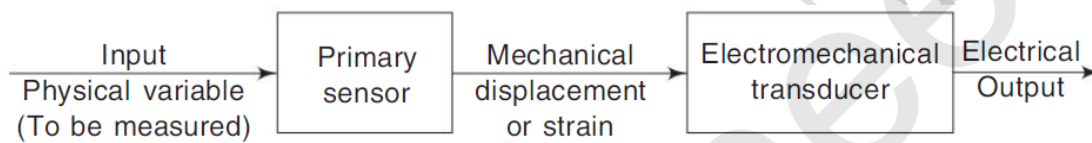
Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

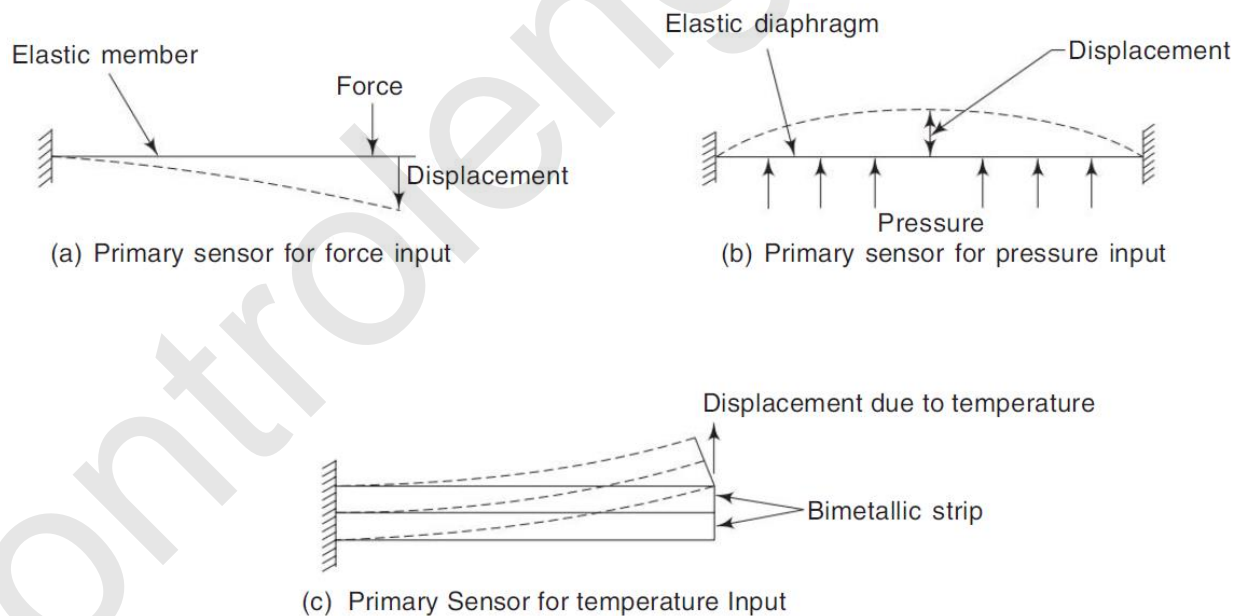
۲-۴. ترنسیدیوسرهای آنالوگ

۱-۲-۴. انواع الکترومکانیکی

در این نوع ترنسیدیوسرها، یک خروجی الکتریکی بر اثر یک ورودی جابه‌جایی یا strain مکانیکی تولید می‌شود.



شکل ۱-۴. شماتیکی برای اندازه‌گیری با استفاده از ترنسیدیوسر الکترومکانیکی



شکل ۲-۴. تبدیل پارامترهای ورودی به جابه‌جایی مکانیکی

Instrumentation

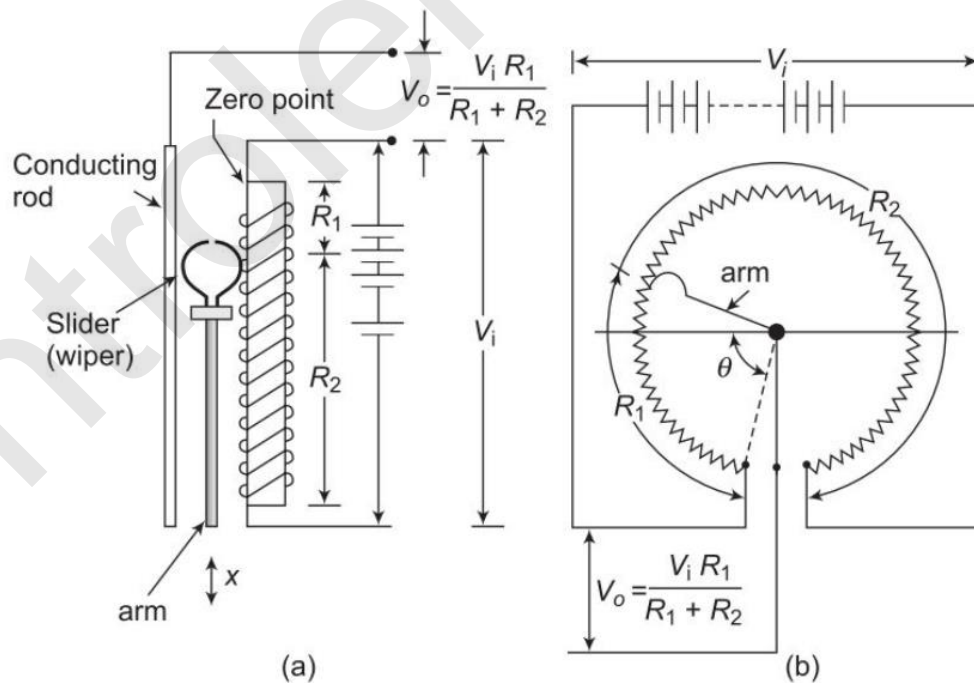
COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

عوامل موثر در انتخاب ترنسدیوسرهای حرکت (Motion transducer):

- اندازه حرکت
- نوع رابطه ورودی-خروجی
- مشخصات استاتیکی و دینامیکی ترنسدیوسر
- نوع تماسی یا مجاورتی (Attachment or proximity)
- نوع Self-generating یا با منبع تغذیه خارجی
- نوع مدار مربوطه

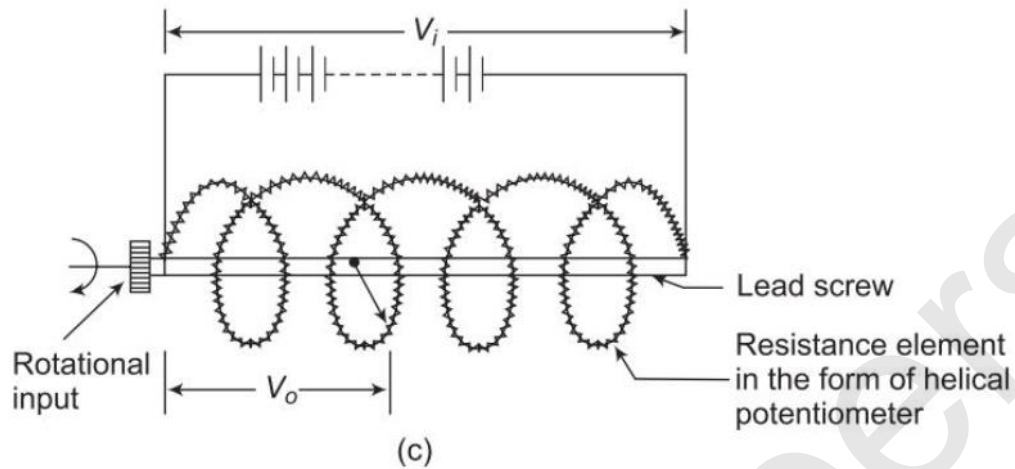
• ترنسدیوسر نوع مقاومت پتانسیومتری

پتانسیومتر سیم‌پیچی را می‌توان به‌عنوان ترنسدیوسر برای تبدیل جابه‌جایی مکانیکی به یک خروجی الکتریکی به‌کار برد. این ابزار ممکن است از نوع جابه‌جایی خطی، زاویه‌ای یا ترکیبی از هر دو باشد.



Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۳-۴. ترنسدمیسره‌های پتانسیومتری (a) Linear motion ، (b) Rotary motion (c) ، Linear and Rotary motion

امروزه پتانسیومتر مقاومتی Step less ، دارای وضوح بالا، نویز کم، دقت عالی و Reliability بالا هستند.

مزیت‌های Potentiometric Transducers :

- خروجی الکتریکی نسبتاً بالا برای مدار کنترلی
- قطعات و مدارهای الکتریکی ارزان‌تر
- کار و نظارت آسان
- مناسب برای جابه‌جایی‌های نسبتاً بزرگ
- کار با AC و DC
- عدم نیاز به تقویت
- در دسترس بودن آسان در اشکال، سایز و رنج‌های مختلف
- قابل طراحی برای اندازه‌گیری آسان فشار، نیرو، سطح مایع، شتاب و سایر اندازه‌گیری‌های مربوط به جابه‌جایی
- Resolution بالا همراه با تغییرات Step less

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

محدودیت‌های Potentiometric Transducers :

- تغییر Stepwise مقاومت در مورد پتانسیومترهای Wire wound
- در پتانسیومترهای Wire wound ، Resolution ، به دلیل سایز سیم محدود است.
- خروجی به لرزش حساس است.
- خروجی با سایش نوین بالایی ایجاد می‌کند.
- معمولاً در اندازه‌های نسبتاً بزرگ موجود است.
- عمر محدود به دلیل فرسودگی و پارگی قطعات متحرک

کاربردهای متداول Potentiometric Transducers :

- رکورد نمودار نواری (Strip chart record)
- در تانک‌های جنگی و هواپیماهای نظامی (نوع چرخشی)
- در Machine tools مرتبط با کاربردهای رباتیک

• ترنسدیوسر نوع القایی

در این نوع ترنسدیوسرها، ویژگی‌های مغناطیسی مدار الکتریکی در اثر حرکت جسم تغییر می‌کند.

• نوع Self-generating

در این نوع ترنسدیوسر سیگنال ولتاژ به علت حرکت نسبی یک رسانا و یک میدان مغناطیسی تولید می‌شود. (انواع ترنسدیوسرهای الکترو دینامیکی، الکترومغناطیسی و Eddy circuit)

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

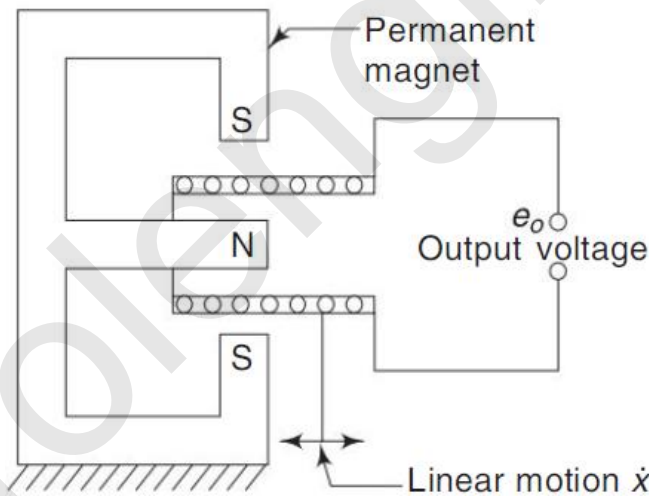
• نوع Non-self generating یا External power source

برای انرژی دادن به یک سیم پیچ به یک منبع خارجی نیاز است. (Attachment type inductance transducer)
 ، نوع Air gap ، نوع LVDT ، (Magneto-strictive type of transducer)

ترنسیدیوسر نوع Self-generating

• ترنسیدیوسر الکترو دینامیکی

این ترنسیدیوسر از نوع Attachment به شمار می رود.



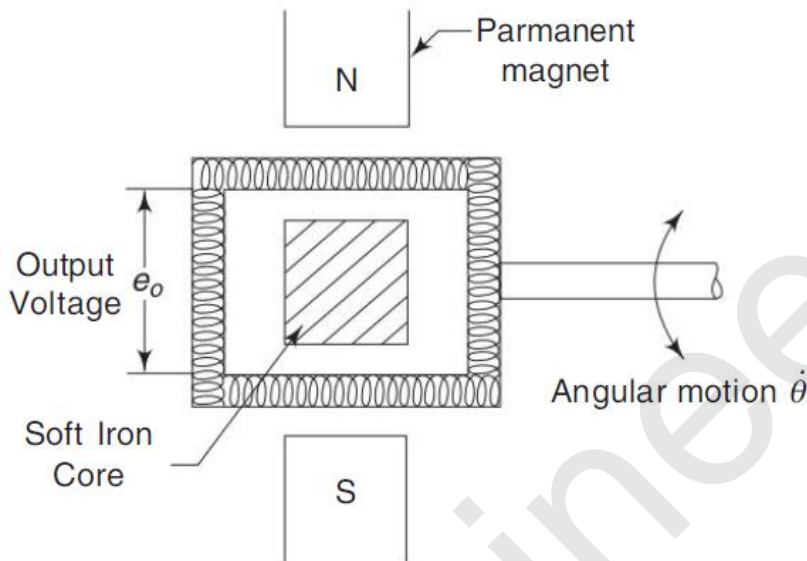
شکل ۴-۴. ترنسیدیوسر الکترو دینامیکی برای حرکت خطی

ولتاژ تولید شده در سیم پیچ با نرخ تغییر شار و در نتیجه سرعت حرکت جسم متناسب است.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

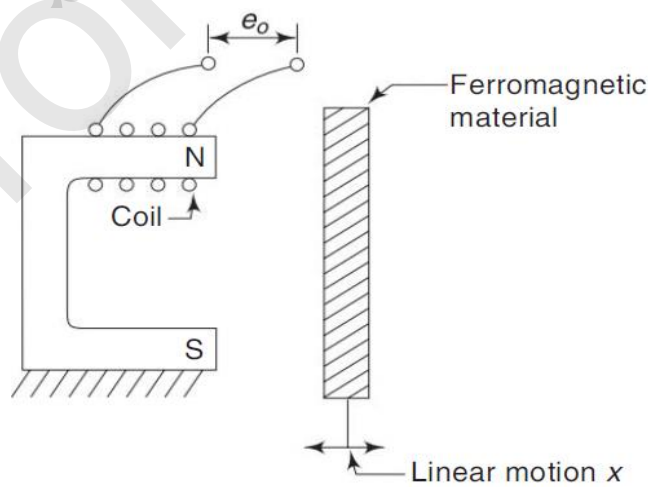
- ترنسیدیوسر الکترو دینامیکی برای اندازه گیری حرکت چرخشی



شکل ۴-۵. ترنسیدیوسر الکترو دینامیکی برای حرکت چرخشی (Rotary motion)

ولتاژ خروجی متناسب با سرعت زاویه ای سیم پیچ مدار است.

- ترنسیدیوسر الکترو مغناطیسی



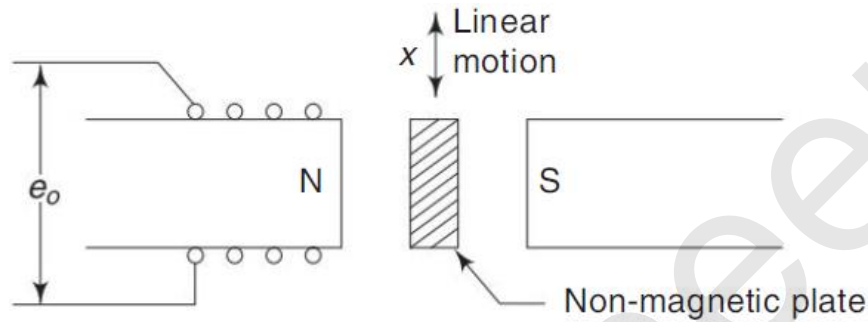
شکل ۴-۶. ترنسیدیوسر الکترو مغناطیسی

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

از نوع Proximity بوده و برای حرکت‌های کوچک خطی است.

• ترنسیدیوسر نوع Eddy current

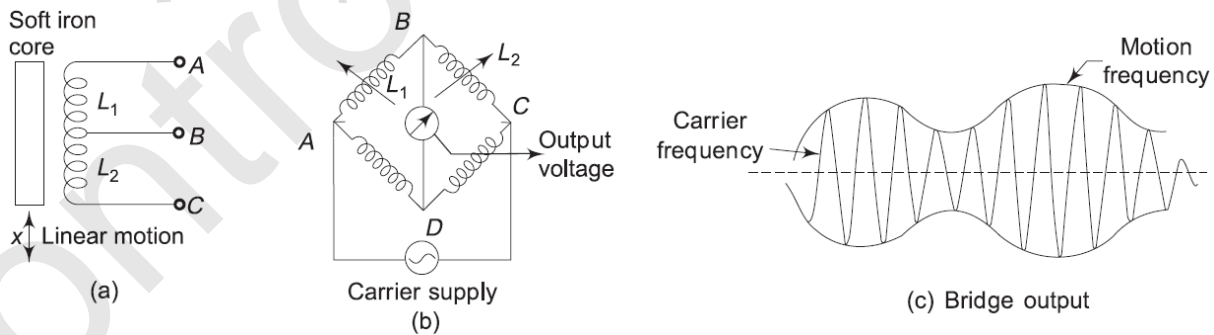


شکل ۴-۷. ترنسیدیوسر Eddy current

ولتاژ خروجی سیم‌پیچ با نرخ تغییر Eddy current با شتاب صفحه متناسب است.

ترنسیدیوسر نوع Non-self-generating

از نوع Attachment است.

