Principles of Mechatronic Systems
مبانی سیستم های مکاترونیکی

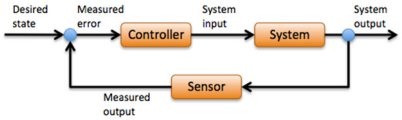
مبانی اندازه گیری
سنسورهای آنالوگ (۱)

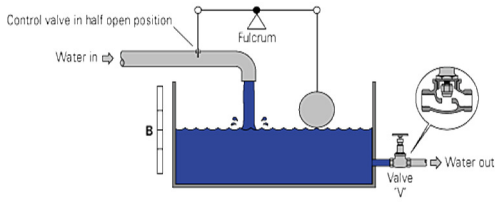
By: Reza Tikani
Mechanical Engineering Department
Isfahan University of Technology

دستگاه اندازه گیری

کاربرد حسگر در یک سیستم مکاترونیکی:

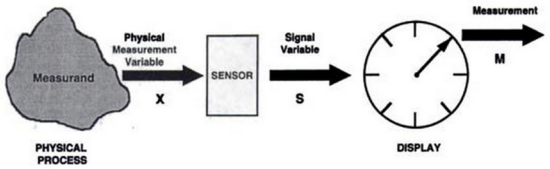
1- اندازه گیری خروجی سیستم برای کنترل فیدبک





دستگاه اندازه گیری

یک وسیله اندازه گیری (حسگر)، وسیله ای است که یک متغیر دلخواه فیزیکی (آنچه که اندازه گیری می شود) را به صورتی که برای ثبت و ضبط مناسب است (اندازه) تبدیل می کند.

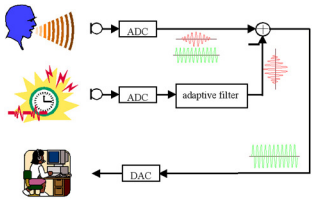


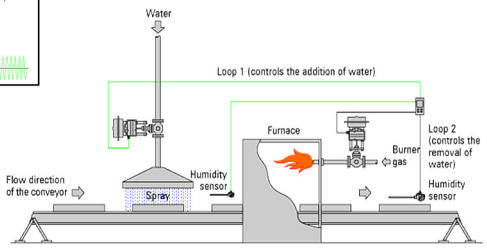
Characteristics of Instrumentation, R. John Hansman, Jr.

دستگاه اندازه گیری

کاربرد حسگر در یک سیستم مکاترونیکی:

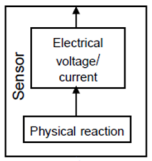
2- اندازه گیری ورودی های ناشناخته و اغتشاش به سیستم جهت کنترل پیش خورد





دستگاه اندازه گیری

یک حسگر دارای دو لایه عملکردی است:



1- کمیت اندازه گیری از طریق یک پدیده فیزیکی حس می شود.

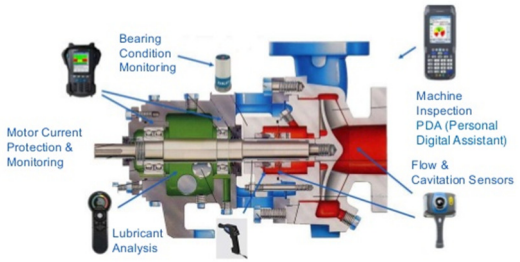
2- سیگنال حس شده به فرمی که انتقال، ذخیره سازی و پردازش راحت باشد تبدیل می شود (تبدیل به سیگنال الکتریکی).

معمولاً هر دو نام حسگر (Sensor) و مبدل (Transducer) برای وسایل اندازه گیری به کار برده می شود.

دستگاه اندازه گیری

کاربرد حسگر در یک سیستم مکاترونیکی:

3- اندازه گیری متغیرها با هدف پایش وضعیت و عیب یابی



دستگاه اندازه گیری

متغیرهای فیزیکی و سیگنالی:

متغیرهای سیگنال می توانند در سیستم انتقال مکانیکی و الکتریکی استفاده و پردازش شوند.

Common physical variables	Typical signal variables
• Force	• Voltage
• Length	• Displacement
• Temperature	• Current
• Acceleration	• Force
• Velocity	• Pressure
• Pressure	• Light
• Frequency	• Frequency
• Capacity	
• Resistance	
• Time	
• …	

Characteristics of Instrumentation, R. John Hansman, Jr.

دستگاه اندازه گیری

کاربرد حسگر در یک سیستم مکاترونیکی:

4- اندازه گیری ورودی ها و خروجی ها به منظور مدلسازی تجربی سیستم

دستگاه اندازه گیری

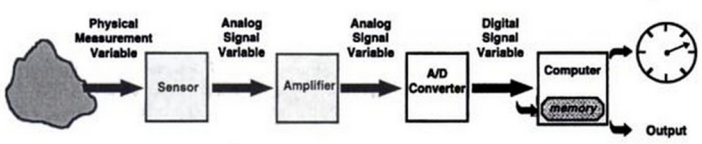
سنسور فعال:

این سنسورها، انرژی را به محیط اندازه گیری به عنوان بخشی از فرایند اندازه گیری اضافه می کنند. این سنسورها برای کارکردن به منبع انرژی نیاز دارند.

مثال: رادار، سیستم سونار

دستگاه اندازه گیری

یک وسیله اندازه گیری با آمپلی فایر، مبدل A/D و خروجی کامپیوتر:



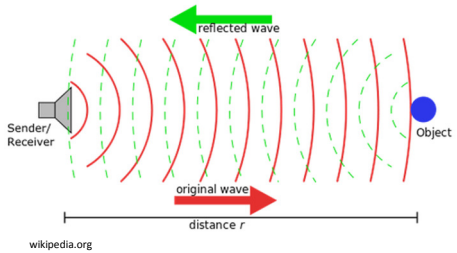
Characteristics of Instrumentation, R. John Hansman, Jr.

دستگاه اندازه گیری

سنسور فعال:

این سنسورها، انرژی را به محیط اندازه گیری به عنوان بخشی از فرایند اندازه گیری اضافه می کنند. این سنسورها برای کارکردن به منبع انرژی نیاز دارند.

مثال: رادار، سیستم سونار



دستگاه اندازه گیری

سنسورهای فعال و غیرفعال:

سنسورها معمولاً مبدلهایی هستند که فرم انرژی ورودی را به فرم دیگری از انرژی در خروجی تبدیل می کنند.

سنسور غیرفعال:

در طول فرایند اندازه گیری، انرژی ورودی را افزایش نمی دهند و حتی ممکن است باعث کاهش انرژی شوند.

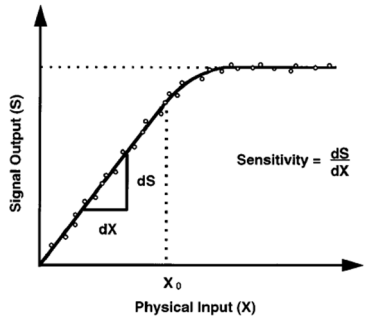
مثال: ترموکوپل، گیج فشار

سنسور پارک خودرو!!!

دستگاه اندازه گیری

منحنی کالیبراسیون:

- ✓ حساسیت سنسور
- ✓ حالت اشباع
- ✓ محدوده دینامیکی وسیله



Characteristics of Instrumentation, R. John Hansman, Jr.

دستگاه اندازه گیری

کالیبراسیون:

تعیین رابطه بین کمیت فیزیکی قابل اندازه گیری ورودی و متغیر سیگنال (خروجی) در یک سنسور خاص را گویند.

معمولاً یک سنسور به وسیله اعمال یک ورودی فیزیکی با اندازه مشخص و ثبت خروجی کالیبره می شود.

دستگاه اندازه گیری

صحت یا درستی (Accuracy)، دقت (Precision) و خطا (Error):

دستگاه اندازه گیری

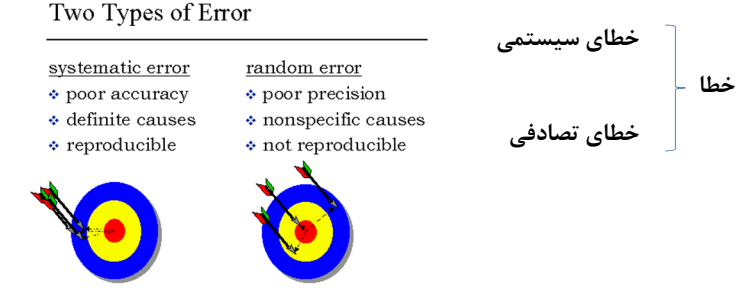
صحت یا درستی (**Accuracy**)، دقت (**Precision**) و خطا (**Error**):

صحت یک وسیله اندازه گیری به عنوان تفاوت بین مقدار صحیح اندازه و اندازه به دست آمده به وسیله ابزار اندازه گیری تعریف می شود.