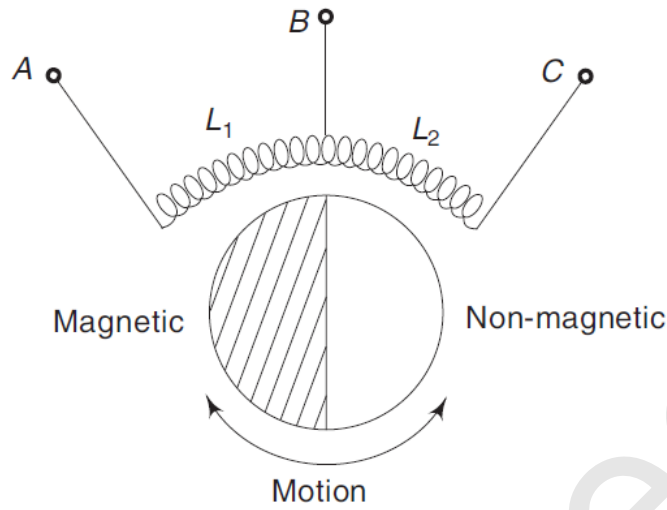


شکل ۴-۸ Variable inductance transducer

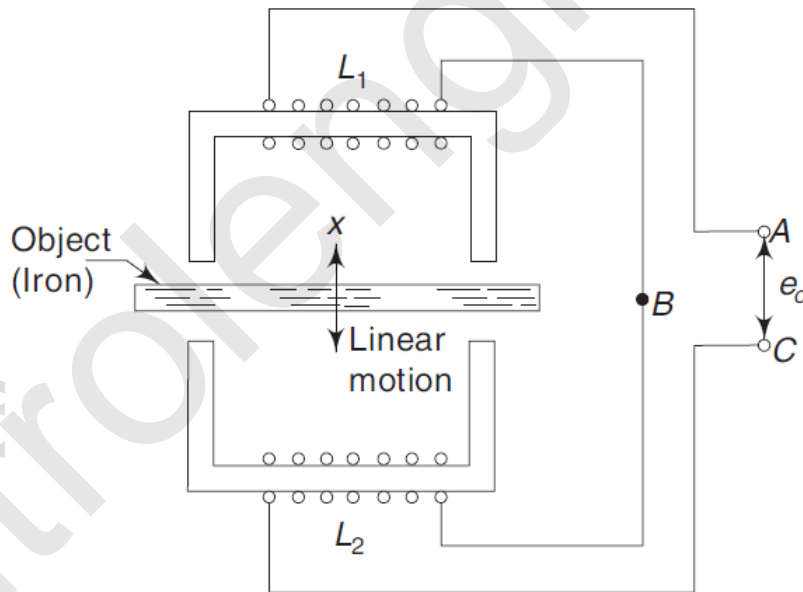
مقدار ولتاژ خروجی متناسب با جابه‌جایی است.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۴-۹. Variable inductance transducer برای حرکت چرخشی



شکل ۴-۱۰. Proximity Variable reluctance transducer نوع

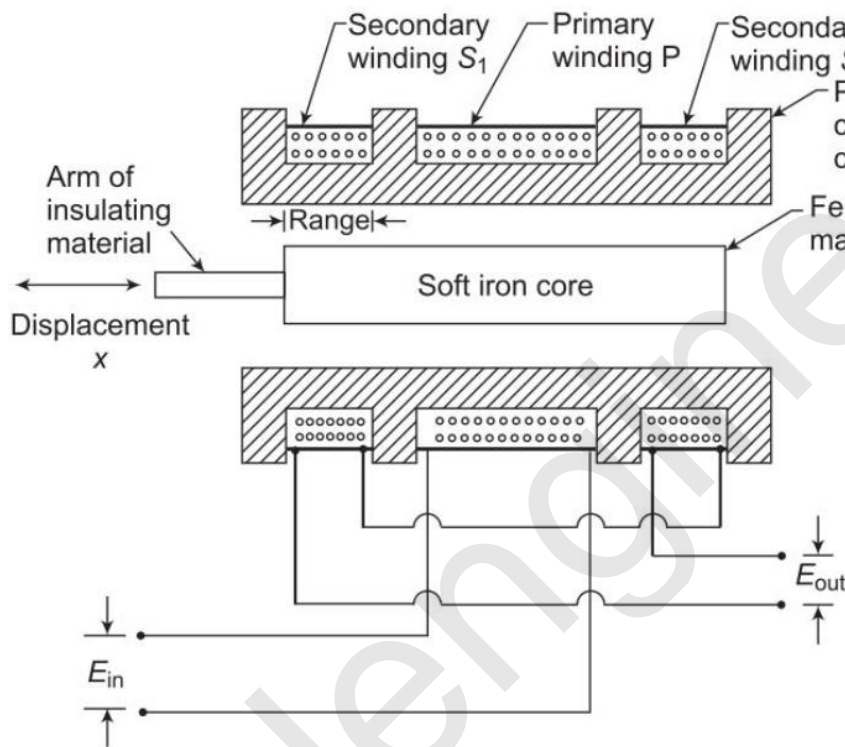
خروجی متناسب با جابه‌جایی جسم است.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

Linear variable differential transducer (LVDT)

یکی از پرکاربردترین ترنسدیوسرهای است که براساس Self induction کار می‌کند. برای اندازه‌گیری دقیق جابه‌جایی‌ها با خروجی الکتریکی است.



شکل ۴-۱۱. LVDT

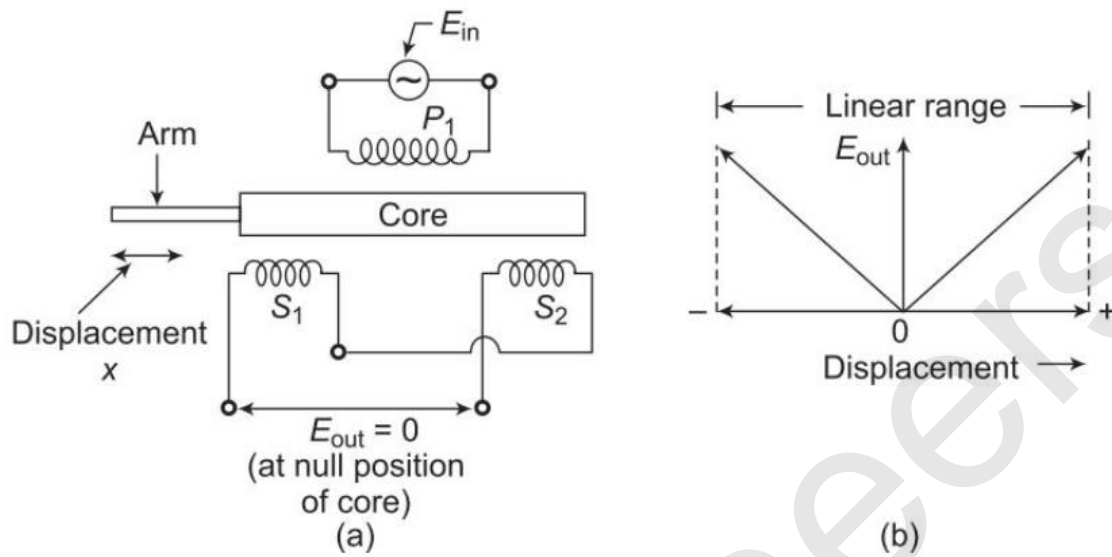
ولتاژ تحریک تغذیه شده به سیم‌پیچ اولیه ولتاژ ac با فرکانس متغیر از ۵۰ هرتز تا ۲۵ کیلوهرتز است.

در Differential mode ، وقتی هسته آهنی نرم در موقعیت مرکزی قرار دارد، به این موقعیت مرکزی هسته در Electrical Zero Position (EZP) گفته می‌شود. در این حالت بایستی ولتاژ خالص خروجی صفر باشد که در عمل به دلیل وجود Residual voltage (کمتر از ۱ درصد مقدار حداکثر خروجی در محدوده خطی) چنین نیست.

علت: عدم تعادل الکتریکی، عدم تعادل مغناطیسی، اشباع هسته مغناطیسی ، ...

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۴-۱۲. شماتیکی از مدار الکتریکی پایه LVDT و ولتاژ برای جابه‌جایی هسته LVDT

LVDT های تجاری موجود:

محدوده اندازه‌گیری: $\pm 1 \text{ mm}$ تا $\pm 200 \text{ mm}$

حساسیت: 60 V/mm

خطای خطی: $\pm 0.2\%$

Resolution: 0.01% of Full range

نکته.

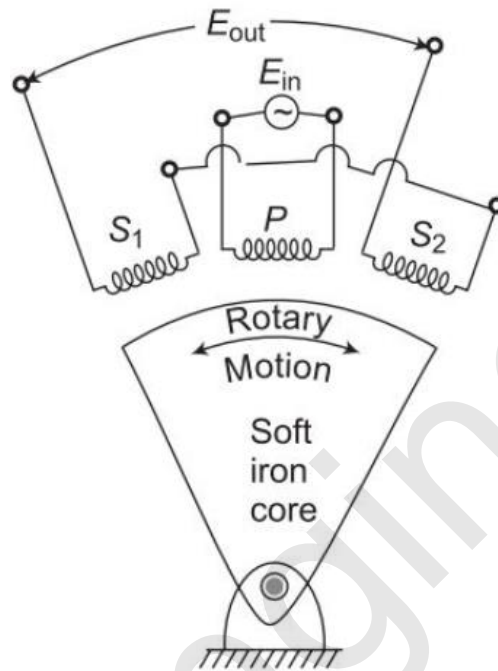
ترنسدمیوسر (DCDT) Direct current differential transducer نیز وجود دارد که از منبع dc برای ورودی

Power استفاده می‌کند. از از یک مدار اینورتر استفاده می‌کند.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

Rotating variable differential transducer (RVDT)



شکل ۴-۱۳. شماتیکی از RVDT

محدودیت اصلی RVDT این است که می‌تواند جابه‌جایی‌های زاویه‌ای را در یک رنج محدود اندازه‌گیری کند.

مزیت‌های LVDT :

- پاسخ خروجی در رنج عملکرد خطی است. در LVDT های تجاری خطای خطی در حد $\pm 0.2\%$ است.
- پاسخ ترنس‌دیوسر از نوع Steppless است.
- Resolution بالایی دارند.
- خروجی نسبتاً بالایی می‌دهد. نیازی به تقویت ندارد.
- Sensitivity بالایی دارد.
- هیستریزیس نشان نمی‌دهد.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

- در سایزهای متفاوت زیادی از 1 mm تا 200 mm موجود است.
- درجه سختی (Ruggedness) بالایی دارد.
- Overload capacity بالایی دارد.
- مشخصات دینامیکی معقولی دارد.
- مقرون به صرفه است.
- مصرف برق پایینی در حد ۱ وات دارد.

محدودیت‌های LVDT :

- فقط با تحریک ac با فرکانس متغیر از ۵۰ هرتز تا ۲۵ کیلوهرتز است.
- خروجی ترنسدیوسر تحت تاثیر میدان مغناطیسی قوی است.

کاربردهای LVDT :

- به عنوان میکرومتر الکترونیکی استفاده می‌شود (اندازه‌گیری ضخامت و ابعاد).
- همراه با ترنسدیوسرهای الاستیک برای اندازه‌گیری فشار، نیرو، گشتاور استفاده می‌شود.

نمونه‌های رایج:

- Proving ring type of Load Cell (with LVDT)
- Diaphragm type/Bellows type pressure gauge (with LVDT)
- Bourdon pressure gauge with LVDT for electrical read out

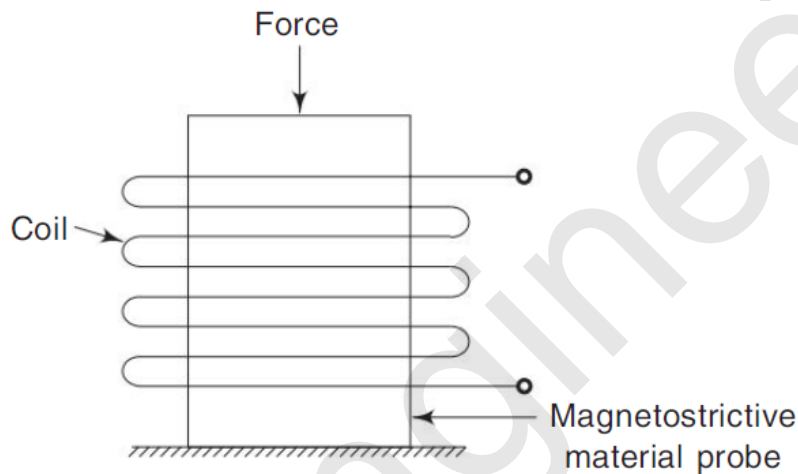
Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

Magnetostrictive type of transducer

برای اصل استوار است که نفوذپذیری مغناطیسی یک ماده فرومغناطیس (نیکل) زمانی که ماده تحت فشار مکانیکی قرار می‌گیرد تغییر می‌کند.

این نوع ترنسدیوسرها امپدانس بالا، پاسخ دینامیکی خوب دارند. لیکن به کالیبراسیون فردی نیاز دارند.



شکل ۴-۱۴. Magnetostrictive Transducer

فصل چهارم

المان‌های ترنس‌دیوسر

۴-۲-۱. انواع الکترومکانیکی

- ترنس‌دیوسر نوع خازنی

یک ترنس‌دیوسر Displacement-sensitive است.

$$C = \frac{1}{3.6\pi} \varepsilon \frac{A}{d} = 0.0885 \varepsilon \frac{A}{d}$$

C : ظرفیت (PF)

A : مساحت صفحات (cm^2)

d : فاصله بین صفحات (cm)

ε : ثابت دی‌الکتریک ماده بین صفحات ($\varepsilon_{air} = 1$)

بر اساس تغییر در ظرفیت کار می‌کند که با تغییر یکی از ۳ متغیر A ، d و ε ممکن است ایجاد شود.

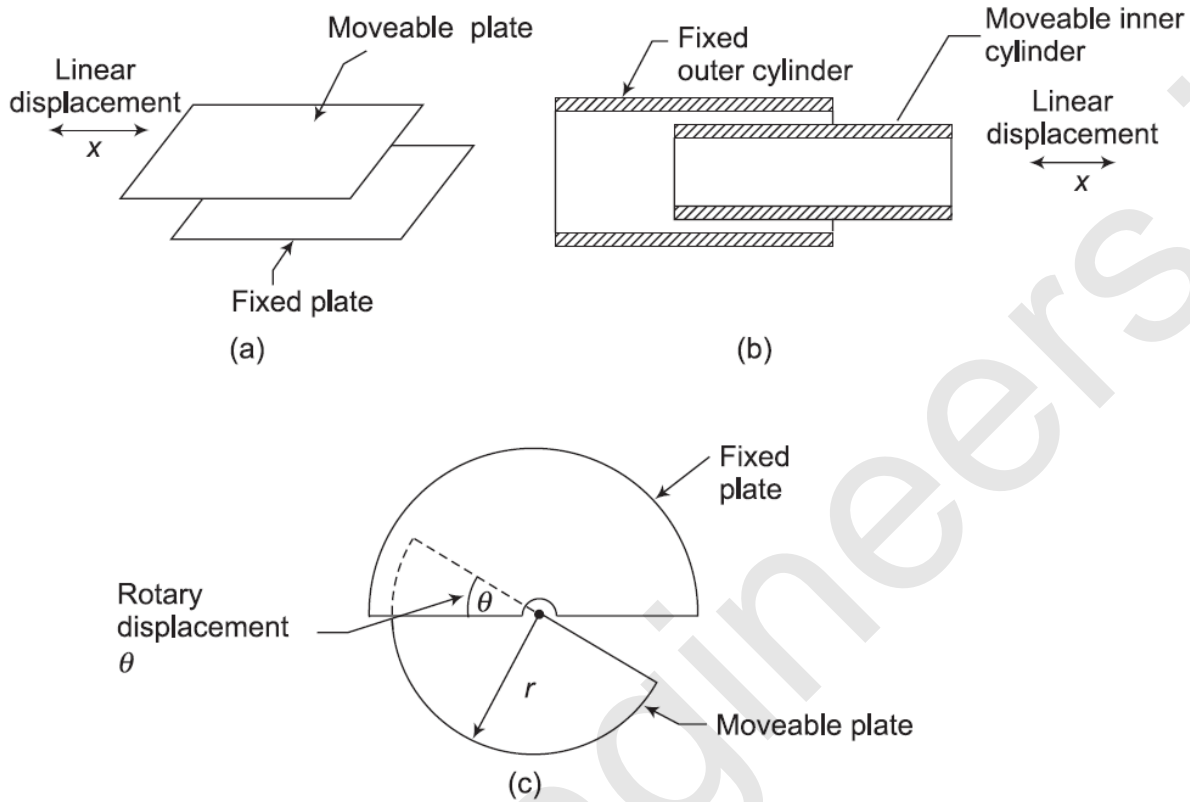
- ترنس‌دیوسر خازنی با استفاده از تغییر در ناحیه هم‌پوشانی A

ظرفیت خازن متناسب است با تغییر ناحیه.

در اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های متوسط تا بزرگ (از 1mm تا چند cm) مناسب است.

Instrumentation

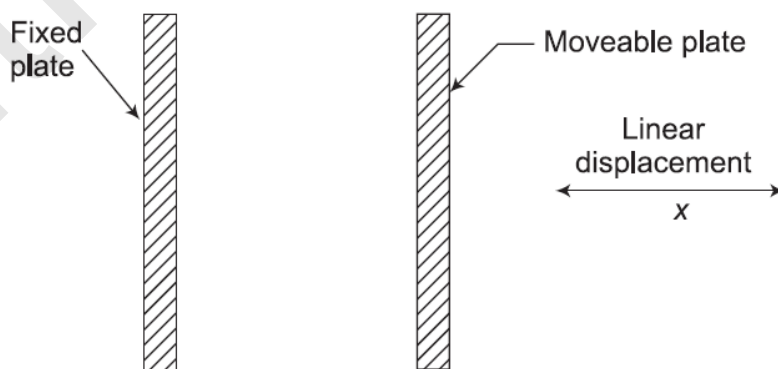
COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۴-۱۵. ترنسیدیوسر خازنی بر اساس اصل تغییر در ظرفیت به دلیل تغییر در ناحیه همپوشانی ناشی از جابه‌جایی (a) خطی صفحه متحرک (b) خطی سیلندر داخلی (c) زاویه‌ای صفحه متحرک

• ترنسیدیوسر خازنی با استفاده از تغییر در gap بین صفحات (d)

تغییر ظرفیت خازن با تغییر فاصله gap رابطه معکوس دارد. لذا خروجی مشخصه غیرخطی دارد.