اندازه گیری وزن به دلیل تنظیم نبودن ترازوی عقربه ای (به انحراف عدد قرائت شده و وزن واقعی افراد، بایاس، عدم صحت یا خطای سیستمی می گویند)

دستگاه اندازه گیری

صحت یا درستی (**Accuracy**)، دقت (**Precision**) و خطا (**Error**):

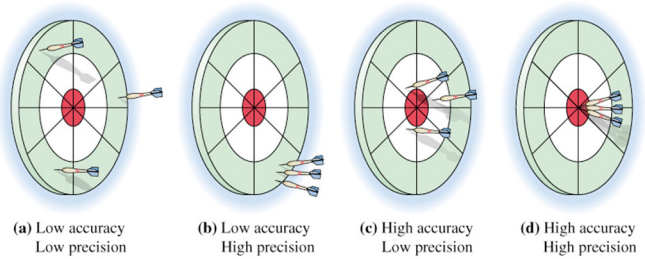


خطا
- خطای سیستمی
- خطای تصادفی

http://atropos.as.arizona.edu/aiz/teaching/a250/meas_review.html

دستگاه اندازه گیری

صحت یا درستی (**Accuracy**)، دقت (**Precision**) و خطا (**Error**):

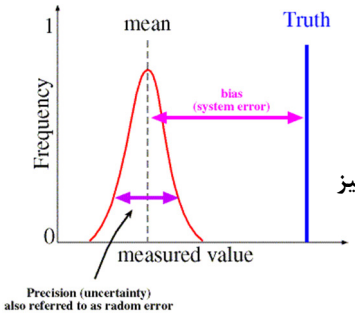


http://extensionengine.com/accuracy-precison/

دستگاه اندازه گیری

خطای سیستمی:

- ✓ برخی از اوقات وجود دارد.
- ✓ تکرارپذیر است.
- ✓ جبران پذیر است (دلایل مشخص).
- ✓ عامل ایجاد آن کالیبره نبودن تجهیز اندازه گیری، خطای انسانی و ... است.
- ✓ به صورت آماری قابل تحلیل نمی باشد.



http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/remote/lecture_notes/measurements/bias_random_errors.html

دستگاه اندازه گیری

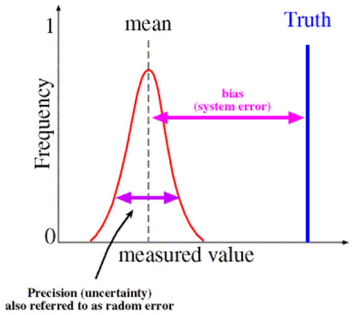
در صورت اندازه گیری به تعداد بینهایت، برای یک کمیت فیزیکی مشخص، ممکن است اندازه های بسیار پرت تا اندازه های بسیار نزدیک به مقدار واقعی به دست آید. ولی تعداد داده های پرت در مقایسه با داده های نزدیک به مقدار واقعی بسیار کم است (احتمال ظهور آنها در بین داده ها بسیار پایین است).

مثال: دقت اندازه گیری یک کولیس 0.01 mm با احتمال 99% است. یعنی در هر صدبار اندازه گیری یک طول مشخص، پراکندگی 99 داده حداکثر 0.01 mm است.

دستگاه اندازه گیری

خطای تصادفی:

- ✓ **همیشه وجود دارد.**
- ✓ **تکرارپذیر نیست.**
- ✓ **جبران پذیر نیست (دلایل نامشخص).**



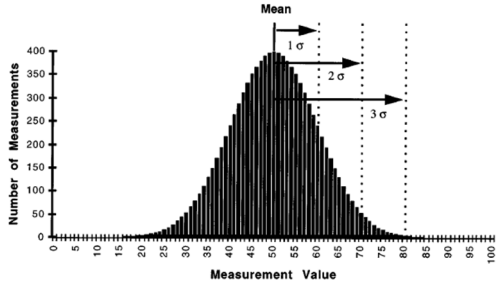
در هربار اندازه گیری با کولیس کوچکترین مرتبه مرتب تغییر می کند (خطای تصادفی).

http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/remote/lecture_notes/measurements/bias_random_errors.html

دستگاه اندازه گیری

توزیع نرمال (توزیع گوسی):

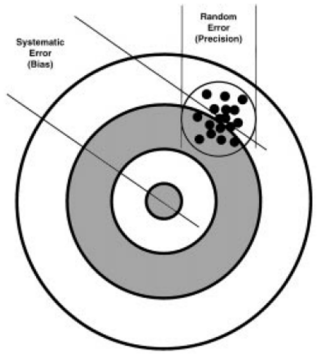
این توزیع در غیاب بایاس دارای میانگینی برابر مقدار حقیقی اندازه است.



Characteristics of Instrumentation, R. John Hansman, Jr.

دستگاه اندازه گیری

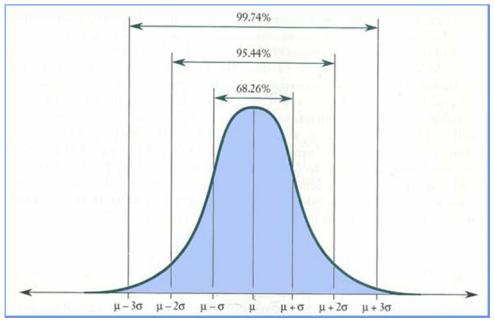
خطای کل در هر اندازه گیری نتیجه هر دو خطای سیستمی و تصادفی است.



Characteristics of Instrumentation, R. John Hansman, Jr.

دستگاه اندازه گیری

استفاده از روشهای آماری



$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \mu)^2}$$

http://curvebank.calstatela.edu

دستگاه اندازه گیری

مثال:

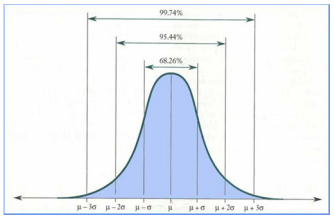
Diameter [mm]

31.2	31.3	31.0	31.2	31.5	30.9	31.2	31.4	31.1	31.1
31.4	30.9	31.5	31.2	31.6	31.1	30.8	30.7	30.9	

31.1579 ⬅ میانگین داده ها(μ)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \mu)^2}$$

0.2524 ⬅ انحراف معیار (σ)



30.6532 < D < 31.6627

دستگاه اندازه گیری

مثال:

A shaft supplier claims that the true mean diameter of their stainless steel shafts is 31.01 mm. An engineer measures the diameter of these stainless steel shafts selected at random from a large incoming batch supplied by the above supplier and the following readings were obtained.

Diameter [mm]

31.2	31.3	31.0	31.2	31.5	30.9	31.2	31.4	31.1	31.1
31.4	30.9	31.5	31.2	31.6	31.1	30.8	30.7	30.9	

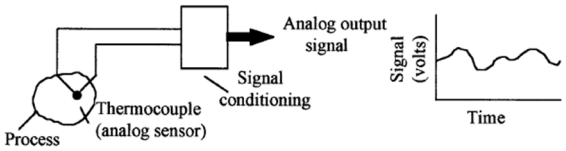
Determine the range of values in which you would expect 95 % of all measured values to lie.

دستگاه اندازه گیری

سنسورهای آنالوگ و دیجیتال:

سنسورهای آنالوگ سیگنالی ایجاد می کنند که هم اندازه و هم محتوای زمانی آن پیوسته است.

جریان، دما، جابجایی، شتاب، سرعت، فشار، شدت نور، کرنش از جمله متغیرهای فیزیکی پیوسته هستند که براحتی توسط سیگنال آنالوگ نمایش داده می شوند.



Characteristics of Instrumentation, R. John Hansman, Jr.

دستگاه اندازه گیری

ابزارهای قرائت آنالوگ و دیجیتال:

ابزار قرائت دیجیتال (Digital readout instrument) خروجی گسسته نشان می دهد.

قرائت دیجیتال معمولاً به صورت نمایش یک عدد است.

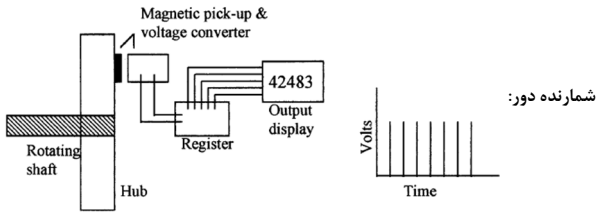
❖ **رزولوشن یک ابزار قرائت دیجیتال** برابر است با کمترین تغییر در کوچکترین رقم معنادار

دستگاه اندازه گیری

سنسورهای آنالوگ و دیجیتال:

سنسورهای دیجیتال سیگنالی ایجاد می کنند که فقط در مقادیر گسسته ای از زمان وجود دارد.

سنسورهای دیجیتال از سیستم اعداد باینری برای بیان و انتقال اطلاعات استفاده می کنند.



Characteristics of Instrumentation, R. John Hansman, Jr.