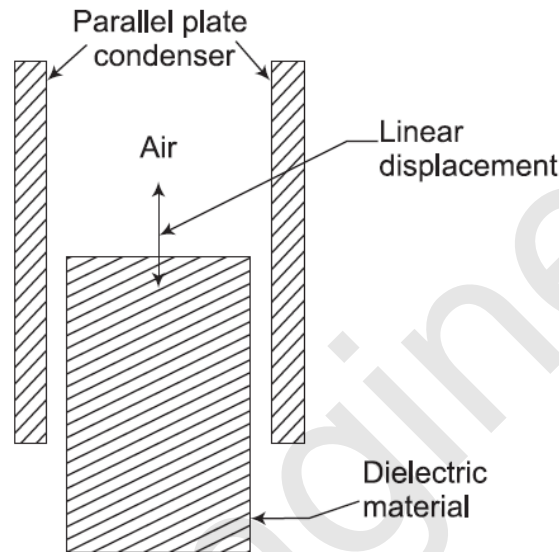


شکل ۴-۱۶. ترنسیدیوسر خازنی بر اساس اصل تغییر در gap

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

- ترنسیدیوسر خازنی با استفاده از تغییر در ثابت دی الکتریک تغییر در ظرفیت به صورت خطی با جابه جایی تغییر می کند.
- برای اندازه گیری تغییر سطح مایع در یک فرایند صنعتی به کار می رود.



شکل ۴-۱۷. ترنسیدیوسر خازنی بر اساس اصل تغییر در Dielectric

مزایای ترنسیدیوسرهای جابه جایی خازنی:

- سایز کوچکی دارند و از نوع Compact هستند. به نیروی کمی برای Operation نیاز دارند.
- Sensitivity و Stability بالایی دارند.
- Resolution بالایی در حد ۲/۵ میکرون دارند، همین طور Accuracy بالا.
- پاسخ فرکانسی بسیار خوبی دارند.
- اثرات Loading به دلیل امپدانس ورودی بالای ترنسیدیوسر حداقل است.
- اندازه گیری های Non-contact با رنج اندازه گیری خوب از ۰ تا ۲۵ سانتی متر امکان پذیر است.

Instrumentation

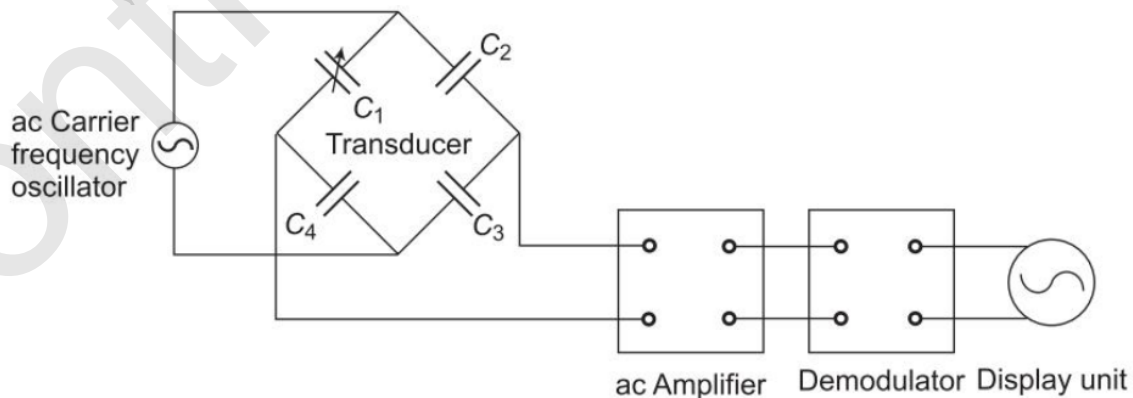
COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

محدودیت‌های ترنسدیوسرهای جابه‌جایی خازنی:

- قسمت‌های فلزی خازن‌ها باید از یکدیگر عایق‌بندی شوند.
- Cable capacitance matching الزامی است. در غیر اینصورت خطای Loading وجود دارد.
- دارای مدارهای الکترونیکی پیچیده است.
- تغییر در رطوبت، گرد و غبار Grinding می‌تواند باعث تغییر در دی‌الکتریک شود و ممکن است خطا ایجاد کند.

کاربردها:

- گیج‌های جابه‌جایی خازنی برای اندازه‌گیری ضخامت کم کاغذ در کارخانه‌های کاغذ، ضخامت پره‌های چرخان توربین، فرورفتگی‌های پیچیده و ... استفاده می‌شود.
- این ترنسدیوسرها معمولاً با Modifier های مکانیکی برای اندازه‌گیری سطح مایع، چگالی، فشار، نیرو و ... استفاده می‌شوند.
- رطوبت را می‌توان با استفاده از این ترنسدیوسرها اندازه‌گیری کرد.
- در کاربردهای Bio-medical ، استفاده از Condenser microphone برای مونیتورینگ صداهای تنفسی و قلبی است.

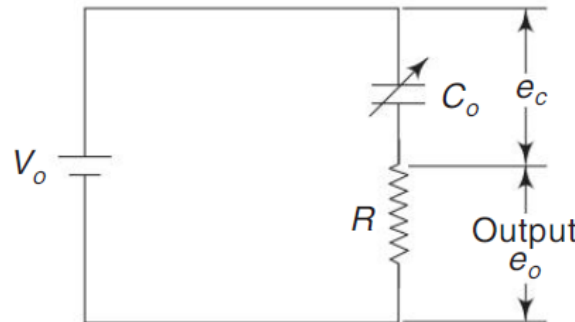


شکل ۴-۱۸. مدار مرتبط برای ترنسدیوسر خازنی با استفاده از ac Carrier frequency Oscillator

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

نوع دیگر:



شکل ۴-۱۹. مدار dc برای ترنسدیوسر خازنی

قابل استفاده برای اندازه‌گیری‌های دینامیکی

ولتاژ V_0 (dc) بار Q را در ترنسدیوسر با ظرفیت C_0 ایجاد می‌کند که در آن:

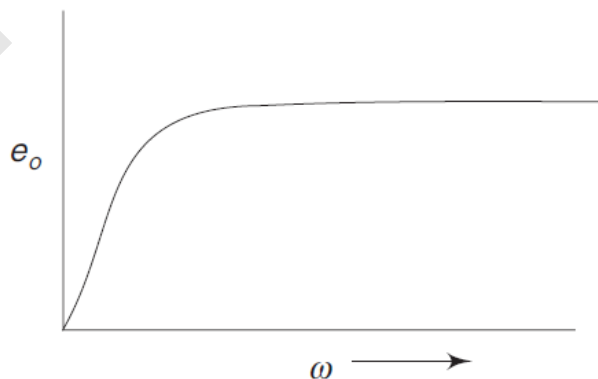
$$Q = C_0 V_0$$

اگر تغییر C_0 تا C در اثر حرکت با سرعت لازم انجام گیرد، Q به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نخواهد کرد:

$$e_c = \frac{Q}{C}$$

خروجی: $e_o = V_0 - e_c$

$$\Rightarrow \frac{e_o}{V_0} = \frac{C - C_0}{C} = \frac{\Delta C}{C}$$



شکل ۴-۲۰. پاسخ فرکانسی خروجی

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

مثال ۴-۱.

یک ترنسیدیوسر خازنی دارای دو صفحه است که قطر هر کدام 2 cm بوده و با air gap ای برابر 0.25 mm از هم جدا شده‌اند. Displacement sensitivity را محاسبه کنید.

حل:

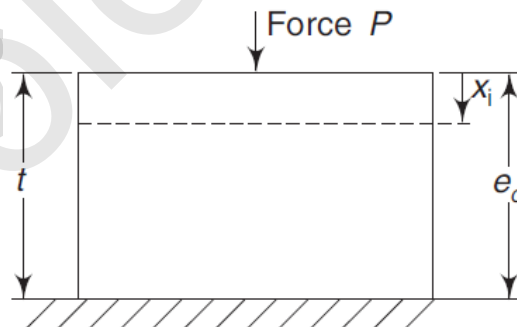
$$C = \frac{1}{3.6\pi} \varepsilon \frac{A}{d} = 0.0885 \varepsilon \frac{A}{d}$$

$$\text{Sensitivity: } S = \frac{\partial C}{\partial d} = -\frac{A\varepsilon}{3.6\pi d^2}$$

$$A = \frac{\pi}{4} 2^2 = \pi \text{ cm}^2, \quad \varepsilon_{\text{air}} = 1, \quad d = 0.025 \text{ cm} \Rightarrow S = -444 \text{ PF/cm}$$

• ترنسیدیوسر پیزوالکتریکی (Piezo-electric)

اساس کار بر مبنای تولید بار الکتریکی بر اثر تحت Distort شدن یک ماده کریستالی نظیر کوارتز یا Barium titanate



شکل ۴-۲۱. کریستال پیزو-الکتریک تحت نیروی P

$$Q = K_1 x_i$$

K_1 : ثابت حساسیت بار الکتریکی (Charge sensitivity constant)

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

$$e_o = \frac{Q}{C} = \frac{K_1 x_i}{C} = K x_i \quad , \quad K = \frac{K_1}{C} \quad , \quad C = \frac{\epsilon A}{3.6 \pi t}$$

K : ثابت حساسیت ولتاژ (Voltage sensitivity constant)

C : ظرفیت کریستال (PF)

ϵ : ثابت دی الکتریکی ماده کریستالی

A : مساحت (cm^2)

t : ضخامت (Thickness) (cm)

نکته.

اگر A برحسب m^2 و t برحسب m و C برحسب F باشد:

$$C = \frac{\epsilon A}{1.13 \times 10^{11} t}$$

رابطه بین نیروی P و x_i :

$$P = EA \frac{x_i}{t}$$

Young's modulus : E ماده کریستالی

جدول ۴-۱. خواص برخی از مواد Piezo-electric

S.No.	Material	Charge sensitivity pC/N	Dielectric constant ϵ	Young's modulus N/m ²
1.	Quartz	2.0	4.5	9×10^{10}
2.	Tourmaline	1.9	6.6	16×10^{10}
3.	Barium titanate	150	1380	12×10^{10}
4.	Lead zirconate titanate	265	1500	7.9×10^{10}

مزیت‌ها:

- ترنسیدوسرهای Piezo-electric عموماً سایز و وزن سبکی دارند.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

- دارای مشخصه عملیاتی خطی هستند.
- دارای محدوده فرکانسی وسیعی از نزدیک به dc تا 100 MHz است.
- Accuracy در حد 0.02% قابل دستیابی است.
- از نوع Rugged هستند بعد از استریل کردن در کاربردهای Bio-medical قابل استفاده هستند.
- از نوع Self-generating هستند.

محدودیت‌ها:

- برای اندازه‌گیری سیگنال‌های استاتیک مناسب نیست.
- دمای بالای 200°C باعث تخریب ترنسدیوسر می‌شود.
- به مدارهای الکترونیکی پیچیده نیاز دارد.

کاربردها:

- به‌عنوان میکروفون Piezo-electric برای تشخیص صداهای قلب، اندازه‌گیری فشار خون و فشار دستگاه گوارش و ... استفاده می‌شوند.
- ترنسدیوسرهای Ultrasonics برای Sonars and ultrasonic cleaning and machining ، Under water acoustics و ... استفاده می‌شود.
- کریستال‌های کوارتز با فرکانس‌های ۱ تا ۱۰۰ مگاهرتز در ساعت‌های الکترونیکی، کارت‌ریج‌های Stereophonic ، تلویزیون‌ها رنگی، لوازم جانبی کامپیوتر، فنک‌های گازی، سیستم‌های احتراق خودرو و ... استفاده می‌شوند.
- ابزارهای Piezo-electric به‌ویژه شتاب‌سنج‌ها به‌طور گسترده در صنایع و دانشگاه‌ها در زمینه‌های صدا و ارتعاشات استفاده می‌شود.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

مثال ۴-۲.

یک کریستال کوارتز دارای Charge sensitivity برابر $2 pC/N$ ، ثابت دی‌الکتریک 4.5 و Young's modulus برابر $9 \times 10^{10} Pa$ است. ثابت حساسیت ولتاژ را محاسبه کنید.

حل:

$$K = \frac{K_1}{C} \quad (\text{Voltage sensitivity constant})$$

$$K_1 = \frac{Q}{x_i} = \frac{Q}{P} \cdot \frac{P}{x_i} \quad (\text{Charge sensitivity constant})$$

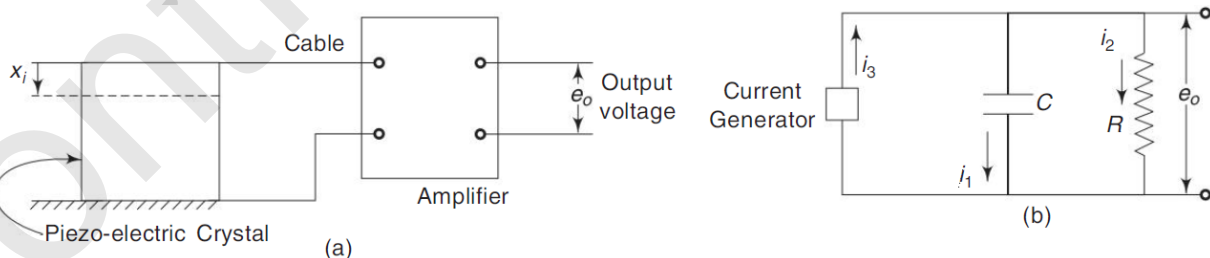
$$P = EA \frac{x_i}{t} \Rightarrow \frac{P}{x_i} = \frac{EA}{t}$$

$$\frac{P}{x_i} = \frac{EA}{t}, \quad \frac{Q}{P} = 2 \times 10^{-12} \Rightarrow K_1 = \frac{Q}{P} \cdot \frac{P}{x_i} = 2 \times 10^{-12} \frac{EA}{t}$$

$$C = \frac{\epsilon A}{1.13 \times 10^{11} t} \Rightarrow K = \frac{K_1}{C} = 4.52 \times 10^9 V/m = 4520 V/\mu m$$

مشخصه‌های دینامیکی ترنسدیوسرهای Piezo-electric

هدف: محاسبه رابطه بین ولتاژ خروجی و x_i



شکل ۴-۲. کریستال Piezo-electric متصل به آمپلی‌فایر و مدار معادل

$$C = C_{crystal} + C_{cable} + C_{amplifier}$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

$$R \approx R_{\text{amplifier}}$$

معمولاً $R_{\text{leak}} \gg R_{\text{amplifier}}$ بنابراین:

$$i_3 = \frac{dQ}{dt}$$

جریان تولیدشده توسط کریستال:

Deformation x_i در اثر Q :

$$i_3 = \frac{dQ}{dt} \quad \begin{matrix} Q=K_1 x_i \\ \Rightarrow \end{matrix} \quad i_3 = K_1 \frac{dx_i}{dt} \quad \text{or} \quad i_3 = K_1 D x_i, \quad D = \frac{d}{dt}$$

$$i_3 = i_1 + i_2 \quad \Rightarrow \quad i_3 = CD e_o + \frac{e_o}{R}$$

$$i_3 = K_1 D x_i = CD e_o + \frac{e_o}{R}, \quad K = \frac{K_1}{C} \quad \Rightarrow \quad (1 + \tau D) e_o = K \tau D x_i, \quad \tau = RC$$

Time constant of the arrangement : τ

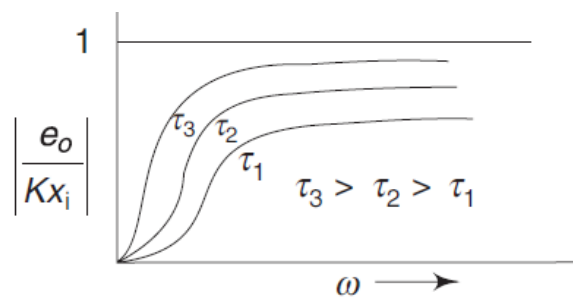
Voltage sensitivity constant : K

نکته.

ترنسدیوسر پیزوالکتریک را برای Static condition نمی‌توان به‌کار برد. اما برای ورودی‌های دینامیکی می‌توان استفاده کرد.

پاسخ فرکانسی.

$$\left| \frac{e_o}{x_i} \right| = \frac{K \tau \omega}{\sqrt{1 + \tau^2 \omega^2}}$$



شکل ۴-۲۳. پاسخ فرکانسی Piezo-electric Transducer

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

برای پاسخ فرکانسی خوب در یک محدوده فرکانسی وسیع، ثابت زمانی باید بزرگ باشد.

پاسخ گذرا.

ورودی: پالس مربعی

$$x_i = \begin{cases} A & , \quad 0 < t \leq T \\ 0 & , \quad t > T \end{cases}$$

خروجی:

$$(1 + \tau D)e_o = K\tau Dx_i \quad , \quad \tau = RC$$

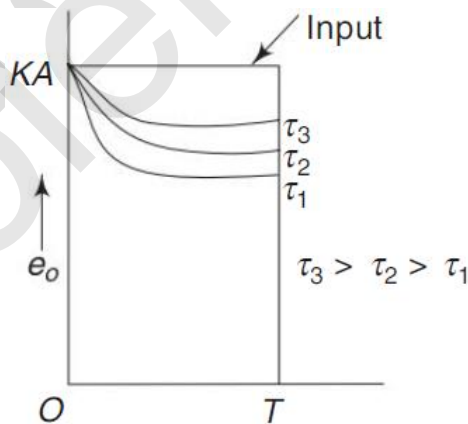
$$(1 + \tau D)e_o = 0$$

$$e_o = B e^{-t/\tau}$$

پاسخ:

$$\text{at } t = 0 \quad , \quad e_o = Kx_i = KA$$

$$B = KA \quad \Rightarrow \quad e_o = KA e^{-t/\tau}$$



شکل ۴-۲۴. پاسخ گذرای Piezo-electric Transducer به ورودی پالس

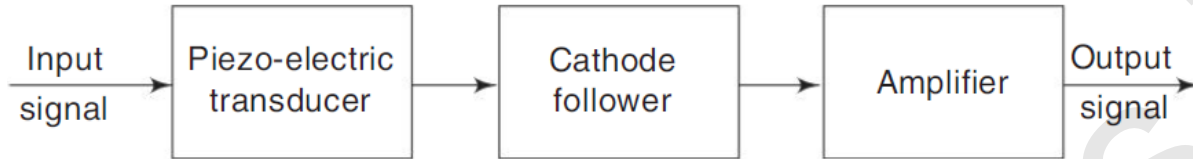
نکته.

مقدار زیاد τ پاسخ گذرا و نیز پاسخ فرکانسی سیستم ترنسیدیوسر را بهبود می بخشد.