دستگاه اندازه گیری

برخی از عوامل موثر استاتیکی و دینامیکی در انتخاب یک سنسور:

بازه (Range): تفاوت بین کمترین و بیشترین مقدار قابل اندازه گیری توسط سنسور

رزولوشن(Resolution): کوچکترین تغییری که سنسور می تواند اندازه گیری کند.

صحت (Accuracy): تفاوت بین مقدار اندازه گیری شده و مقدار واقعی

دقت (Precision): توانایی در تکرار یک اندازه گیری با دقت مشخص شده

حساسیت (Sensitivity): نسبت تغییر در خروجی به یک واحد تغییر در ورودی (شیب)

دستگاه اندازه گیری

ابزارهای قرائت آنالوگ و دیجیتال:

ابزار قرائت آنالوگ (analog readout instrument) نمایش خروجی ای را فراهم می کند که پیوسته بوده و مستقیماً معادل رفتار کمیت مورد اندازه گیری است.

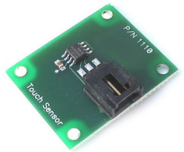
انحراف یک عقربه، بالا و پایین رفتن جوهر در یک مقیاس مدرج و ...

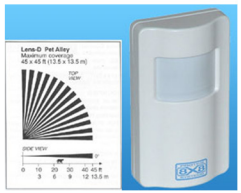
❖ **رزولوشن یک ابزار قرائت آنالوگ** کمترین افزایش قابل لمس در نمایش خروجی است.

❖ **ظرفیت قرائت آنالوگ** به صورت تفاضل بیشترین و کمترین مقادیری که می تواند نشان داده شود تعریف می شود.

❖ **بازه قرائت**، کمترین و بیشترین مقادیری که می توان نمایش داد را مشخص می کند.

سنسورهای آنالوگ





- ✓ پتانسیومتر
- ✓ حسگرهای اندوکتانس متغیر
- ✓ حسگرهای مغناطیس دائم
- ✓ حسگرهای خازنی
- ✓ پیزوالکتریک
- ✓ حسگرهای نیرو و گشتاور
- ✓ کرنش سنج
- ✓ حسگرهای فشار، دما و جریان
- ✓ حسگرهای آلتراسونیک

دستگاه اندازه گیری

برخی از عوامل موثر استاتیکی و دینامیکی در انتخاب یک سنسور:

انحراف از صفر (Zero Offset): مقدار خروجی سنسور به ازای ورودی صفر

میزان خطی بودن: درصد انحراف از خط best fit linear curve

زمان پاسخ: تاخیر زمانی بین ورودی و خروجی

رزونانس: فرکانسی که در آن ماکزیمم اندازه خروجی ظاهر می شود.

دمای کاری: محدوده دمایی که در آن عملکرد سنسور مطابق مشخصات آن است.

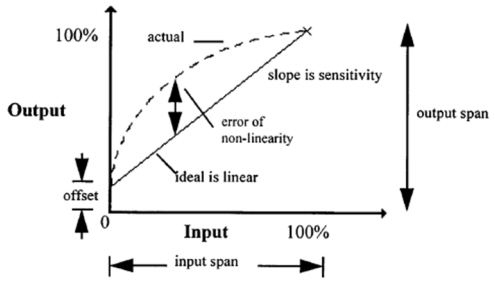
سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

4 متغیر سینماتیکی:

- ✓ جابجایی (شامل موقعیت، فاصله، مجاورت)
- ✓ سرعت
- ✓ شتاب
- ✓ میزان تغییر شتاب (Jerk)

دستگاه اندازه گیری

نمودار محدوده خروجی و ورودی یک وسیله اندازه گیری:



Characteristics of Instrumentation, R. John Hansman, Jr.

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

اندازه گیری یک متغیر سینماتیکی و استخراج سایر متغیرها از آن بستگی دارد به:

- نوع سیگنال اندازه گیری شده (پایدار، گذرا، پریودیک، ...)
- محتوای فرکانسی مورد نیاز در سیگنال پردازش شده (گستره فرکانسی مورد نیاز)
- نسبت سیگنال به نویز (SNR) اندازه گیری
- تجهیزات در دسترس برای پردازش (پردازش آنالوگ یا دیجیتال، محدودیت پردازش دیجیتال مانند نرخ نمونه برداری، سرعت پردازش و ...)
- دقت مورد نیاز در سیستم

به عنوان مثال مشتق گیری از یک سیگنال دارای سیگنالهای فرکانس بالا با پهنای باند باریک هم‌ام نمی‌به راحتی امکان‌پذیر نیست.

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

کاربردهایی از این نوع سنسورها:

- The rotating speed of a work piece and the feed rate of a tool are measured in controlling machining operations.
- Displacements and speeds (both angular and translatory) at joints (revolute and prismatic) of robotic manipulators in controlling manipulator trajectory.
- In high-speed ground transit vehicles, acceleration and jerk measurements can be used for active suspension control

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت:

- ✓ پتانسیومتر
- ✓ حسگرهای اندوکتانس متغیر
- ✓ حسگرهای مغناطیس دائم
- ✓ حسگرهای خازنی
- ✓ پیزوالکتریک

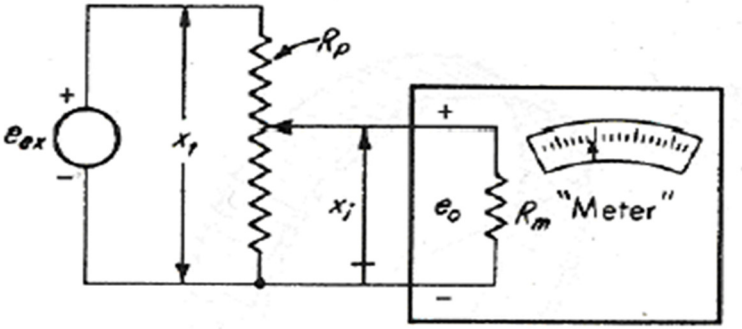
سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

کاربردهایی از این نوع سنسورها:

- Angular speed in the control of rotating machinery, such as turbines, pumps, compressors, motors, and generators in power-generating plants.
- Proximity sensors and accelerometers are the two most common types of measuring devices used in machine protection systems for condition monitoring, fault detection, diagnostic, and on-line (often real-time) control of large and complex machinery.
- Displacement measurements are used for valve control in process applications, plate thickness in steel rolling mills.

پتانسیومتر

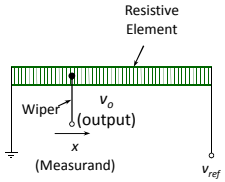
اثر بار (Loading Effect):

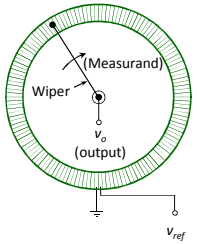


پتانسیومتر

پتانسیومتر دورانی و خطی:

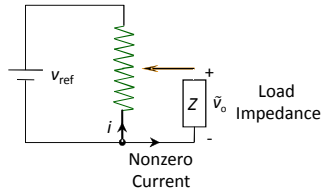
اصل فیزیکی در پتانسیومتر این است که مقاومت الکتریکی یک سیم با طول آن نسبت مستقیم دارد.





پتانسیومتر

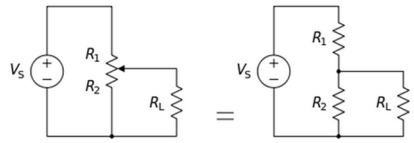
اثر بار (Loading Effect):



$$V_L = \frac{R_2 R_L}{R_1 R_L + R_2 R_L + R_1 R_2} \cdot V_s$$

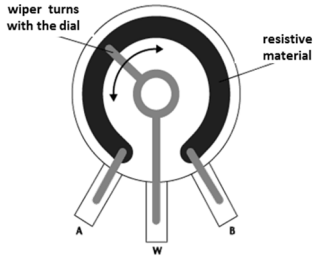
در صورتی که R_L خیلی زیاد باشد:

$$V_L = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_s$$



http://en.wikipedia.org/wiki/Potentiometer

پتانسیومتر

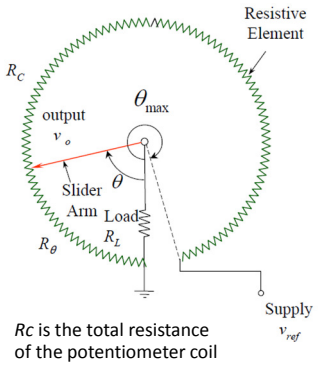


ورودی های A و B به ولتاژ Vref و زمین متصل می شوند.

ورودی جاروبکی (Wiper Terminal) به خروجی متصل است.

پتانسیومتر

اثر بار (Loading Effect):



Rc is the total resistance of the potentiometer coil

$$R_\theta = \frac{\theta}{\theta_{max}} R_c$$

بانوشتن قانون جریانها در نقطه برخورد:

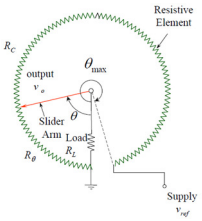
$$\frac{v_{ref} - v_o}{R_c - R_\theta} = \frac{v_o}{R_\theta} + \frac{v_o}{R_L}$$

$$\frac{v_{ref} - v_o}{1 - \theta/\theta_{max}} = \frac{v_o}{\theta/\theta_{max}} + \frac{v_o}{R_L/R_c}$$

$$\frac{v_o}{v_{ref}} = \left[\frac{(\theta/\theta_{max})(R_L/R_C)}{\left(R_L/R_C + (\theta/\theta_{max}) - (\theta/\theta_{max})^2\right)} \right]$$

پتانسیومتر

اثر بار (Loading Effect):



خطای غیرخطی شدن را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

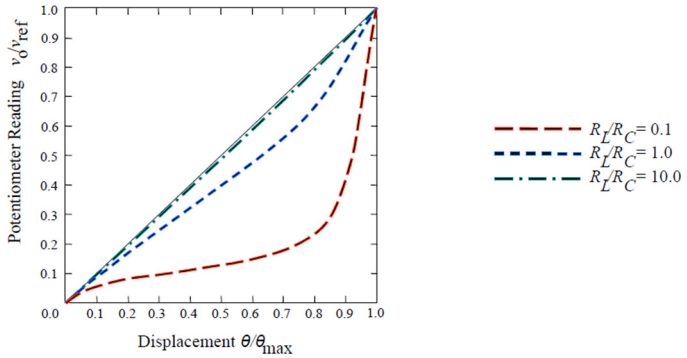
$$e = \frac{\left(v_o/v_{ref} - \theta/\theta_{max}\right)}{\theta/\theta_{max}} 100\%$$

Loading nonlinearity error in a potentiometer at $\theta/\theta_{max} = 0.5$

Load Resistance Ratio R_L/R_C	Loading Nonlinearity Error (e)
0.1	-71.4%
1.0	-20%
10.0	-2.4%

پتانسیومتر

اثر بار (Loading Effect):



پتانسیومتر

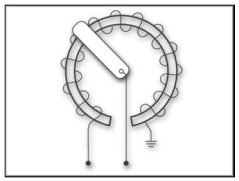
چند نکته:

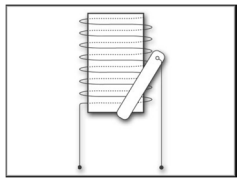
- نیروی مورد نیاز برای حرکت لغزنده از منبع حرکت تامین می گردد.
  - اتلاف انرژی به واسطه وجود اصطکاک
- انرژی الکتریکی منبع اصلی به دلیل وجود مقاومت در سیستم تلف می گردد و باعث بالا رفتن دمای سیستم می شود.

پتانسیومتر

چند نکته:

- رزولوشن محدودی در پتانسیومترهای حلقه ای وجود دارد، برای یک پتانسیومتر **N** حلقه ای:





$$r = \frac{1}{N} \times 100\%$$

- در پتانسیومترهای حلقه ای، رزولوشن برابر **0.1%** (برابر 1000 حلقه) نیز وجود دارد.
- رزولوشن خیلی بالا با استفاده از پتانسیومترهای ساخته شده از لایه مقاومتی پلاستیک رسانا قابل دست یابی است.

پتانسیومتر

حل مثال:

محاسبه رزولوشن

$$\frac{0.1}{\pi \times 20} \times 100\% = 0.16\%$$

100/0.16=625 turns

Potentiometer circumference=π×10=625×d

d=0.5 mm.

$$\frac{4 \times 10^{-6} \times \pi D \times 625}{\pi (0.05/2)^2} = 5\,\Omega$$

D=1.25 cm

پتانسیومتر

مثال:

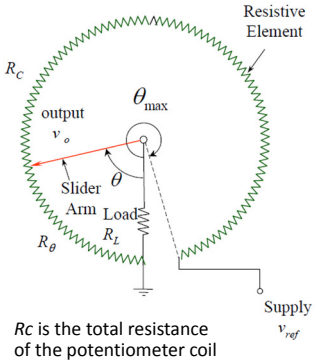
میزان جابجایی چرخ محرک یک ربات با استفاده از یک پتانسیومتر اندازه گیری می شود. میزان رزولوشن مورد نیاز برای جابجایی ربات برابر یک میلیمتر است. قطر چرخ محرک ربات برابر 20cm می باشد. ملاحظات طراحی برای یک پتانسیومتر استاندارد دورانی برای این کاربرد را بررسی نمایید. فرض می شود مقاومت ویژه سیم مورد استفاده برابر $4\ \mu\Omega cm$ بوده و مقاومت پتانسیومتر برابر $5\ \Omega$ باشد.

قطر میانگین پتانسیومتر را برابر ده سانتیمتر در نظر بگیرید.

Resistivity=(resistance)×(cross-section area)/(length).

پتانسیومتر

اثر بار (Loading Effect):



Rc is the total resistance of the potentiometer coil

$$R_\theta = \frac{\theta}{\theta_{max}} R_c$$

بانوشتن قانون جریانها در نقطه برخورد:

$$\frac{v_{ref} - v_o}{R_c - R_\theta} = \frac{v_o}{R_\theta} + \frac{v_o}{R_L}$$

$$\frac{v_{ref} - v_o}{1 - \theta/\theta_{max}} = \frac{v_o}{\theta/\theta_{max}} + \frac{v_o}{R_L/R_c}$$

$$\frac{v_o}{v_{ref}} = \left[\frac{(\theta/\theta_{max})(R_L/R_C)}{\left(R_L/R_C + (\theta/\theta_{max}) - (\theta/\theta_{max})^2\right)} \right]$$

پتانسیومتر

مزایا:

- ✓ نسبتاً کم هزینه
- ✓ ولتاژ خروجی بالایی را تامین می کند که در اکثر کاربردها نیاز به تقویت کردن ندارد.

پتانسیومتر

حساسیت:

حساسیت یک پتانسیومتر نشان دهنده تغییر در ولتاژ خروجی به ازای تغییر کوچک در زاویه اندازه گیری شده است.

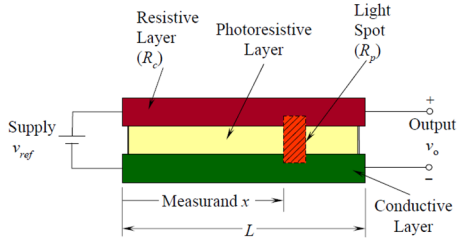
$$S = \frac{\Delta v_0}{\Delta \theta}$$

در حالت حدی:

$$S = \frac{\partial v_0}{\partial \theta}$$

پتانسیومتر نوری

پتانسیومتر نوری از یک مکانیزم نوری به جای استفاده از بازوی لغزنده برای اندازه گیری جابجایی استفاده می کند. مکانیزم نوری شامل یک لایه مقاومت نوری و یک منبع نوری است.
لایه مقاومت نوری از ماده ای ساخته شده که در صورت عدم دریافت نور، عایق الکتریکی و در صورت دریافت نور به ماده ای با مقاومت الکتریکی محدود تبدیل می شود.



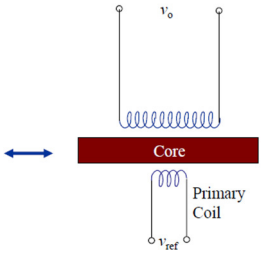
پتانسیومتر

معایب:

- ✓ نیروی مورد نیاز برای جابجایی لغزنده توسط منبع جابجایی تامین می شود (اعمال بار مکانیکی به سیستم).
- ✓ امکان اندازه گیری های فرکانس بالا وجود ندارد (وجود اصطکاک، جهش لغزنده،...).
- ✓ تغییرات در ولتاژ منبع تغذیه می تواند باعث خطا شود.
- ✓ زیاد بودن اثرات بار الکتریکی در مواقعی که اندازه مقاومت بار کم است.
- ✓ رزولوشن محدود به تعداد حلقه در سیم پیچ و همگن بودن آن است.
- ✓ بالارفتن دما و سائیدگی در سیم پیچ می تواند باعث افت کیفیت آن شود.