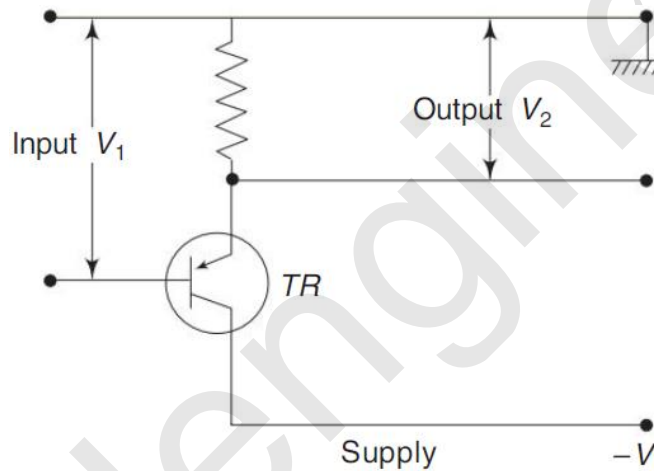
Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

برای داشتن مقدار τ بالا می توان از Cathode Follower استفاده نمود.



شکل ۴-۲۵. استفاده از Cathode Follower با یک Piezo-electric Transducer



شکل ۴-۲۶. Emitter Follower با استفاده از مدار Cathode Follower

از مسئله Loading امپدانس جلوگیری می کند.

مثال ۴-۳

یک Piezo-electric Transducer مشخصه های زیر را دارد:

Capacitance of crystal = $10^{-9} F$

Capacitance of cable = $3 \times 10^{-10} F$

Charge constant of crystal = $4 \times 10^{-6} C/cm$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

اسیلوسکوپ مقاومت $1M\Omega$ دارد که با خازن $10^{-10}F$ موازی است. اگر کریستال تحت تاثیر Harmonic deformation با دامنه $10^{-3}mm$ و فرکانس $200Hz$ قرار گیرد، دامنه ولتاژ خروجی را در اسیلوسکوپ پیدا کنید.

حل:

$$R = 10^6 \Omega$$

$$C = 10^{-9} + 3 \times 10^{-10} + 10^{-10} \Rightarrow C = 1.4 \times 10^{-9} F$$

$$\tau = RC \Rightarrow \tau = 1.4 \times 10^{-3}$$

$$K_1 = 4 \times 10^{-6} \text{ coulomb/cm}$$

$$K = \frac{K_1}{C} = 2857 \text{ V/cm}$$

$$\left| \frac{e_o}{x_i} \right| = \frac{K\tau\omega}{\sqrt{1 + \tau^2\omega^2}}$$

$$\omega = 2\pi \times 200 = 1256.6 \text{ rad/s}, \quad x_i = 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\left| \frac{e_o}{x_i} \right| = \frac{K\tau\omega}{\sqrt{1 + \tau^2\omega^2}} \Rightarrow e_o = 0.248 \text{ V}$$

فصل چهارم

المان‌های ترنس‌دیوسر

۴-۲-۱. انواع الکترومکانیکی

Resistance Strain Gauge Transducer •

اساس کار:

اگر رسانایی کشیده یا فشرده شود، مقاومت آن به علت تغییر طول، سطح و مقاومت ویژه آن تغییر می‌کند.

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$F = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_a}$$

ضریب سنجش رسانا (Gauge Factor):

ΔR : تغییر مقاومت R در اثر ε_a (Axial strain)

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

با اعمال Mechanical strain ممکن است ρ ، L و A تغییر کنند.

$$\Delta R = \left(\frac{\partial R}{\partial L}\right)\Delta L + \left(\frac{\partial R}{\partial A}\right)\Delta A + \left(\frac{\partial R}{\partial \rho}\right)\Delta \rho$$

$$\begin{aligned} R &= \rho \frac{L}{A} \\ \Rightarrow \Delta R &= \left(\frac{\rho}{A}\right)\Delta L - \left(\frac{\rho L}{A^2}\right)\Delta A + \left(\frac{L}{A}\right)\Delta \rho \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R &= \rho \frac{L}{A} \\ \Rightarrow \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \end{aligned}$$

$$A = CB^2 \quad \Rightarrow \quad \Delta A = 2CB\Delta B$$

Geometrical dimension of the strain gauge cross-section : B

C : ثابت بسته به Section

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

$$\Rightarrow \frac{\Delta A}{A} = \frac{2CB\Delta B}{CB^2} = \frac{2\Delta B}{B}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - 2\frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = \varepsilon_a - 2\varepsilon_t + \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

Axial strain : $\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L}$

Transverse strain : $\varepsilon_t = -\nu\varepsilon_a$

Poisson's ratio : ν

$$\Rightarrow F = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon_a} = 1 + 2\nu + \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}}{\varepsilon_a}$$

برای Strain gauge های متالیک اولین دو عبارت ($1+2\nu$) از عبارت سوم بیشتر است. در حالی که برای Semi-Conductor strain gauge ها عبارت سوم به دلیل تغییر Resistivity در اثر strain (Piezo-resistivity) از ($1+2\nu$) خیلی بیشتر است.

مقدار F برای آلیاژ مس-نیکل بین ۲ تا ۳ است در حالی که برای Semi-Conductor بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ است.

انواع Strain gauge transducer :

- Unbonded strain gauges
- Bonded strain gauges

• Unbonded Strain gauges

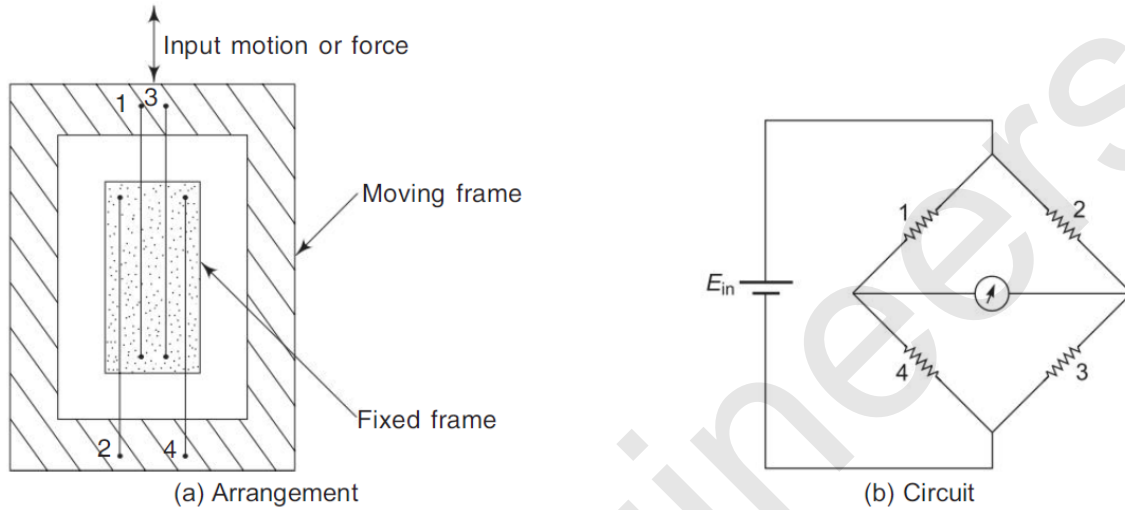
با این نوع ترنسددیوسر، حرکت های خیلی کوچک از مرتبه $50\mu m$ و نیروهای خیلی کوچک را می توان اندازه گیری کرد.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

کاربرد: اندازه‌گیری نیرو، فشار، شتاب و ...

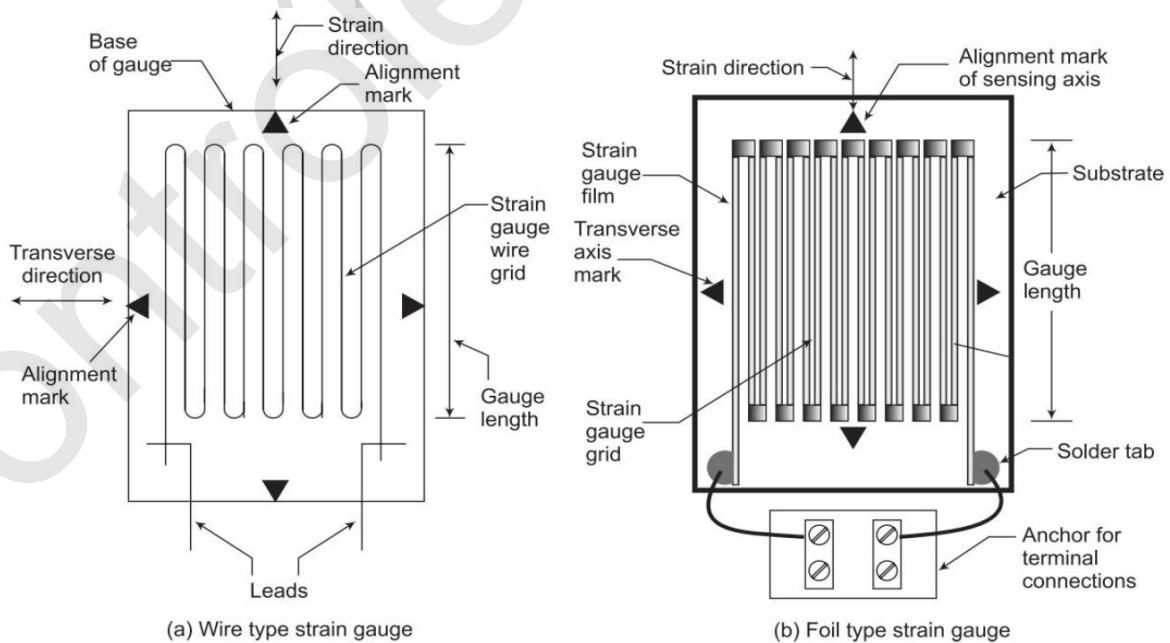
ابعاد متداول سیم: طول 25mm و قطر 25 μm



شکل ۴-۲۷. Unbonded strain gauge

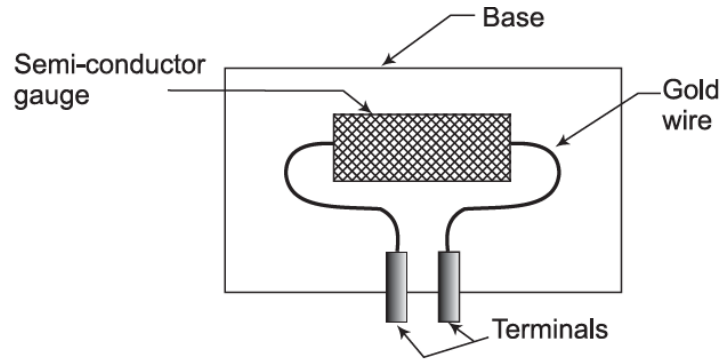
Bonded resistance strain gauges •

برای اندازه‌گیری متغیرهای فیزیکی متعدد نظیر strain، نیرو، گشتاور، فشار، ارتعاشات به کار می‌روند.



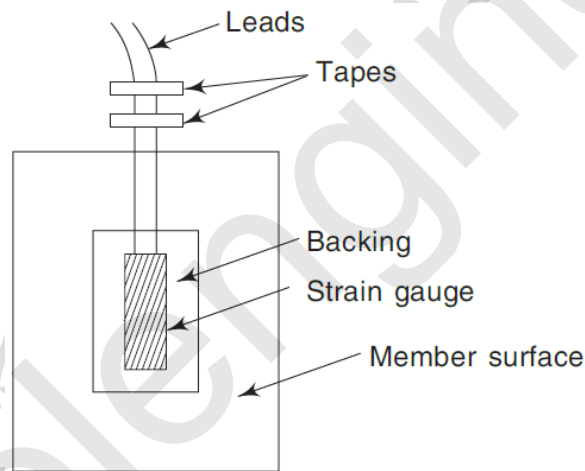
Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



(c) Semiconductor strain gauge

شکل ۴-۲۸. انواع Resistance strain gauge



شکل ۴-۲۹. Strain gauge in bonded position

حساسیت خیلی زیاد دارند. Strain هایی به کوچکی 10^{-6} را می توان اندازه گیری کرد.

Gauge factor برای آلیاژهای مس-نیکل برابر ۲ تا ۳ و برای Semiconductor gauge ها ۱۰۰ تا ۲۰۰ می باشد.

جدول ۴-۲. اطلاعاتی مربوط به Wire backing material و Adhesive

Gauge backing material	Adhesive	Wire materials	Remarks
Paper or silk	Nitrocellulose	Cu-Ni alloy	Useful up to 60°C
Bakelite	Epoxy	Cu-Ni alloy	Useful up to 200 °C
Glass weave	Ceramic cement	Ni-Cr alloy	Useful up to 400°C

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

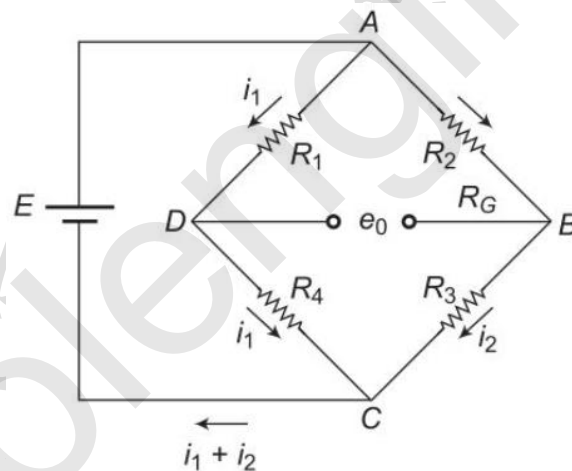
جریان Gauge معمولاً بسته به مدت آزمایش به ۱۰ الی ۳۰ میلی آمپر محدود می شود، تا از آسیب دیدن سیم جلوگیری شود.

Resistance Strain Gauge Bridges

Strain gauge های مقاومتی معمولاً قسمتی از یک پل وتستون است به گونه ای که تغییر ناشی از Strain در مقاومت آن را می توان اندازه گیری کرد یا به صورت یک خروجی نمایش داد یا ثبت نمود.

Balanced Bridge

برای Balanced bridge ولتاژ مدار باز $e_o = 0$ است.



شکل ۴-۳۰. Unbalanced strain gauge bridge

$$e_o = E_{DA} - E_{BA} \Rightarrow e_o = i_1 R_1 - i_2 R_2$$

$$e_o = \frac{E}{R_1 + R_4} R_1 - \frac{E}{R_2 + R_3} R_2$$

$$\Rightarrow e_o = \frac{E(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)}$$

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \text{ (Null condition)}$$

اغلب پل وتستون ابتدائاً در شرایط Null condition راه اندازی می شود.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

اگر مقاومت‌های R_1 ، R_2 ، R_3 و R_4 تغییر یابند:

$$e_o = E \frac{[(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)]}{(R_1 + \Delta R_1 + R_4 + \Delta R_4)(R_2 + \Delta R_2 + R_3 + \Delta R_3)}$$

$$e_o = E \frac{[R_1 R_3 \{ (1 + \frac{\Delta R_1}{R_1}) (1 + \frac{\Delta R_3}{R_3}) \} - R_2 R_4 \{ (1 + \frac{\Delta R_2}{R_2}) (1 + \frac{\Delta R_4}{R_4}) \}]}{(R_1 + \Delta R_1 + R_4 + \Delta R_4)(R_2 + \Delta R_2 + R_3 + \Delta R_3)}$$

Full bridge configuration •

از چهار Strain gauge از دسته تولید شده یکسان استفاده می‌کنند. لذا:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$$

Active strain gauge : R_4 و R_3 ، R_2 ، R_1

$$e_o = \frac{E R^2 (\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R}) + 2nd \text{ order terms}}{(2R + \Delta R_1 + \Delta R_4)(2R + \Delta R_2 + \Delta R_3)}$$

$$e_o = \frac{E}{4} (\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R})$$

با در نظر گرفتن $F = \left(\frac{\Delta R}{R} / \varepsilon \right)$ ، ولتاژ مدار باز Full bridge configuration :

$$e_o = \frac{EF}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Half bridge configuration •

Active strain gauge : R_2 ، R_1

External : R_4 ، R_3 مقاومت‌های مساوی

$$[e_o]_{Half \ bridge} = \frac{EF}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

Quarter bridge configuration •

Active strain gauge : R_1

Dummy gauge : R_2

Instrumentation

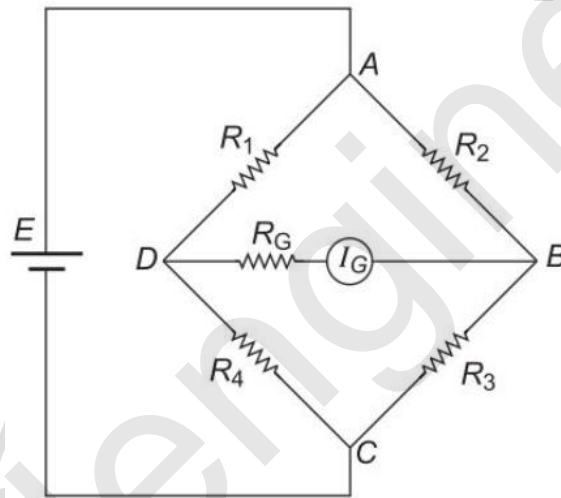
COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

External R_4 و R_3 : مقاومت های مساوی

$$[e_o]_{quarterbridge} = \frac{EF}{4} \varepsilon_1$$

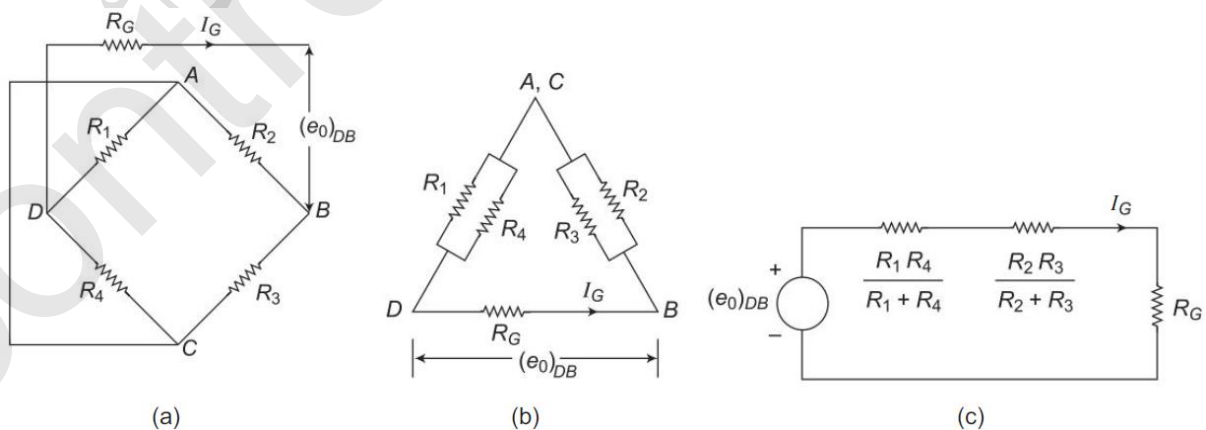
جریان گالوانومتر در مدار Full bridge strain Gauge

در پل و تستون Unbalanced خروجی در Deflection mode را می توان با اندازه گیری ولتاژ مدار باز e_o یا با اندازه گیری جریان عبوری از گالوانومتر که دارای مقاومت داخلی R_G است به دست آورد.