حسگرهای اندوکتانس متغیر

حسگرهای با القای متقابل:

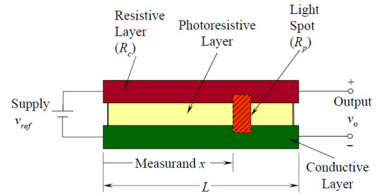


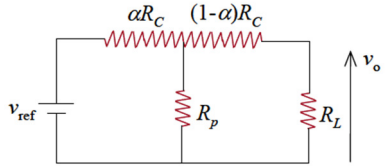
تحریک ولتاژ AC در سیم پیچ اولیه باعث ایجاد ولتاژ در سیم پیچ ثانویه می شود. اندازه ولتاژ تولیدی بستگی به میزان شار القا شده به سیم پیچ ثانویه دارد. جسمی که اندازه گیری آن مدنظر است به دو طریق باعث تغییر در شار می شود:

1- تغییر ماده فرومغناطیس درون مسیر شار مغناطیسی مانند LVDT، RVDT و حسگرهای مجاورتی القاء متقابل

2- حرکت یک سیم پیچ نسبت به سیم پیچ دیگر مانند Resolver, Synchro-transformer

پتانسیومتر نوری





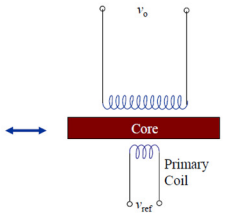
می توان نشان داد برای حالت $R_c \ll R_L$:

$$\frac{v_o}{v_{ref}} = \frac{1}{\left[\frac{xR_c}{LR_p} + 1\right]}$$

www.mech.ubc.ca

حسگرهای اندوکتانس متغیر

این حسگرها بر مبنای اصل القای الکترومغناطیس کار می کنند. بر اساس این اصل زمانی که یک رسانا در یک میدان مغناطیسی متغیر قرار گیرد، در آن جریانی القا می شود که میدان مغناطیسی حاصل از آن با میدان اولیه مخالفت می کند.



حسگرهای اندوکتانس متغیر به سه دسته تقسیم می ش

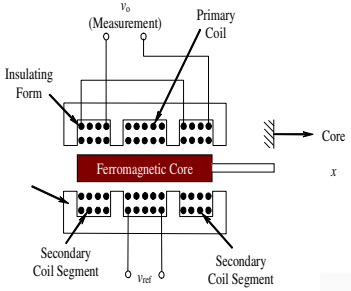
1- حسگرهای با القای دو طرفه (القای متقابل)

2- حسگرهای خودالقاء

3- حسگرهای با آهنربای دائم

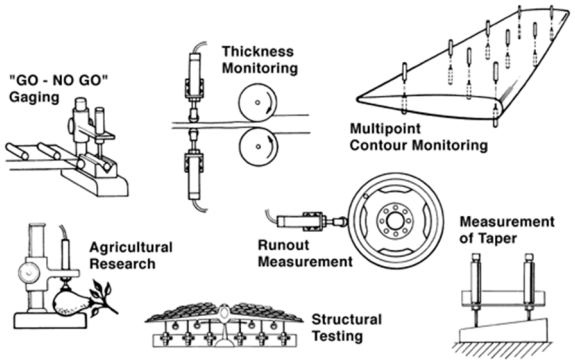
حسگرهای اندوکتانس متغیر

Linear Variable Differential Transformer (LVDT):



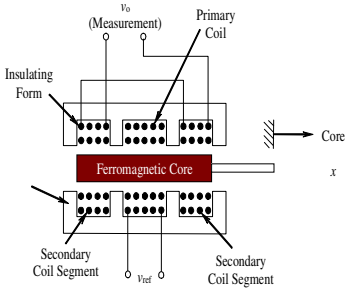
حسگرهای اندوکتانس متغیر

Linear Variable Differential Transformer (LVDT):



حسگرهای اندوکتانس متغیر

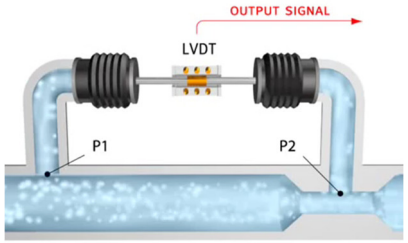
Linear Variable Differential Transformer (LVDT):



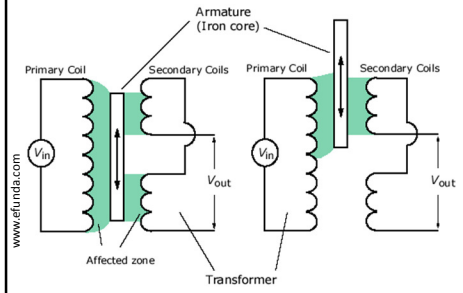
- محدوده کاری LVDT ها، از هزارم اینچ تا چند اینچ می باشد.
- محدوده فرکانسی آنها محدود است. ماکزیمم فرکانس قابل استفاده از آنها بین 100 تا 200 هرتز بسته به فرکانس ولتاژ ورودی است.

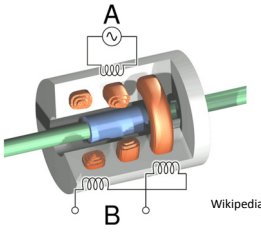
حسگرهای اندوکتانس متغیر

Linear Variable Differential Transformer (LVDT):

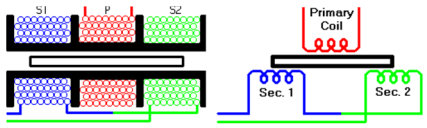


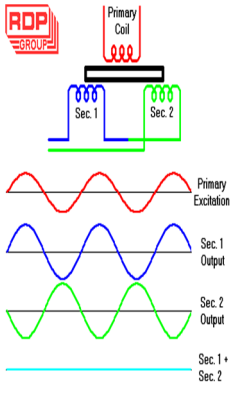
حسگرهای اندوکتانس متغیر





حسگرهای اندوکتانس متغیر

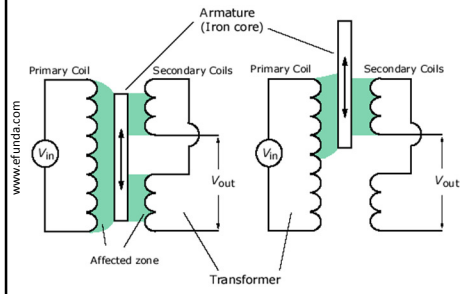


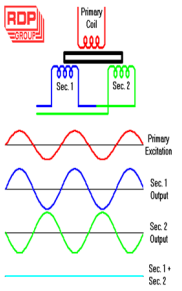


سیم پیچ های خروجی به صورت سری به یکدیگر متصل شده و دارای جهت سیم پیچی متضاد می باشند. اگر هسته کاملاً در وسط باشد، ولتاژ این دو سیم پیچ یکدیگر را خنثی می کنند و ولتاژ خروجی صفر خواهد بود. اگر هسته اندکی به سمت راست حرکت کند، ولتاژ کمتری در سیم پیچ چپ و ولتاژ بیشتری در سیم پیچ راست القا می شود. در این حالت ولتاژ برایند خروجی همفاز با ولتاژ سیم پیچ سمت راست است.
عکس این حالت در هنگام حرکت هسته به سمت چپ اتفاق می افتد.

حسگرهای اندوکتانس متغیر

اختلاف ولتاژ در سیم پیچ های ثانویه با جابجایی هسته درون سیم پیچ متناسب است. جهت حرکت با توجه به اختلاف فاز ولتاژهای AC در سیم پیچ های ثانویه به دست می آید.

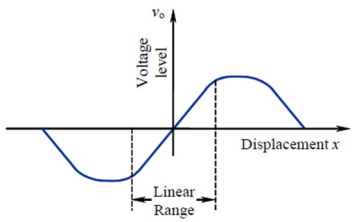




حسگرهای اندوکتانس متغیر

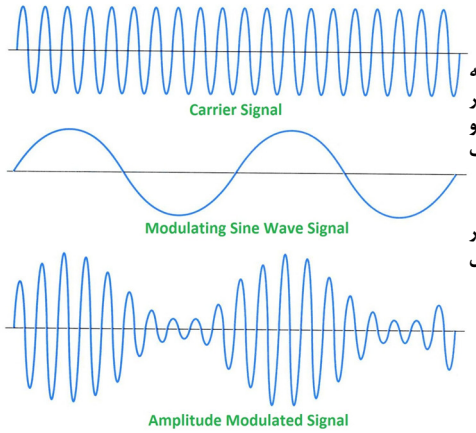
Linear Variable Differential Transformer (LVDT):

- این سنسورها در محدوده طراحی شده به عنوان گستره خطی، کاملاً خطی عمل می کنند ولی در خارج آن به شدت غیرخطی می شوند.



حسگرهای اندوکتانس متغیر

حسگرهای اندوکتانس متغیر



مدولاسیون دامنه ای:

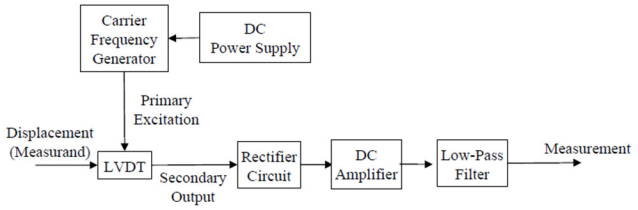
مدولاسیون دامنه ای پردازشی است که در آن سیگنال خروجی از یک حسگر در یک سیگنال حامل با دامنه و فرکانس ثابت که معمولاً هارمونیک است ضرب می شود.

فرکانس موج حامل باید از ده برابر بالاترین فرکانس موجود در سیگنال حسگر بیشتر باشد.

حسگرهای اندوکتانس متغیر

Signal Conditioning

1. یکسوسازی:



- AC output from the LVDT is rectified to obtain a DC signal
- Phase shift of the LVDT output has to be checked separately to determine the direction of motion

www.mech.ubc.ca

حسگرهای اندوکتانس متغیر

مدولاسیون دامنه ای:

خروجی **LVDT** به صورت مدولاسیون دامنه ای است. از آنجا که تحریک سیم پیچ اولیه به صورت موج **ac** فرکانس بالا می باشد، این موج به صورت موج حامل در خروجی ظاهر شده و سیگنال فرکانس پایین ناشی از جابجایی هسته (سیگنالی که هدف اندازه گیری آن است) بر روی موج حامل سوار است.

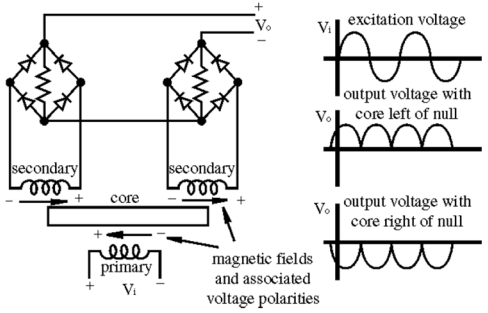
دو روش برای تفسیر خروجی و استخراج اطلاعات اندازه گیری از خروجی مدولاسیون دامنه ای وجود دارد:

1. یکسوسازی
2. دی مدولاسیون

حسگرهای اندوکتانس متغیر

Signal Conditioning

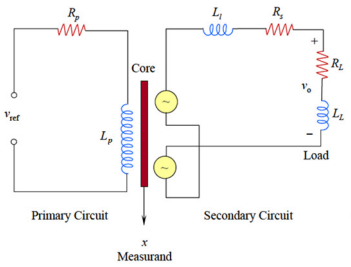
1. یکسوکردن جریان متناوب:



حسگرهای اندوکتانس متغیر

محاسبه اختلاف فاز سیگنال خروجی در مدار LVDT:

به دلیل وجود المان اندوکتانس در مدار خروجی، سیگنال خروجی با سیگنال ورودی (موج حامل) هم فاز نیست. برای انجام عملیات مدولاسیون لازم است مقدار اختلاف فاز محاسبه شود.

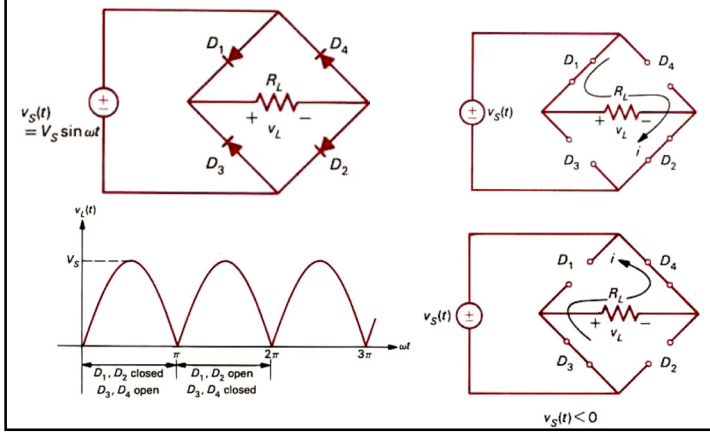


$$v_o = \left[\frac{j\omega L_p}{R_p + j\omega L_p}\right]\left[\frac{R_L + j\omega L_l}{(R_L + R_s) + j\omega(L_L + L_l)}\right]kx$$

$$\phi = 90° - \tan^{-1}\frac{\omega L_p}{R_p} + \tan^{-1}\frac{\omega L_L}{R_L} - \tan^{-1}\frac{\omega(L_L + L_l)}{R_L + R_s}$$

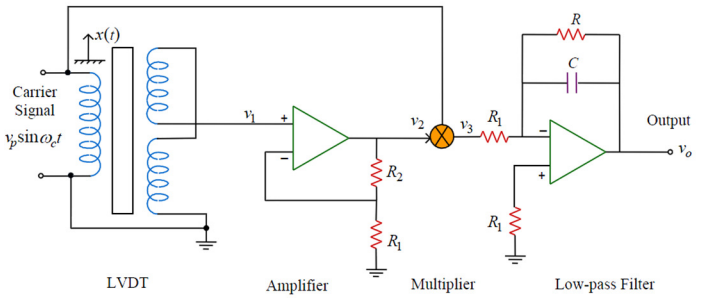
حسگرهای اندوکتانس متغیر

یادآوری:



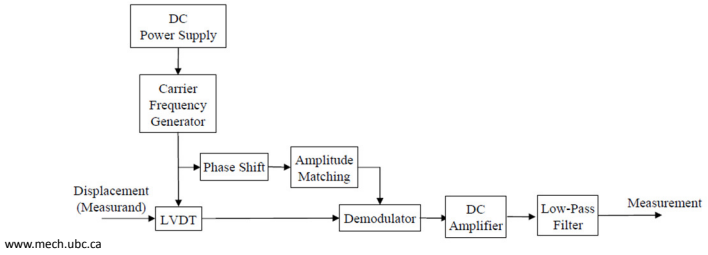
حسگرهای اندوکتانس متغیر

شکل زیر یک مدار ساده برای پردازش سیگنال یک مبدل تفاضلی (LVDT) را نشان می دهد.
اجزاء این سیستم را تحلیل نمایید. (از اختلاف فاز سیگنال خروجی صرفنظر نمایید)



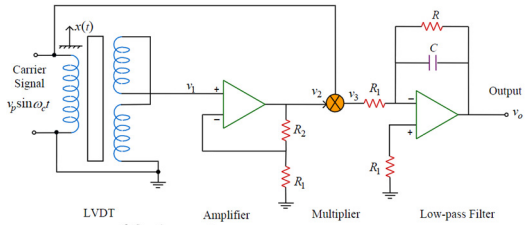
حسگرهای اندوکتانس متغیر

2. پیاده سازی (Demodulation)



از مقایسه سیگنال خروجی با سیگنال مرجع عملیات دی مدولاسیون و حذف موج حامل صورت می گیرد. نتیجه حاصل جابجایی جسم است که برای استفاده، تقویت شده و از فیلتر پایین گذر عبور داده می شود.

حسگرهای اندوکتانس متغیر



$k = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$ = amplifier gain

$$v_1 = v_p r\, x(t) \sin \omega_c t$$

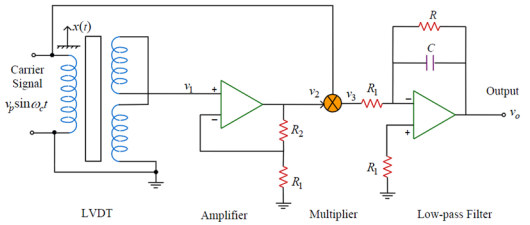
$$v_2 = v_p rk\, x(t) \sin \omega_c t$$

$$v_3 = v_p^2 rk\, x(t) \sin^2 \omega_c t$$

$$v_3 = \frac{v_p^2 rk}{2} x(t)[1 - \cos 2\omega_c t]$$

دلیل ضرب کردن مجدد در سیگنال حامل تجزیه سیگنال به دو بخش یکی متناسب با جابجایی بدون موج حامل و دیگری شامل موج حامل است که باید فیلتر شود. ضمن آنکه دو برابر شدن فرکانس بخشی که باید فیلتر شود جداسازی را راحتتر و با خطای کمتر همراه می کند.

حسگرهای اندوکتانس متغیر



$k = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$ = amplifier gain

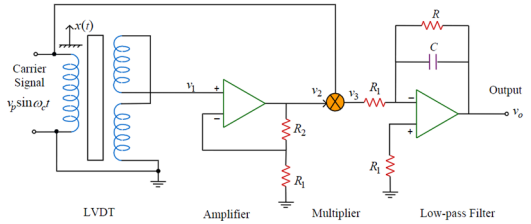
$$v_3 = \frac{v_p^2 rk}{2} x(t)[1 - \cos 2\omega_c t]$$

$$v_o = \frac{v_p^2 rkk_o}{2} x(t)$$

$$\frac{v_o}{v_3} = -\frac{k_o}{(1 + \tau j\omega)}$$

$$\text{Filter magnitude} = \frac{k_o}{\sqrt{1 + \tau^2 \omega^2}}$$

حسگرهای اندوکتانس متغیر



$k = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$ = amplifier gain

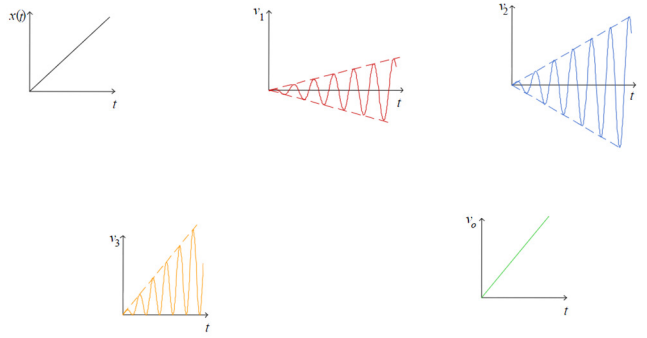
$$v_3 = \frac{v_p^2 rk}{2} x(t)[1 - \cos 2\omega_c t]$$

$$\frac{v_3}{R_1} + \frac{v_o}{R} + C\dot{v}_o = 0 \qquad \tau \frac{dv_o}{dt} + v_o = -\frac{R}{R_1} v_3 \qquad \frac{v_o}{v_3} = -\frac{k_o}{(1 + \tau s)} \qquad k0 = R/R1$$