شکل ۴-۳۱. پل و تستون Unbalanced

محاسبه جریان گالوانومتر در مدار معادل تونن:



شکل ۴-۳۲. مقاومت معادل تونن در مدار پل

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$$

فرض:

$$I_G = \frac{e_o}{R_G + \frac{RR}{2R} + \frac{RR}{2R}} \Rightarrow I_G = \frac{e_o}{R_G + R}$$

$$e_o = \frac{EF}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \Rightarrow I_G = \frac{EF}{4(R+R_G)} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

در صورتی که خروجی پل Strain gauge بر حسب خروجی ولتاژ گالوانومتر V_o اندازه گیری شود:

$$V_o = I_G R_G$$

$$\Rightarrow V_o = \frac{EF R_G}{4(R+R_G)} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

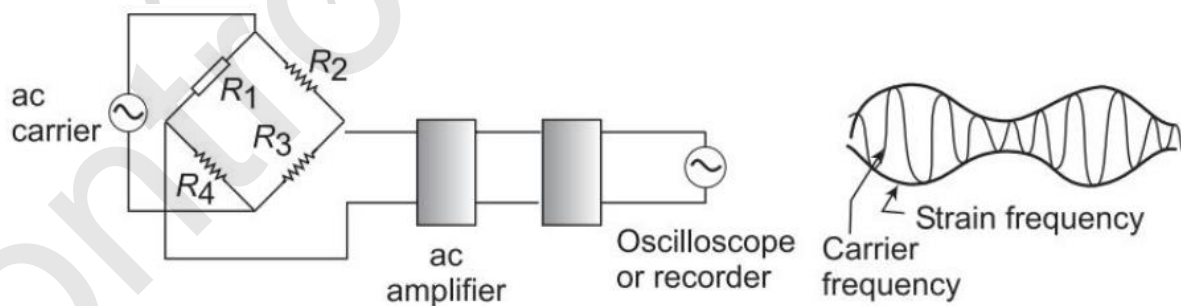
$$\Rightarrow V_o = \frac{EF}{4(1+\frac{R}{R_G})} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

اگر $R_G = \infty$ فرض شود در این صورت V_o برابر ولتاژ مدار باز e_o می شود.

$$\Rightarrow e_o = V_o = \frac{EF}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

نکته.

تحریک پل ها ممکن است با منبع تغذیه dc یا ac انجام گیرد.



شکل ۴-۳۳. ac bridge

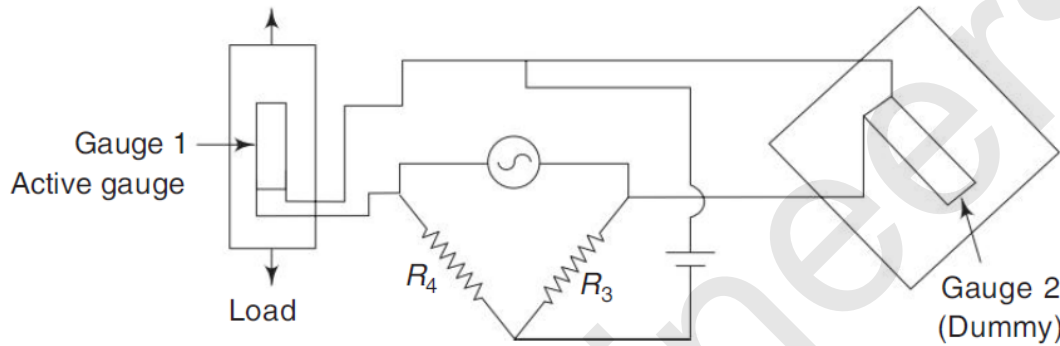
از بین دو نوع پل، پل های ac عاری از سیگنال های Drift و نویز ناخواسته هستند. لیکن گران تر هستند.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

جبران سازی دمایی.

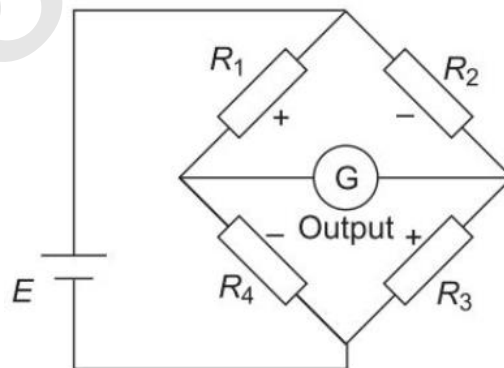
- استفاده از Dummy gauge
- استفاده از بیش از یک Active gauge با ترتیب مناسب Gauge ها



شکل ۴-۳۴. جبران سازی دما با Dummy gauge

R_1 Active gauge و در معرض strain و نیز تغییر دماست ولی R_2 Dummy gauge و تنها در معرض تغییر دماست.

در حالت دوم نیازی نیست R_2 Dummy gauge باشد اما ممکن است روی نمونه آزمایش طوری قرار گیرد که strain ی مخالف آنچه در R_1 است داشته باشد.



شکل ۴-۳۵. Strain gauge with 4 active gauge

در شکل ۴-۳۵ اگر مقاومت های اولیه همه بازوها مساوی باشند، جبران دمایی تحقق می یابد.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

نکته.

جبران دمایی هنگامی که Static strain باید اندازه‌گیری شود لازم است برای اندازه‌گیری Dynamic strain نیازی نیست.

مزیت‌ها.

- در انواع شکل، سایز و پیکربندی و Configuration وجود دارند.
- سایز بسیار کوچک و جرم ناچیز در حد ۱ گرم دارند (مشخصه‌های دینامیکی عالی).
- Wire type strain gauge ها دارای مشخصه‌های خطی بوده و علاوه بر آن Accuracy بالایی در حد $\pm 0.05\%$ دارند.
- حساسیت بسیار بالا در جهت strain اندازه‌گیری شده و حساسیت بسیار کم در Transverse plane دارند.
- به راحتی می‌توان به نمونه‌ها متصل کرد.
- در استفاده از Strain gauge ، خطای هیستریزس وجود ندارد.
- سرعت پاسخ‌دهی بالا و time lag ناچیز دارند.
- Fatigue life بالایی و پاسخ فرکانسی بالایی تا 10^{12} هرتز دارند.
- قادر به نشان‌دادن Strain های استاتیک، گذرا و دینامیکی هستند.
- اندازه‌گیری مقادیر بسیار کم Strain های مرتبه ± 1 microstrain با Gauge های نیمه هادی امکان‌پذیر است. با این حال Resolution ، Wire type strain gauge ، برابر ± 10 microstrain است.

محدودیت‌ها.

- این Gauge ها ظریف و شکننده هستند.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

- در محیط‌های مانند مایعات خورنده و دمای بالا نمی‌توان از آن‌ها استفاده کرد.
- با وجود این‌که Semi-conductor strain gauge ها دارای Gauge factor بسیار بالایی هستند، نسبت به تغییرات دما بسیار حساس هستند. غیرخطی بودن در خروجی نشان می‌دهند و گران قیمت هستند.

کاربردها.

- یک ابزار مهم در حوزه Stress analysis است.
- در اندازه‌گیری فشار، نیرو، گشتاور، سطح مایع استفاده می‌شوند.
- Semi-conductor strain gauge با حساسیت بالا می‌توانند strain های بسیار کم از مرتبه microstrain ± 1 را اندازه‌گیری کنند (اندازه‌گیری تغییرات فشار خون در قلب).

Strain gauge arrangement

برای اندازه‌گیری متغیرهای فیزیکی گوناگون دو عامل باید در نظر گرفت:

- حساسیت بالا
- جبران دمایی

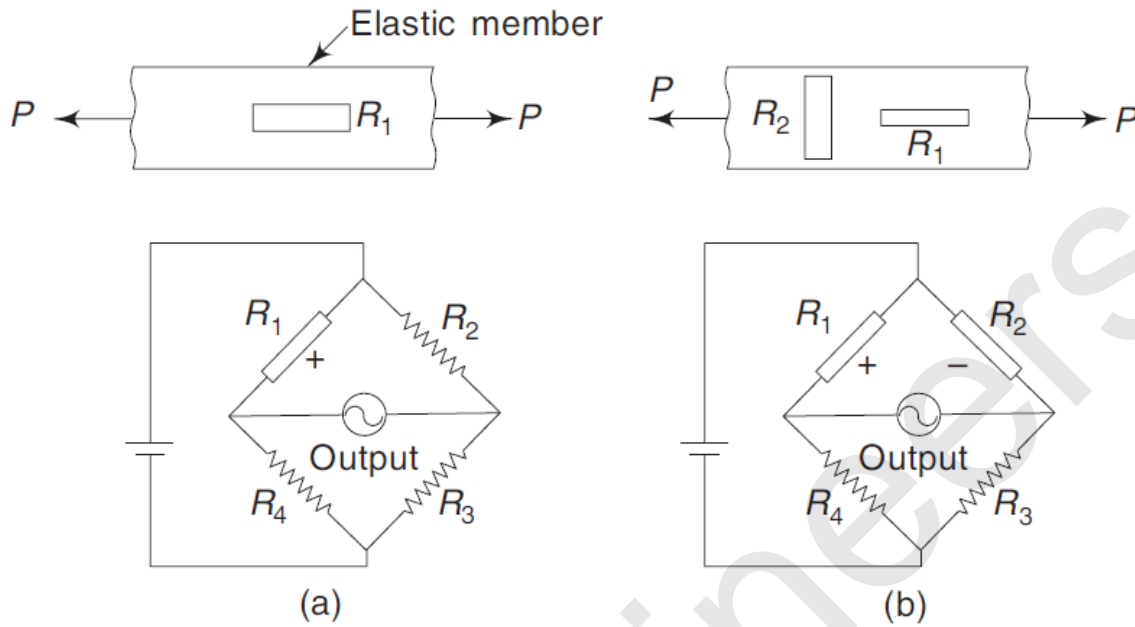
شکل ۴-۳۵ از هر دو نظر رضایت‌بخش خواهد بود.

شکل ۴-۳۶ (a) ، Gauge R_1 برای اندازه‌گیری Axial strain است. سیستم برای دما جبران نمی‌شود.

شکل ۴-۳۶ (b) ، دو Active gauge دارد. R_1 به دلیل Axial tensile strain و R_2 به دلیل Transverse compressive strain تغییر می‌کند. این سیستم برای دما جبران می‌شود.

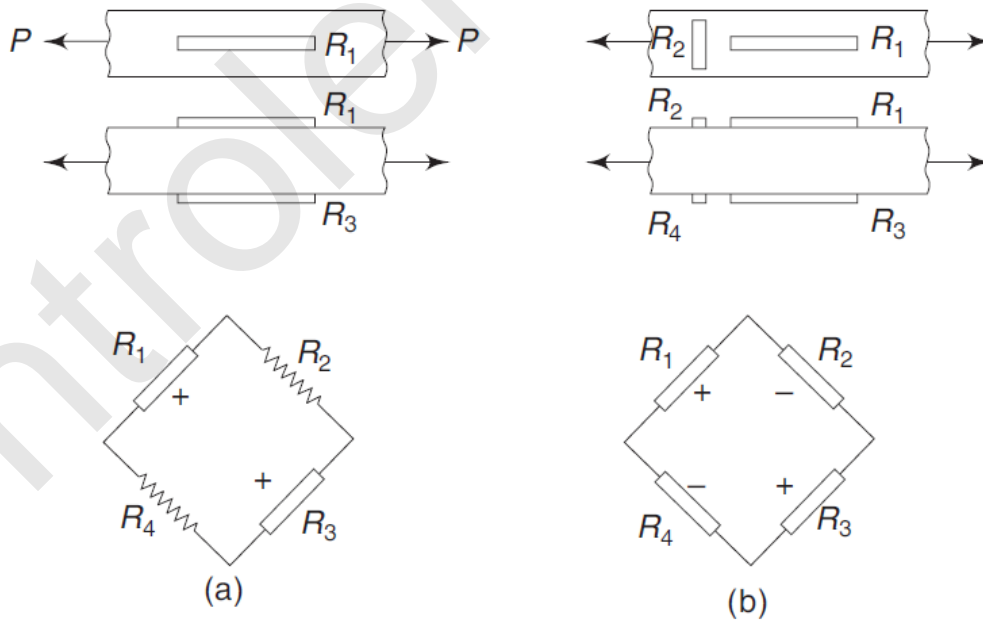
Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۴-۳۶. پل و تستون برای اندازه‌گیری نیروی محوری (a) Quarter bridge arrangement

(b) Half bridge arrangement in Poisson's configuration



شکل ۴-۳۷. پل و تستون برای اندازه‌گیری نیروی محوری (a) Half bridge arrangement

(b) Full bridge arrangement in Poisson's configuration

Instrumentation

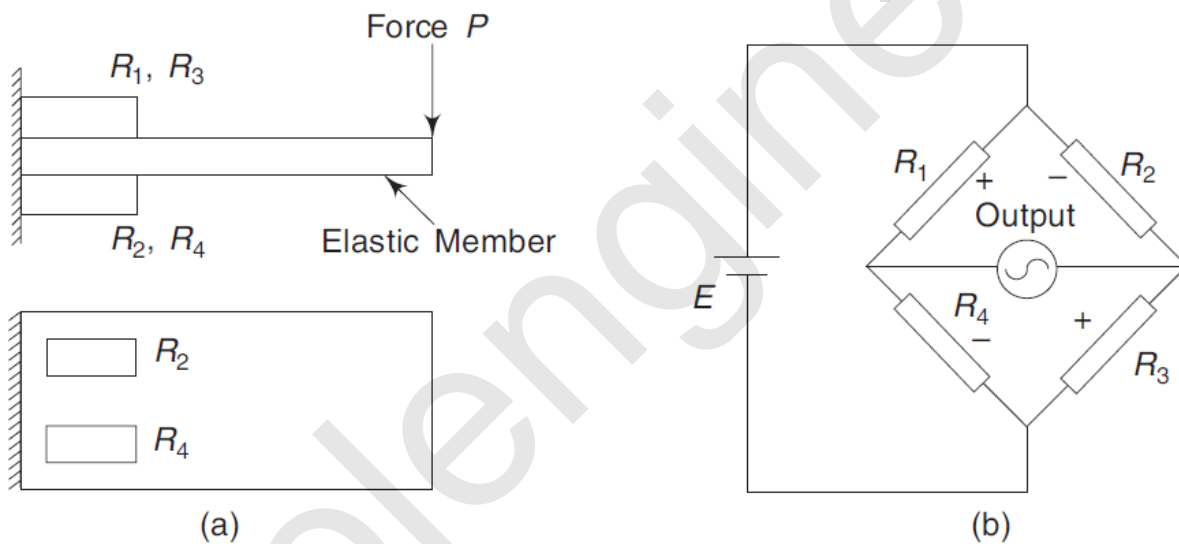
COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

شکل ۴-۳۷ (a)، R_1 و R_3 در معرض Axial tensile strain با یک مقدار قرار می‌گیرند و بازوهای Opposite پل را تشکیل می‌دهند. نمی‌توانند دما را جبران کنند.

Signal enhancement factor = 2

شکل ۴-۳۷ (b)، چهار Active gauge دارد. تغییرات دما را جبران می‌کند.

Signal enhancement factor = $2(1+\nu)$



شکل ۴-۳۸. Strain gauge arrangement برای اندازه‌گیری نیرو

شکل ۴-۳۸، نیروی P را می‌توان با استفاده از یک Elastic cantilever اندازه‌گیری کرد.

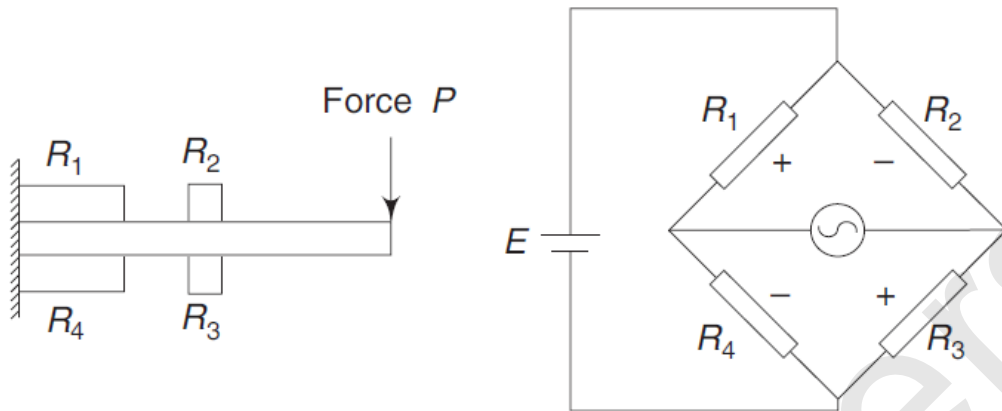
R_3 و R_1 دارای Tensile strain و R_4 و R_2 دارای Compressive strain هستند.

Signal enhancement factor = 4

جبران دما را تضمین می‌کند.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۴-۳۹. Alternative arrangement in Poisson configuration

Signal enhancement factor = $2(1+\nu)$

جبران دما تضمین می شود.

مثال ۴-۴

یک Load cell از یک استوانه فولادی توخالی که به طور Axially تحت اثر نیرو قرار می گیرد تشکیل شده است. چهار Strain gauge طوری روی آن نصب شده اند که سیگنال را تقویت و تغییرات دما را جبران کنند. سطح مقطع Load cell برابر 2 cm^2 ، Young's modulus فولاد $2.07 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ و نسبت پواسون 0.3 است. مقاومت Strain gauge برابر 1000Ω و Gauge factor نیز 2.1 است.