$\tau = RC$=filter time constant

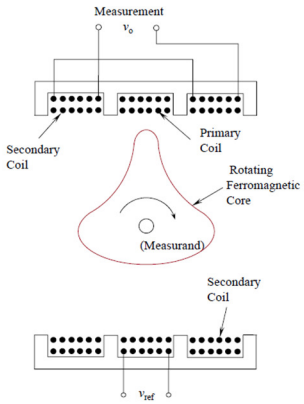
$$\frac{v_o}{v_3} = -\frac{k_o}{(1 + \tau j\omega)}$$

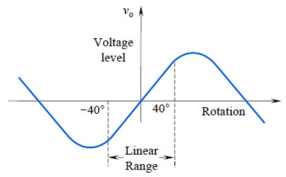
حسگرهای اندوکتانس متغیر



حسگرهای اندوکتانس متغیر

Rotatory Variable Differential Transformer





حسگرهای اندوکتانس متغیر

مزایای **LVDT**:

1- اصطکاک و سایش در آن وجود ندارد.

2- امپدانس خروجی آن پایین است (در حدود 100 اهم) و در نتیجه سطح توان سیگنال مناسب است.

3- امکان تشخیص جهت وجود دارد.

4- در سایزهای کوچک موجود است (طول یک سانتیمتر برای اندازه گیری 2 میلیمتر)

5- ساختاری ساده و مقاوم دارد و در نتیجه قیمت آن نسبتاً پایین و طول عمر آن بالا است.

6- رزولوشن اندازه گیری آن بهتر از پتانسیومتر است.

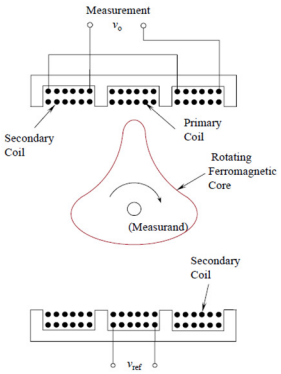
حسگرهای اندوکتانس متغیر

Rotatory Variable Differential Transformer

مبدل تفاضلی چرخشی:

اساس عملکرد، مزایا و مدارات پردازش سیگنال آن شبیه **LVDT** است، با این تفاوت که در آن از یک هسته فرومغناطیس چرخان استفاده شده است.

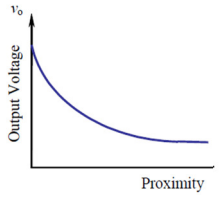
شکل هسته دارای تقارن است و در زاویه صفر ولتاژ خروجی مبدل صفر است.

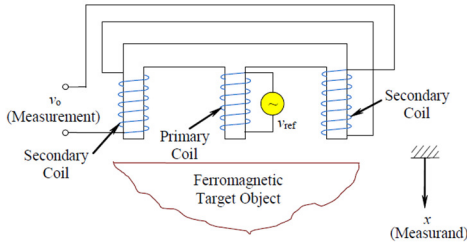


سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

✓ **سنسورهای مجاورتی القاء متقابل (دوطرفه)**

✓ با تغذیه سیم پیچ اولیه با یک منبع **AC** فرکانس بالا، باعث القای ولتاژ در سیم پیچهای ثانویه می شود. بر خلاف **LVDT** و **RVDT** در این حسگر، سیم پیچهای ثانویه به صورت سری و موافق به هم متصل شده اند.

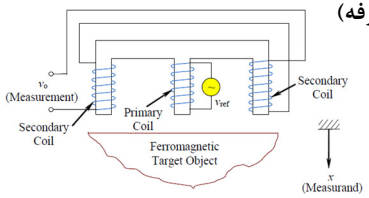




www.ubc.com

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

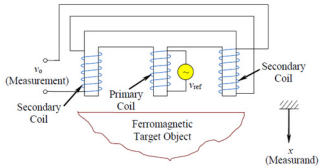
✓ سنسورهای مجاورتی القاء متقابل (دوطرفه)



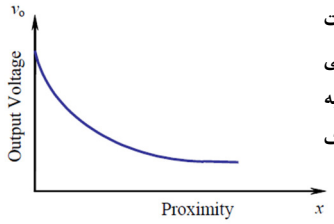
- سیگنال خروجی در این سنسور به صورت مدولاسیون دامنه ای است و برای استخراج کمیت مورد نظر باید عملیات دی مدولاسیون صورت گیرد.

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

✓ سنسورهای مجاورتی القاء متقابل (دوطرفه)



✓ سطح جسمی که هدف سنجش نزدیک شدن آن است را با یک ماده فرومغناطیس می پوشانیم. در اثر نزدیک شدن جسم مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس) مسیر شار مغناطیسی تغییر یافته و در نتیجه ولتاژ القا شده به صورت یک تابع غیرخطی از میزان نزدیک شدن جسم تغییر می یابد.

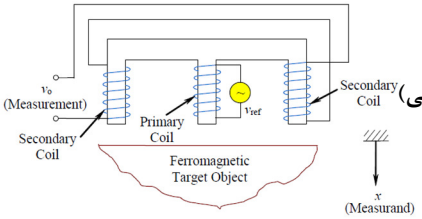


سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

✓ سنسورهای مجاورتی القاء متقابل (دوطرفه)

- موارد کاربرد:

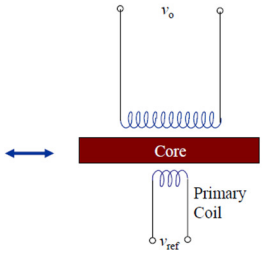
1. جابجایی های عرضی
2. جابجایی های کوچک (غیر خطی)
3. تشخیص وجود یک جسم



حسگرهای اندوکتانس متغیر

حسگرهای با القای متقابل:

تحریک ولتاژ AC در سیم پیچ اولیه باعث ایجاد ولتاژ در سیم پیچ ثانویه می شود. اندازه ولتاژ تولیدی بستگی به میزان شار القا شده به سیم پیچ ثانویه دارد. جسمی که اندازه گیری آن مدنظر است به دو طریق باعث تغییر در شار می شود:



1- تغییر در ماده فرومغناطیس درون مسیر شار مغناطیسی مانند LVDT، RVDT و حسگرهای مجاورتی القاء متقابل

2- حرکت یک سیم پیچ نسبت به سیم پیچ دیگر مانند Resolver, Synchro-transformer

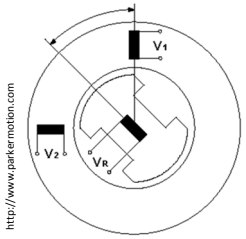
سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

✓ **Resolver**

ریسولور:

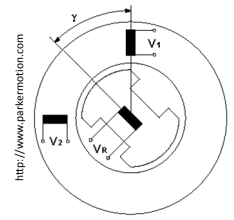
ریسولور یک مبدل القای متقابل است که برای اندازه گیری جابجایی زاویه ای استفاده می شود.

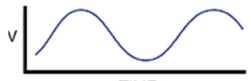
در ریسولور بر خلاف **RVDT** حرکت یک دسته سیم پیچ نسبت به سیم پیچ دیگر عامل تغییر در شرایط القای ولتاژ است.



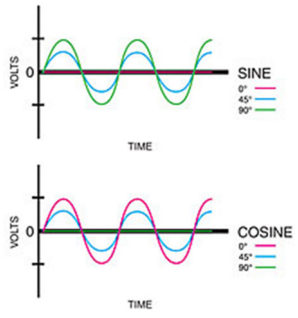
سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

✓ **Resolver**





Input Signal

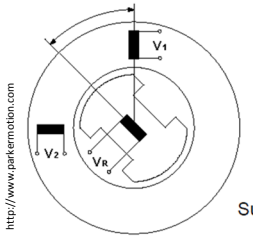


Output Signal

http://www.aytronencoders.com

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

✓ **Resolver**: <u>Mutual induction transducer for measuring angular displacements</u>



- Rotor has the primary winding and is energized by the supply voltage
- Stator has two sets of windings placed 90^0 apart

Supply voltage $v_{ref} = v_a \sin \omega t$

Induced Voltages $v_{o1} = a v_{ref} \cos\theta$ $v_{o2} = a v_{ref} \sin\theta$

The induced quadrate signals are

$$v_{o1} = a v_a \cos\theta \sin\omega t \qquad v_{o2} = a v_a \sin\theta \sin\omega t$$

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

✓ **Resolver**

با توجه به استفاده از تحریک **AC** فرکانس بالا، خروجی مجموعه به صورت مدولاسیون دامنه ای است.