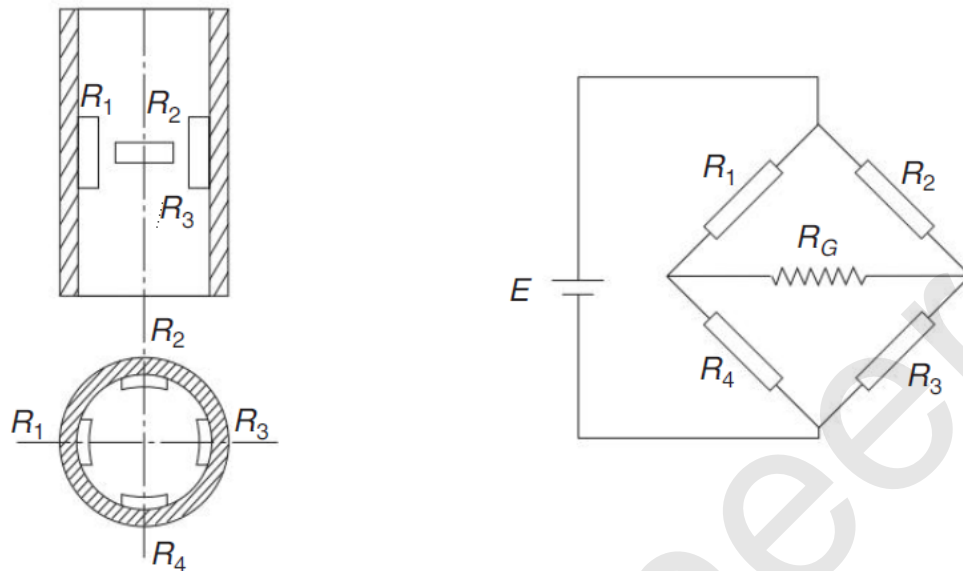
جریان در هر Strain gauge به 20^{mA} محدود شده است. مطلوبست محاسبه:

الف) ولتاژ پل

ب) جریان در بازوی Detector. این بازو از یک میکروسنج با مقاومت 500Ω تشکیل شده و به Load cell نیروی 10^5 N وارد می شود.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۴-۴۰. مثال ۴-۴

حل:

R_1 و R_3 ، Arial strain ، R_2 و R_4 نیز Circumferential strain را اندازه گیری می کنند.

Signal enhancement factor = $2(1+\nu) = 2.6$

Strain gauge resistance = 1000Ω

Gauge factor = 2.1

For the initially balanced system:

Battery voltage: $E = \frac{20}{1000}(R_1 + R_4)$, $R_1 = R_4 = 1000\Omega \Rightarrow E = 40V$

Axial strain in the cylinder $\epsilon_1 = \frac{P}{EA} = \frac{10^5 \times 10^4}{2.07 \times 10^{11} \times 2} \Rightarrow \epsilon_1 = 2.415 \times 10^{-3}$

اگر فقط R_1 بر اثر این strain تغییر کند، جریان R_G برابر است با:

$$I_G = \frac{EF\epsilon_1}{4(R_1 + R_G)} = \frac{40 \times 2.1 \times 2.415 \times 10^{-3}}{4(1000 + 500)} \Rightarrow I_G = 3.38 \times 10^{-5} A$$

با توجه به این که هر چهار مقاومت تغییر می کنند لذا:

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

$$I_G = 2(1+\nu)I_G = 2.6 \times 3.38 \times 10^{-5} \Rightarrow I_G = 8.79 \times 10^{-5} \text{ A}$$

controlengineers.ir

فصل چهارم

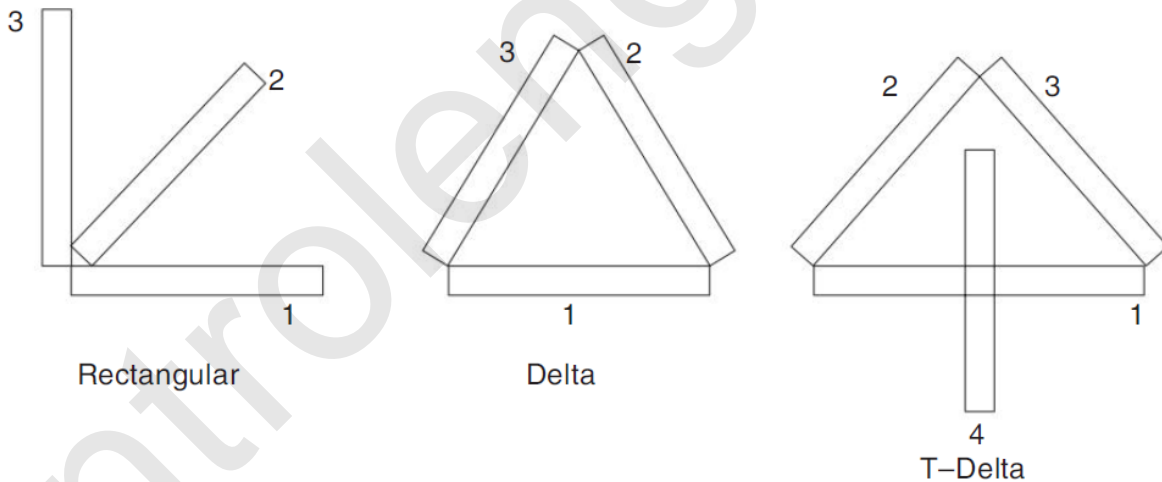
المان‌های ترنس‌دیوسر

۴-۲-۱. انواع الکترومکانیکی

• Strain gauge Rosettes

اگر بیش از یک Strain gauge در یک ناحیه نصب شده باشد، به منظور پیدا کردن Principal strain، این Arrangement را Strain gauge rosettes نامند.

- Two-gauge rosette
- Three-gauge rosette
- Four-gauge rosette



شکل ۴-۴. انواع Rosettes

با توجه به این که جهت Strain gauge ها روی جسم آزمایشی مشخص نیست، Gauge ها در عمل در هر جهتی نصب می شوند.

Instrumentation

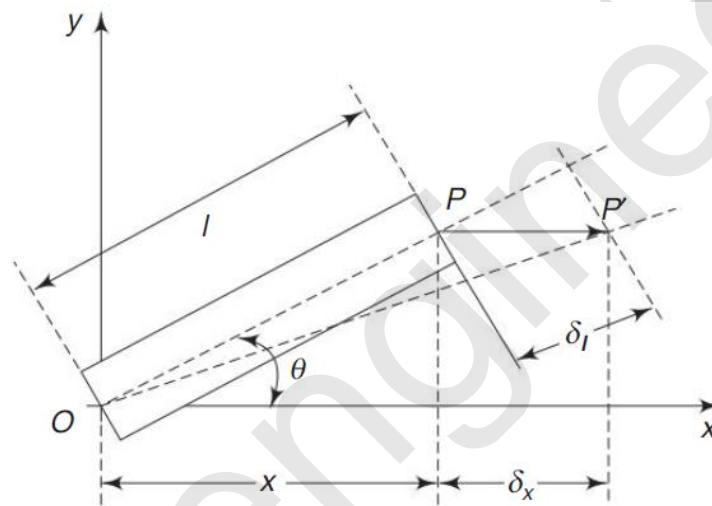
COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

برای مطالعه رابطه بین Strain در هر جهت و Principal strain ها و رابطه بین Principal strain ها و
 Principal stress به Appendix A-3 مراجعه کنید.

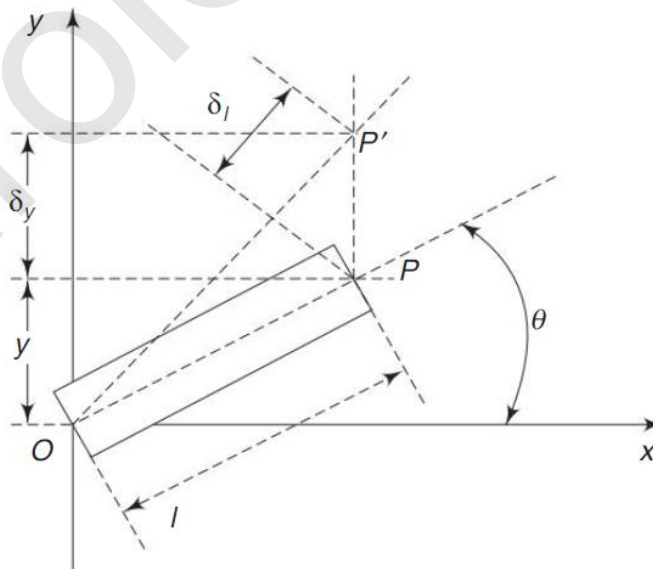
Direct strain : ε_y ، ε_x

Shear strain : γ_{xy}

Measured by a strain gauge at angle θ to OX : ε_θ



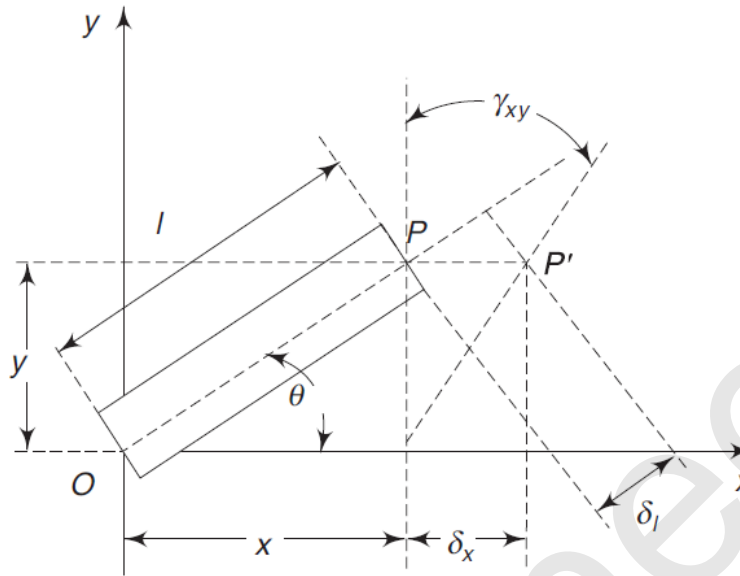
شکل ۴-۴۲. رابطه بین ε_x و ε_θ



شکل ۴-۴۳. رابطه بین ε_y و ε_θ

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۴-۴۴. رابطه بین γ_{xy} و ϵ_θ

بعد از Deformation در جهت X :

Strain $\epsilon_x = \delta_x/x$

Strain ϵ_θ measured by the gauge $= \delta_l/l$

$\delta_l = \delta_x \cos \theta$, $l = x/\cos \theta$

$$\Rightarrow \epsilon_\theta = \frac{\delta_l}{l} = \frac{\delta_x \cos \theta}{x/\cos \theta} \Rightarrow \epsilon_\theta = \epsilon_x \cos^2 \theta$$

$$\Rightarrow \epsilon_\theta = \epsilon_y \sin^2 \theta$$

شکل ۴-۴۳:

اگر Shear strain اعمال شود (شکل ۴-۴۴):

Strain in the gauge : $\epsilon_\theta = \frac{\delta_l}{l}$

با فرض این که تمام Deformation ها کوچک باشند:

$$\begin{cases} \delta_l = \delta_x \cos \theta & , & l = \frac{y}{\sin \theta} \\ \delta_x = y \tan \gamma_{xy} \approx y \gamma_{xy} \end{cases} \Rightarrow \epsilon_\theta = \frac{\delta_l}{l} \Rightarrow \epsilon_\theta = \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

اگر Strain های ε_x ، ε_y و γ_{xy} همزمان عمل کنند:

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$\Rightarrow \varepsilon_\theta = (\varepsilon_x + \varepsilon_y)/2 + [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)/2] \cos 2\theta + (\gamma_{xy}/2) \sin 2\theta$$

ε_θ قابل اندازه گیری است:

$$\varepsilon_1 = (\varepsilon_x + \varepsilon_y)/2 + [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)/2] \cos 2\theta_1 + (\gamma_{xy}/2) \sin 2\theta_1$$

$$\varepsilon_2 = (\varepsilon_x + \varepsilon_y)/2 + [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)/2] \cos 2\theta_2 + (\gamma_{xy}/2) \sin 2\theta_2$$

$$\varepsilon_3 = (\varepsilon_x + \varepsilon_y)/2 + [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)/2] \cos 2\theta_3 + (\gamma_{xy}/2) \sin 2\theta_3$$

Rectangular Rosettes •

$$\theta_1 = 0^\circ, \quad \theta_2 = 45^\circ, \quad \theta_3 = 90^\circ$$

با مراجعه به شکل ۴-۴۲:

$$\varepsilon_1 = (\varepsilon_x + \varepsilon_y)/2 + [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)/2] \cos 2\theta_1 + (\gamma_{xy}/2) \sin 2\theta_1 \Rightarrow \varepsilon_1 = \varepsilon_x$$

$$\varepsilon_2 = (\varepsilon_x + \varepsilon_y)/2 + [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)/2] \cos 2\theta_2 + (\gamma_{xy}/2) \sin 2\theta_2 \Rightarrow \varepsilon_2 = (\varepsilon_x + \varepsilon_y)/2 + \gamma_{xy}/2$$

$$\varepsilon_3 = (\varepsilon_x + \varepsilon_y)/2 + [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)/2] \cos 2\theta_3 + (\gamma_{xy}/2) \sin 2\theta_3 \Rightarrow \varepsilon_3 = \varepsilon_y$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon_1 \\ \varepsilon_y = \varepsilon_3 \\ \gamma_{xy} = 2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) \end{cases}$$

برای (Appendix A-4) Principal stresses:

$$\sigma_{\max}, \sigma_{\min} = E(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)/[2(1-\mu)] \pm [E/2^{1/2}(1+\mu)] [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2]^{1/2}$$

$$\text{Maximum shear stress: } \tau_{\max} = E/2^{1/2}(1+\mu) [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2]^{1/2}$$

Delta Rosette •

$$\theta_1 = 0^\circ, \quad \theta_2 = 60^\circ, \quad \theta_3 = 120^\circ$$

با مراجعه به شکل ۴-۴۰:

$$\varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min} = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)/3 \pm 2^{1/2}/3 [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]^{1/2}$$

$$\theta_p = 0.5 \tan^{-1} 3^{1/2} (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) / (2\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3)$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

Maximum shear stress: $\tau_{\max} = 2^{1/2} E / 3(1 + \mu) [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]^{1/2}$

مثال ۴-۵.

یک Rectangular Rosettes روی یک صفحه فولادی نصب شده است. سه Strain اندازه گیری شده عبارتند از:

$$\epsilon_1 = 300 \mu\text{m/m}, \quad \epsilon_2 = 200 \mu\text{m/m}, \quad \epsilon_3 = -150 \mu\text{m/m}$$

Principal stresses ها و Location آنها را محاسبه کنید. $E = 2.3 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, $\mu = 0.3$ در نظر بگیرید.

حل:

$$\sigma_{\max}, \sigma_{\min} = E(\epsilon_1 + \epsilon_3) / [2(1 - \mu)] \pm [E/2^{1/2}(1 + \mu)] [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]^{1/2}$$

$$\Rightarrow \sigma_{\max} = 7.03 \times 10^7 \text{ N/m}^2, \quad \sigma_{\min} = -2.1 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

برای به دست آوردن زاویه θ از X-axis Maximum principal stress:

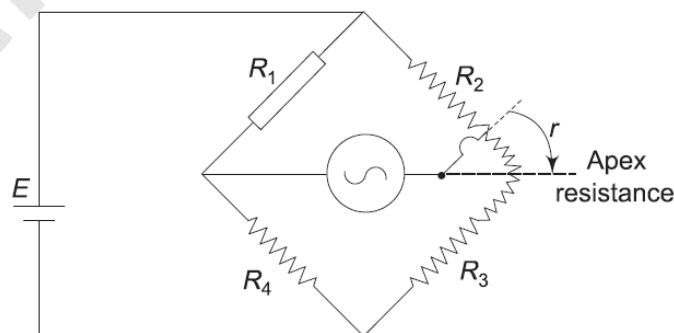
$$\tan 2\theta = (2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3) / (\epsilon_1 - \epsilon_3) \Rightarrow \tan 2\theta = 0.55$$

$$\Rightarrow \theta = 14.5^\circ \text{ or } 104.5^\circ$$

Balancing of Bridges •

ابتدا بایستی پلها را بالانس کرد.

روش Series balancing •

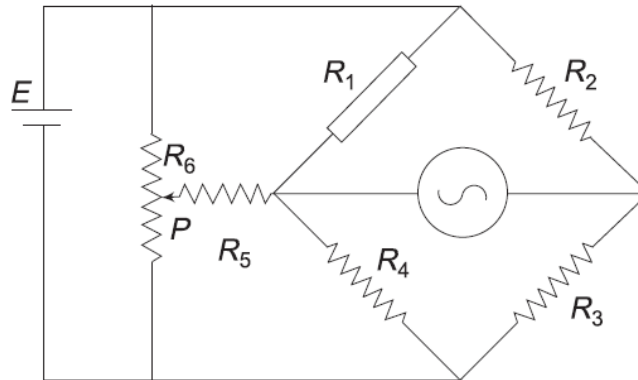


شکل ۴-۴۵. استفاده از Apex resistance برای بالانس کردن و کالیبراسیون

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

روش موازی موازنه •



شکل ۴-۴۶. موازی موازنه

کالیبراسیون Strain gauge bridge

روش الکتریکی •

یکی از روش‌های الکتریکی استفاده از Apex resistance شکل ۴-۴۵ می‌باشد.

می‌توان Apex resistance را در یکی از gauge ها کالیبره کرد.

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} = 1$$

اگر پل در ابتدا بالانس باشد:

اگر Apex resistance تغییر کند به طوری که R_2 به $R_2 + r$ افزایش و R_3 به $R_3 - r$ تغییر کند:

$$\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_4} = \frac{R_2 + r}{R_3 - r}$$

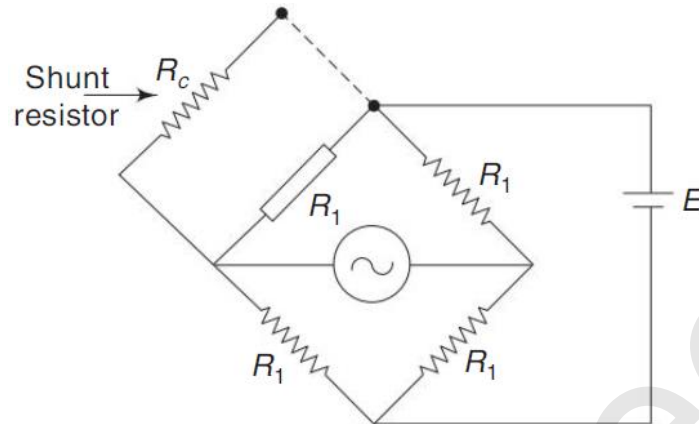
$$x = \frac{r}{R_3} \Rightarrow \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{2x}{1-x}$$

بنابراین اگر Gauge factor معلوم باشد می‌توان Apex resistance را کالیبره نمود.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

روش دوم الکتریکی کالیبراسیون با استفاده از یک Shunt resistor مطابق شکل ۴-۴۷ است.



شکل ۴-۴۷. Shunt resistor method of calibration

$$\Delta R_1 = R_1 - \frac{R_1 R_c}{R_1 + R_c}$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_c} \approx \frac{R_1}{R_c}, \quad R_c \gg R_1$$

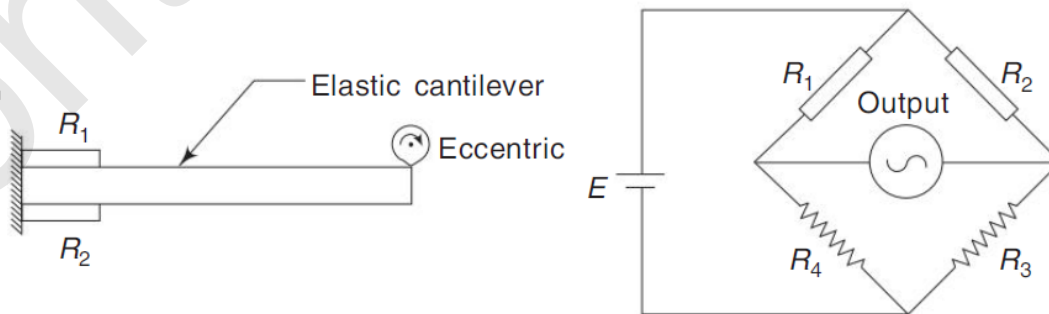
تغییر خروجی در اثر اتصال R_c به موازات هر مقاومت R_1 را می توان اندازه گیری کرد.

روش مکانیکی

کالیبراسیون استاتیکی

از Dead weight ها استفاده می شود.

کالیبراسیون دینامیکی Strain gauge ها با استفاده از یک Eccentric

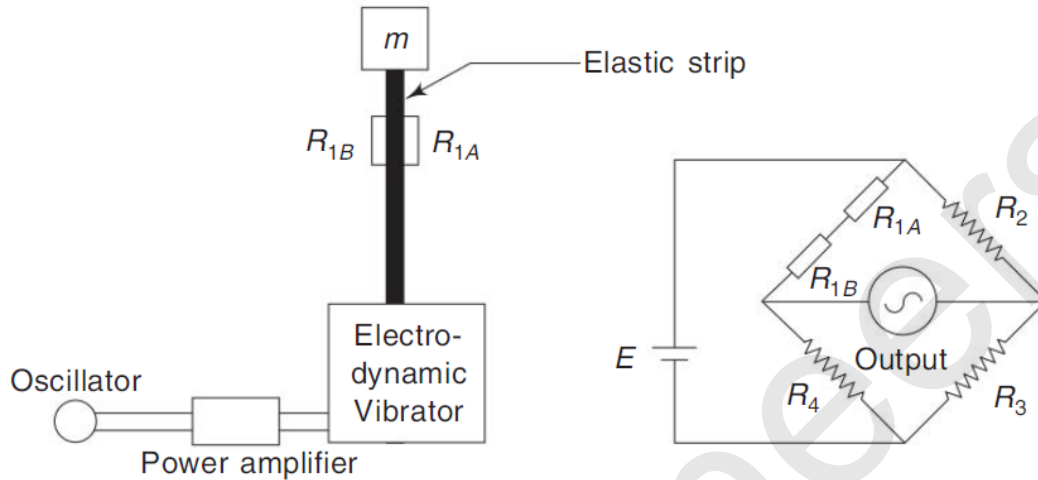


شکل ۴-۴۸. کالیبراسیون دینامیکی Strain gauge ها با استفاده از یک Eccentric

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

• کالیبراسیون دینامیکی Strain gauge ها با استفاده از یک Vibrator



شکل ۴-۴۹. کالیبراسیون دینامیکی Strain gauge ها با استفاده از یک Vibrator

دامنه نیروی سینوسی وارده به Elastic strip در اثر جرم m : $m\omega^2 x_0$

ω : فرکانس دورانی Vibrator

x_0 : دامنه جابه‌جایی جرم

Bending موجب تغییرات Opposite nature در R_{1A} و R_{1B} می‌شود.

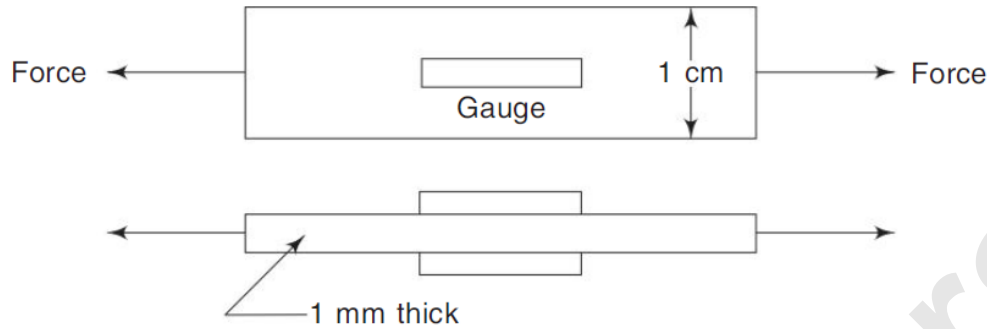
Gauge ها فقط به Direct strain ناشی از نیروی دینامیکی وارده در اثر حرکت جرم پاسخ خواهند داد.

مثال ۴-۶.

یک Tensile force link با قرار گرفتن دو Strain gauge به صورت back-to-back بر روی یک نوار آلومینیومی ساخته شده است. چهار Gauge، $120\ \Omega$ ، دو عدد در روی نوار و دو عدد دیگر به عنوان Gauge به کار رفته است. Gauge factor برابر 2.2 و حداکثر نیروی وارده برابر $400\ N$ است. حداکثر جریان گذرنده از Gauge ها به $25\ mA$ محدود می‌شود. Young's modulus ماده نوار برابر $6.9 \times 10^{10}\ N/m^2$ است.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

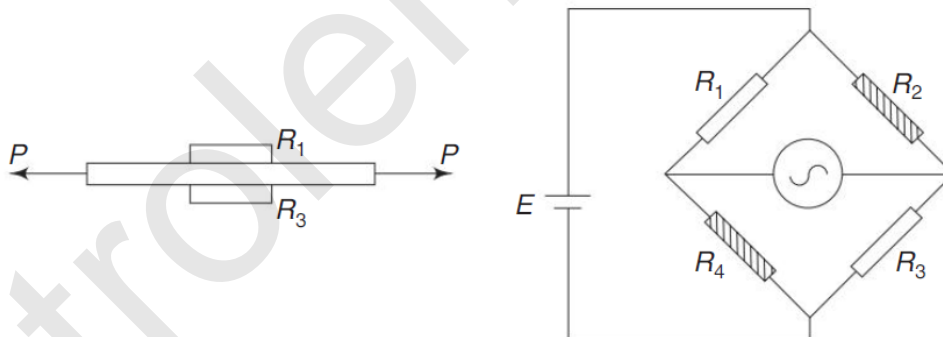


شکل ۴-۵۰. مثال ۴-۶

الف) اگر خروجی پل به اسیلوسکوپیی که در 10mV/cm Trace deflection تنظیم شده است، وصل شود. Trace deflection را در حداکثر بار بیابید. امیدانس ورودی اسیلوسکوپ را بی نهایت فرض کنید.

ب) وقتی که یک مقاومت $100\text{K}\Omega$ موازی یکی از Gauge ها قرار گیرد، Trace shift برابر 1cm است. Trace deflection را در حداکثر بار برای این Setting اسیلوسکوپ بیابید.

حل:



شکل ۴-۵۱. Bridge arrangement

Active gauge : R_3 ، R_1

Dummy gauge : R_4 ، R_2

$2 =$ Signal enhancement factor

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

(الف)

$$\text{Output voltage} = \frac{EF\varepsilon}{4}$$

برای تغییر در مقاومت یک بازو:

در اثر تغییر R_1 و R_3 :

$$\text{Output voltage} = \frac{EF\varepsilon}{4} \times 2 = \frac{EF\varepsilon}{2}$$

$$\text{Battery voltage } E = I(R_1 + R_2) = \frac{25}{1000}(120 + 120) = 6V$$

$$\text{Strain } \varepsilon \text{ in the strip} = \frac{P}{AY}$$

$$P = 400N, \quad Y = 6.9 \times 10^4 \Rightarrow \varepsilon = \frac{P}{AY} = \frac{400}{10 \times 6.9 \times 10^4} = 5.8 \times 10^{-4}$$

$$\text{Output voltage} = \frac{EF\varepsilon}{2} = \frac{6 \times 2.2 \times 5.8 \times 10^{-4}}{2} = 3.83mV$$

$$\text{Trace deflection} = \frac{3.83}{10} = 0.383cm$$

(ب)

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_c} = \frac{120}{120 + 10^5} \Rightarrow \frac{\Delta R_1}{R_1} = 1.199 \times 10^{-3}$$

که Trace shift برابر $1cm$ می دهد.

در اثر $\varepsilon = 5.8 \times 10^{-4}$:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = 2.2 \times 5.8 \times 10^{-4} \Rightarrow \frac{\Delta R_1}{R_1} = 1.276 \times 10^{-3}$$

در مدت کالیبراسیون تنها مقاومت یک بازو تغییر می کند در حالی که در مدت اعمال بار مقاومت دو بازو تغییر می کند.

$$\text{Trace shift} = \frac{2 \times 1.27 \times 10^{-3}}{1.199 \times 10^{-3}} = 2.13cm$$

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

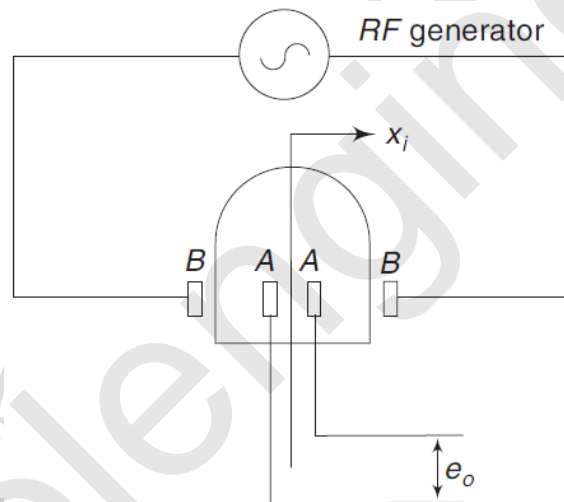
Ionic type displacement transducer •

بر اساس ایجاد ولتاژ در دو الکتروود واقع در یک گاز یونیزه شده کار می کند.

Ionisation transducer

از یک لوله شیشه ای محتوی گاز کم فشار تشکیل می شود.

حرکت x_i لوله نسبت به الکتروودهای ثابت خارجی، ولتاژ خروجی را تغییر می دهد.

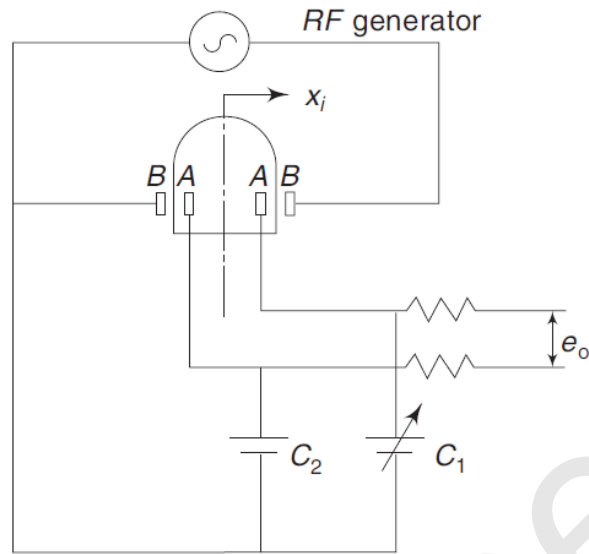


شکل ۴-۵۳. Moving tube type ionisation transducer.

بالانس بین الکتروودها ممکن است با تغییر یکی از ظرفیت های C_1 ، C_2 در اثر حرکت x_i که باید اندازه گیری شود، تغییر کند و این خروجی e_o را تولید می کند.

Instrumentation

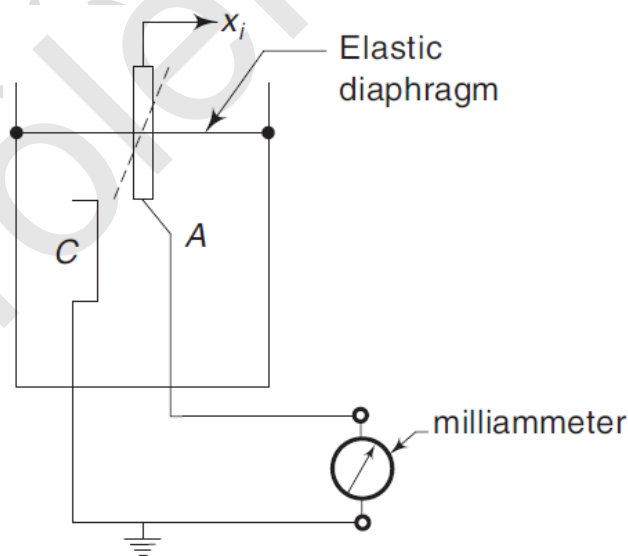
COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



شکل ۴-۵۴. Ionisation transducer used with variable capacitance transducer.

Mechano-electronic transducer

از نوع جابه‌جایی الکترونیکی است. بر مبنای این اصل که جریان صفحه به فضای بین یک کاتد و آند در یک دیود یا تریود بستگی دارد، کار می‌کند.



شکل ۴-۵۵. Mechano-electronic transducer.

این ترنسیدیوسر را برای اندازه‌گیری جابه‌جایی، فشار، نیرو می‌توان به کار برد.

Instrumentation

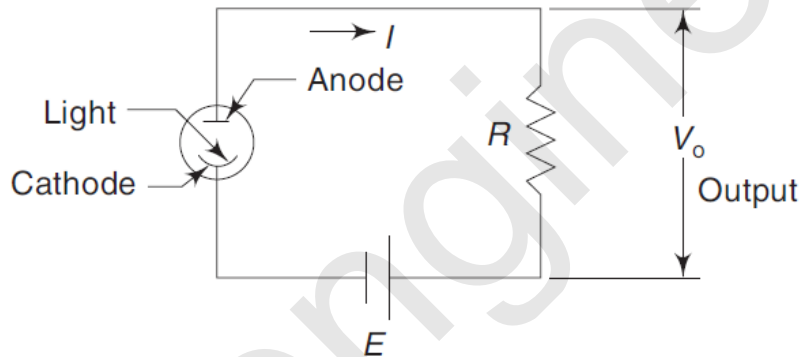
COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

۲-۲-۴. Optoelectrical Transducer

این ترنسیدیوسرها پرتو نور را به سیگنال الکتریکی تبدیل می کنند.

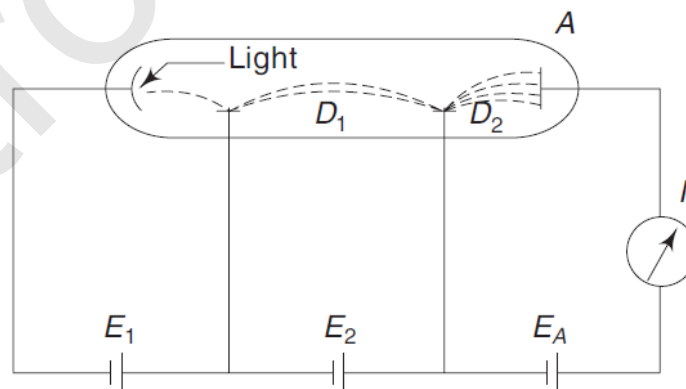
ترنسیدیوسر Photo-Emissive

جریان I با شدت Incident radiations و حساسیت متناسب است. حساسیت نیز به طول موج تابش بستگی دارد.



شکل ۴-۵۶. Photo-Emissive transducer

بهره بیشتر را می توان با استفاده از Photo-multiplier به دست آورد.



شکل ۴-۵۷. Photo-multiplier

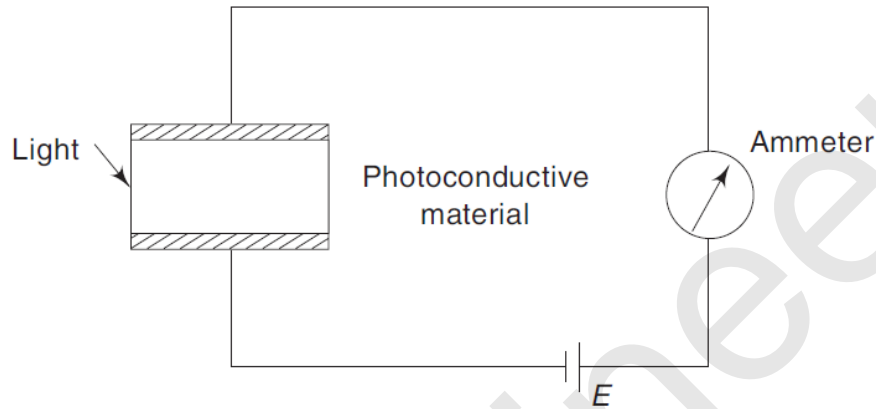
تعداد مراحل ممکن است بیشتر از مراحل نشان داده شده در شکل ۴-۵۷ باشد.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

ترنسدیوسر Photo-Conductive

یک ماده رسانای نوری نظیر PbS در اثر تغییر شدت نور، تغییر مقاومت می دهد.

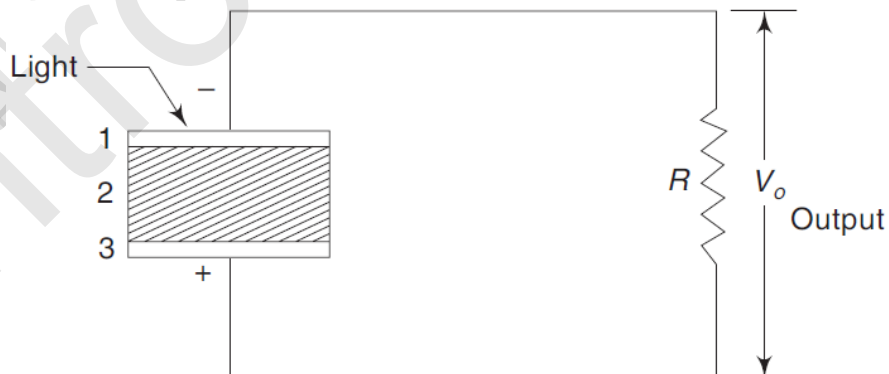


شکل ۴-۵۸. Photo-Conductive material.

شدت نور نیز در اثر حرکت مورد اندازه گیری تغییر می یابد.

ترنسدیوسر Photo-Voltaic

این ترنسدیوسر Sandwich construction دارد.



شکل ۴-۵۹. Photo-Voltaic transducer.

فصل چهارم

المان‌های ترنسدیوسر

۳-۴. ترنسدیوسرهای دیجیتالی

خروجی گسسته است و ممکن است Frequency type output یا Digitally coded output باشد.

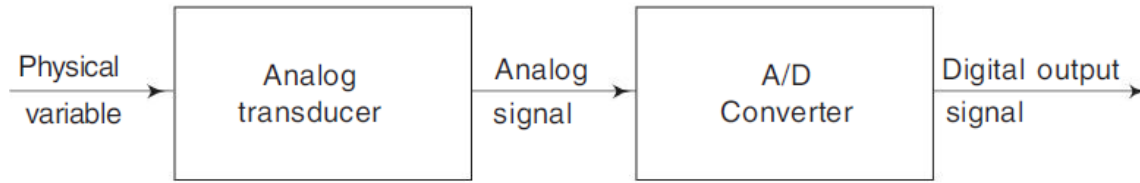
مزیت:

- استفاده از کامپیوترهای دیجیتال به همراه ترنسدیوسرها برای پردازش داده‌ها آسان‌تر می‌شود.
- سیگنال‌های دیجیتال به صورت Pulse count یا Frequency or sequences of digitally coded output به دامنه‌های سیگنال وابسته نیستند و بنابراین بدون اعوجاج و نویز خارجی به سهولت قابل انتقال هستند.
- افزایش Accuracy در Pulse count ممکن است.
- مزیت‌های Ergonomic در ارائه داده‌های دیجیتالی وجود دارد. خطای ذاتی سیستم‌های آنالوگ مانند تقریب مشاهده نمی‌شود.
- خواننده‌های اندازه‌گیری را می‌توان تا هر رقم قابل توجه رکورد کرد.
- مصرف برق در سیستم اندازه‌گیری دیجیتال بسیار کم است.
- سیستم Self-diagnostic را می‌توان به راحتی در مورد سیستم اندازه‌گیری دیجیتال گنجاند.

ترنسدیوسرهای دیجیتال از حوزه فرکانس یا انواع ترنسدیوسرهای مولد فرکانس تا اینکدرهای دیجیتال را شامل می‌شوند.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz



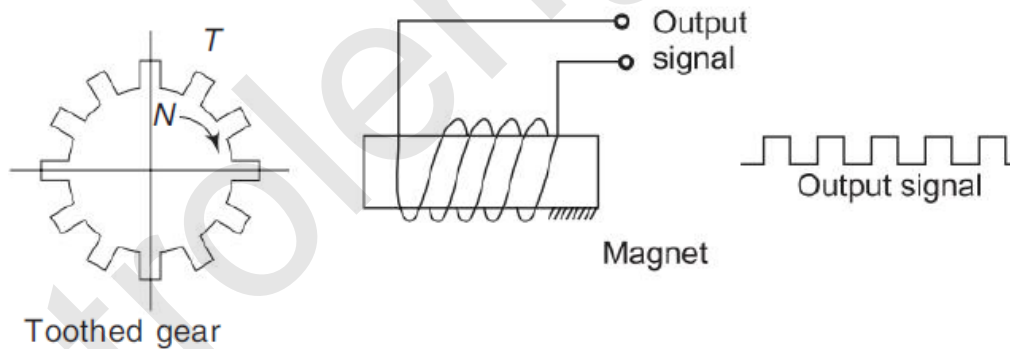
شکل ۴-۶۰. ابزار دیجیتالی شامل A/D

۴-۳-۱. Frequency Domain Transducer

خروجی به شکل پالس یا موج سینوسی است که فرکانس آن معیار اندازه‌گیری مقدار متغیر فیزیکی است.

• Electromagnetic frequency domain transducer

برای اندازه‌گیری سرعت به کار می‌رود.



شکل ۴-۶۱. ترنسیدیوسر حوزه فرکانسی الکترومغناطیسی

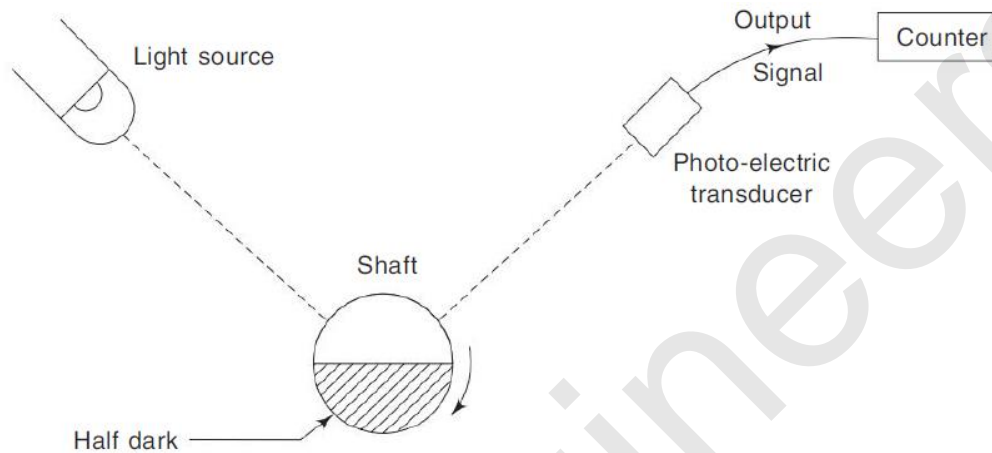
فرکانس پالس برابر است با حاصل ضرب سرعت دوران و تعداد دندان. بنابراین پالس معیار اندازه‌گیری سرعت دوران است.

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

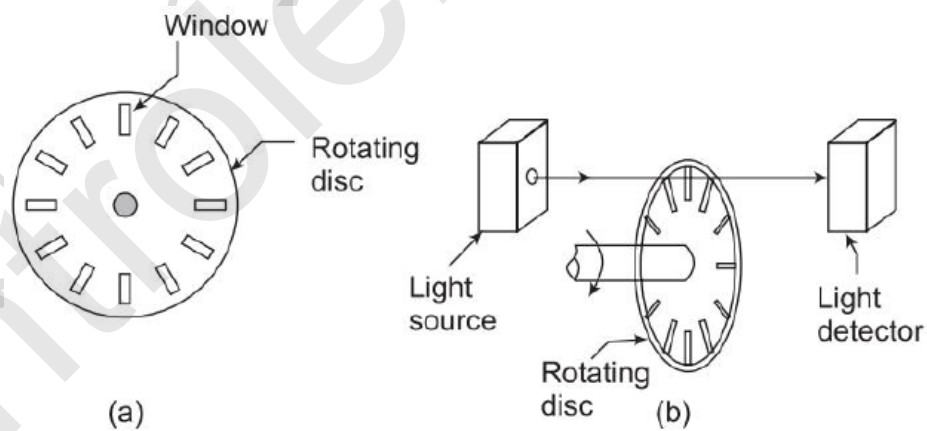
• Opto-Electrical frequency domain transducer

برای اندازه‌گیری سرعت دوران شفت می‌توان استفاده کرد.



شکل ۴-۶۲. ترنسدیوسر حوزه فرکانسی Opto-Electrical برای حرکت چرخشی

فرکانس پالس الکتریکی خروجی معیاری از سرعت چرخش است.



شکل ۴-۶۳. ترنسدیوسر حوزه فرکانسی Opto-Electrical برای حرکت چرخشی

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

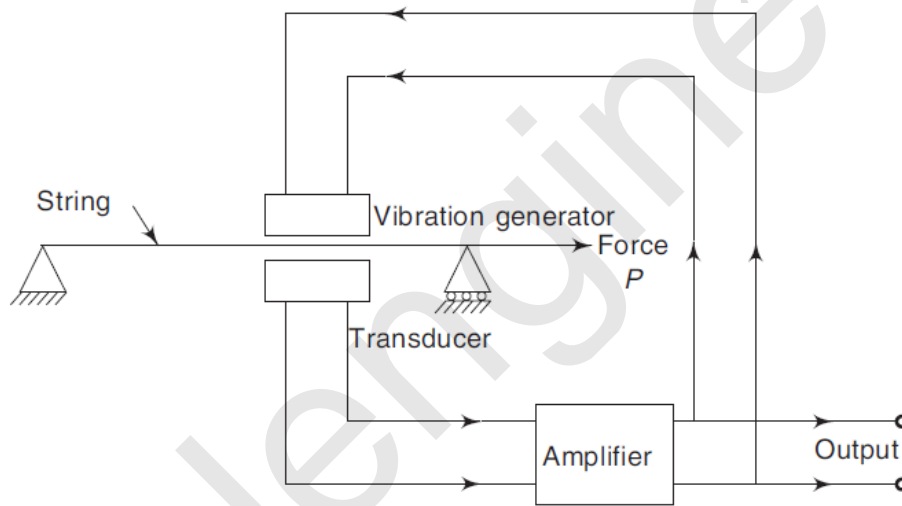
Vibrating string transducer •

برای اندازه‌گیری نیروی وارد به یک metal string که در حالت ارتعاشی نگه داشته می‌شود و فرکانس آن به نیروی اعمال‌شده بستگی دارد، به کار می‌رود.

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{P}{a\rho}}$$

P : نیروی وارده

mass density of the wire material : ρ



شکل ۴-۶. ترنسیدیوسر Vibrating string

فرکانس توسط Frequency counter اندازه‌گیری می‌شود و معیاری برای اندازه‌گیری نیروی اعمال‌شده به String است.

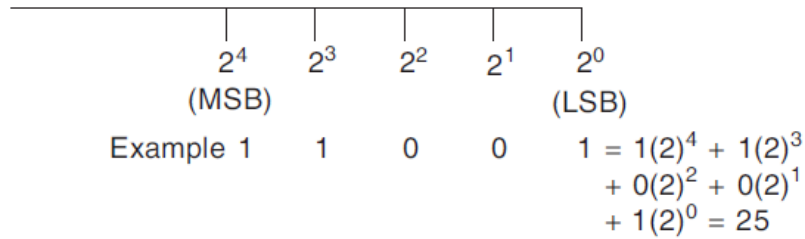
برای اندازه‌گیری نیرو و جابه‌جایی و فشار قابل استفاده است.

Binary Codes ۲-۳-۴

خروجی دیجیتالی معمولاً به شکل باینری است

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

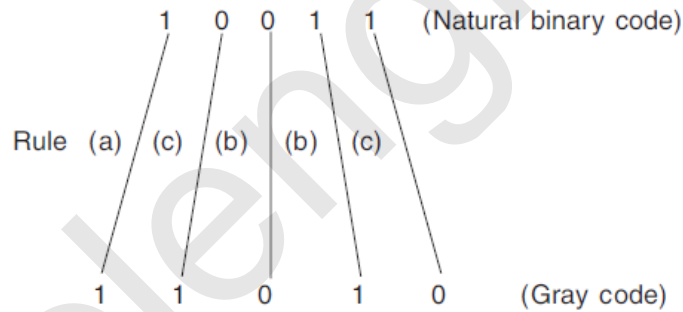


شکل ۴-۶۵. Binary code arrangement

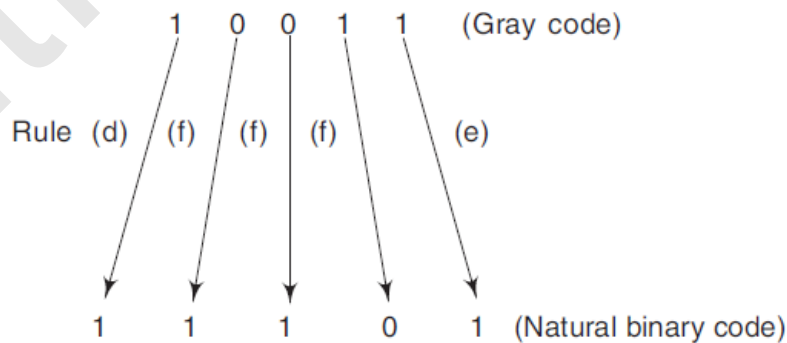
Resolution : $\frac{1}{31}$

کد BCD یک کد ساده ولی کم بازده است.

کد Gray برای رفع عیب ذاتی کد باینری طبیعی به کار می رود.



شکل ۴-۶۶. Natural binary to gray code conversion



شکل ۴-۶۷. Gray code to natural binary conversion

Instrumentation

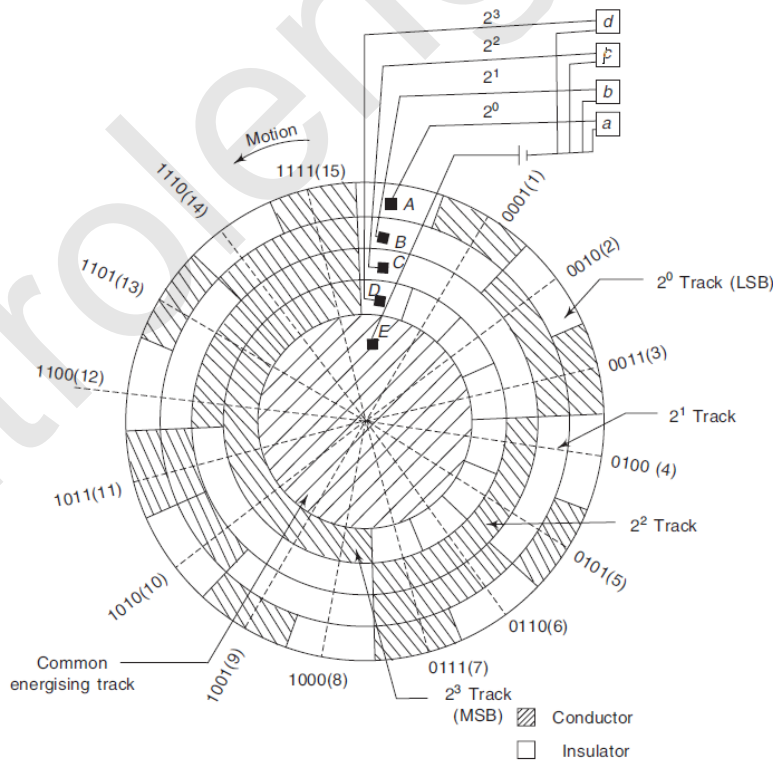
COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

جدول ۴-۴. Gray Code و Natural Binary معادل اعداد تا ۱۵

Decimal Number	Natural Binary Equivalent	Gray code equivalent
15	1111	1000
14	1110	1001
13	1101	1011
12	1100	1010
11	1011	1110
10	1010	1111
9	1001	1101
8	1000	1100
7	0111	0100
6	0110	0101
5	0101	0111
4	0100	0110
3	0011	0010
2	0010	0011
1	0001	0001
0	0000	0000

Digital Encoders ۳-۳-۴

حرکت آنالوگ (خطی یا چرخشی) را مستقیماً به خروجی دیجیتال تبدیل می‌کند.



شکل ۴-۶. Basic encoder disc (Contact brush type)

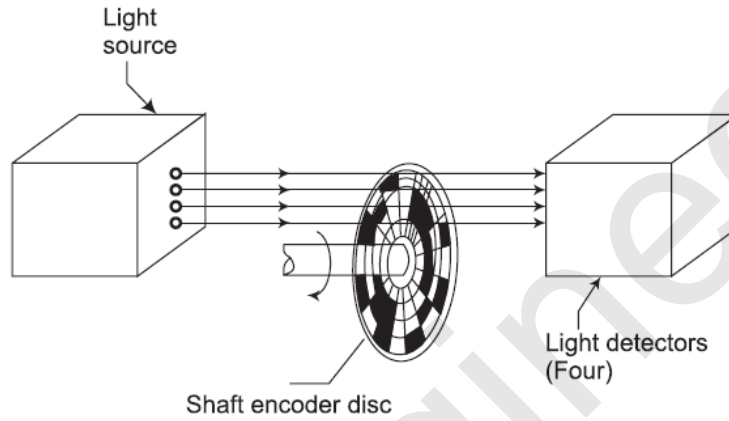
Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
 University of Tabriz

Resolution : $\frac{1}{15}$

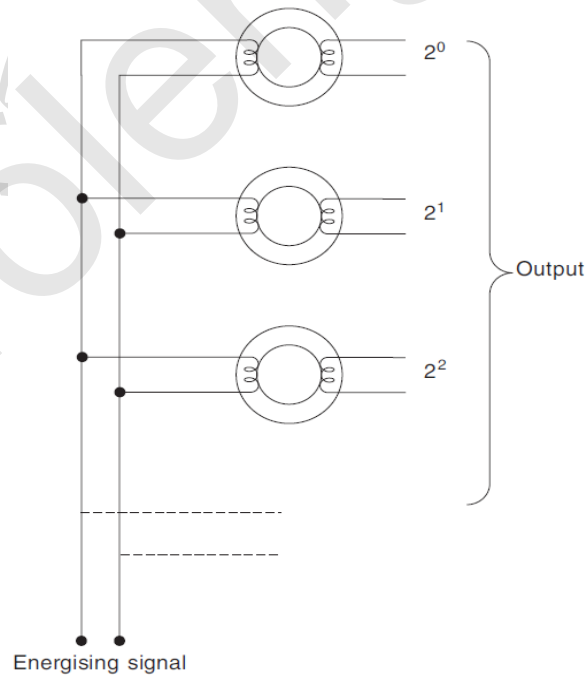
از نوع تماسی است. سایش و اصطکاک بین Brush و Disc از معایب آن است.

Optical type encoder •



شکل ۴-۶۹. Optical encoder

Magnetic type of encoder •



شکل ۴-۷۰. Magnetic encoder circuit

Instrumentation

COPYRIGHT © S. Ghaemi
University of Tabriz

از نوع غیر تماسی Non-contact است.

controlengineers.ir