Multiply each quadrature signal by v_{ref} to get

$$v_{m1} = v_{o1} v_{ref} = a v_a{}^2 \cos\theta \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} a v_a{}^2 \cos\theta [1 - \cos 2\omega t]$$

$$v_{m2} = v_{o2} v_{ref} = a v_a{}^2 \sin\theta \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} a v_a{}^2 \sin\theta [1 - \cos 2\omega t]$$

Low pass filter to obtain

$$v_{f1} = \frac{1}{2} a v_a{}^2 \cos\theta \qquad v_{f2} = \frac{1}{2} a v_a{}^2 \sin\theta$$

www.ubc.com

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

Resolver Applications:

1. Permanent Magnet (PM) Motor Commutation and Speed Control
2. AC & DC Servo Motor Commutation and Speed Control

Advantages:

1. Fine resolution and high accuracy
2. Low output impedance
3. Small size (10mm diameter)

Limitations:

1. Nonlinear output signals
2. Bandwidth limited by supply frequency
3. Slip rings and brushes would be necessary if multiple rotations to be measured (a brushless resolver can eliminate this)

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

Synchro-Transformer

ولتاژ القا شده در روتور گیرنده زمانی ماکزیمم است که روتور گیرنده همان زاویه را با سیم پیچ متناظر در مجموعه گیرنده داشته باشد. بنابراین رابطه مناسب برای ولتاژ خروجی به صورت زیر است:

$$v_o = a v_{ref} \cos(\theta_t - \theta_r)$$

مزیت سینکروترانسفورمر امکان اندازه گیری زاویه نسبی بین دو ش

لازم به ذکر است، سینکروترانسفورمر حول جایی که ولتاژ خروجی صفر است، یعنی شرایط

$$\theta_r - \theta_t = 90$$

استفاده می شود. این شرایط در تنظیم اولیه وضعیت روتورها در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب زمانی که شافتهای فرستنده و گیرنده نسبت به هم زاویه ای نگیرند ولتاژ خروجی صفر خواهد بود.

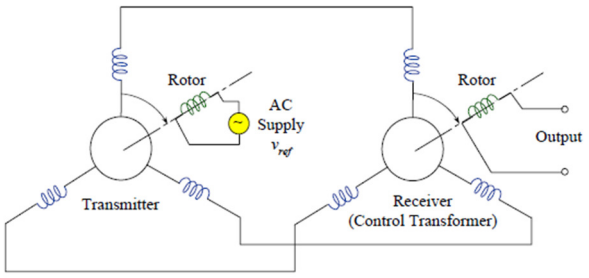
www.ubc.com

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

Synchro-Transformer سینکروترانسفورمر:

عملکرد سینکروترانسفورمر شبیه ریسولور است با این تفاوت که در سینکروترانسفورمر از دو جفت روتور و استاتور استفاده شده است.

هر کدام از استاتورها از سه دسته سیم پیچ با زاویه 120 درجه نسبت بهم تعبیه شده است.



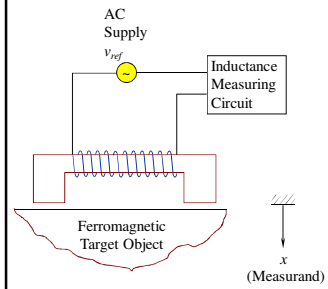
www.ubc.com

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

Self-Induction Transducers سنسور مجاورتی خود القاء

- ✓ این نوع از سنسورها بر اساس اصل خودالقایی کار می کنند (برخلاف سنسورهای با القای متقابل)
- ✓ سیم پیچ توسط یک منبع تغذیه AC با فرکانس بالا تحریک می شود. جریان عبوری از سیم پیچ ایجاد شار مغناطیسی می کند.
- ✓ ولتاژ ناشی از خودالقایی و جریان گذرنده به صورت زیر است:

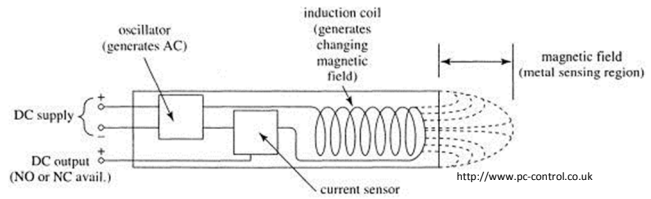
$$v_L = L\frac{di_L}{dt}$$



در این رابطه L ضریب خودالقایی است و با نزدیک شدن جسم فرومغناطیس اندازه آن تغییر می کند. با اندازه گیری تغییرضریب سلف در یک مدار مخصوص، میزان نزدیک شدن جسم مشخص می شود.

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

Self-Induction Transducers



- ✓ این نوع از سنسورها با توجه به قیمت ارزان، پایداری بالا و اندازه کوچک پرکاربردترین نوع سنسور هستند.
- ✓ جریان **DC** اعمال شده به اسیلاتور باعث ایجاد جریان **AC** در کویل می گردد. در حالت عادی یک میدان مغناطیسی بین کویل و بدنه سنسور برقرار است. با نزدیک شدن ماده رسانا به کویل امپدانس مغناطیسی مدار افزایش می یابد و جریان **AC** داخل آن کاهش می یابد، با افت جریان، خروجی سنسور فعال می شود.

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

Self-Induction Transducers

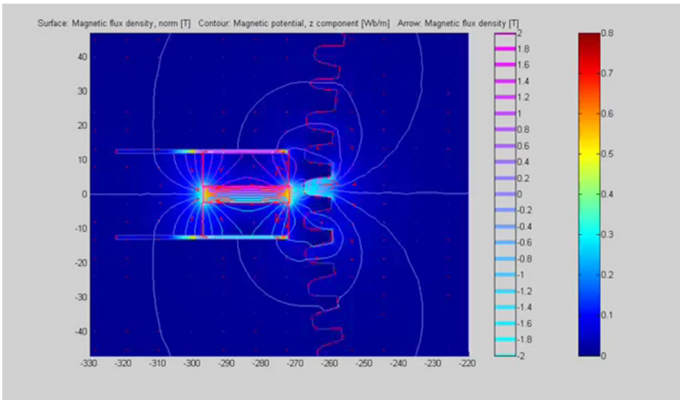
سنسور مجاورتی خود القاء

- ✓ این نوع از سنسورها نسبت به حضور فلزات در مجاورت خود حساس می باشند.
- ✓ ماهیت غیرتماسی این سنسورها باعث جلوگیری از خطرات مکانیکی و فرسایش در این تجهیزات می شود.
- ✓ این سنسورها می توانند در محیط های آلوده به موادی از قبیل روغن، گریس، خاک و ... به خوبی عمل کنند.

http://www.ctiautomation.net

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

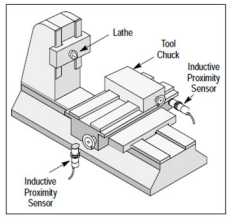
Self-Induction Transducers



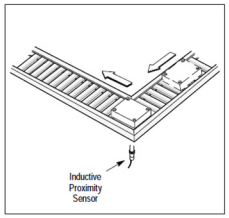
سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

- ✓ نمونه ای از کاربردهای سنسورهای مجاورتی

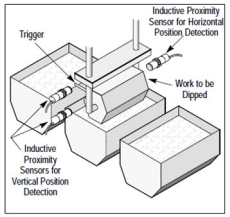
Machine Tools



Plating Line



Plating Line



www.ab.com/catalogs

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

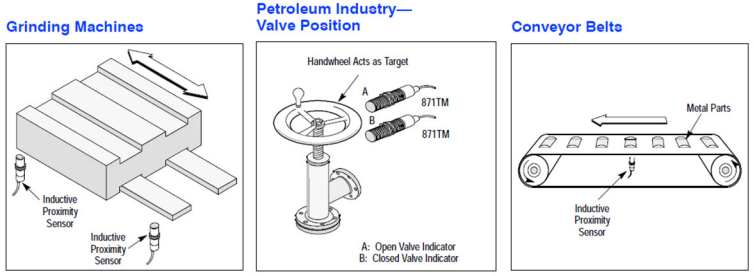
حسگرهای مغناطیس دائم:

- ✓ این دسته از حسگرها قادر به اندازه گیری سرعتهای خطی و دورانی می باشند.
- ✓ ویژگی اصلی این دسته از سنسورها وجود آهنربای دائمی در آنهاست که یک میدان ثابت و یکنواخت مغناطیسی ایجاد می کند.

- ✓ حرکت نسبی بین میدان مغناطیسی و یک هادی الکتریکی باعث ایجاد ولتاژی می شود که متناسب با سرعت حرکت هادی درون میدان مغناطیسی است (یعنی نرخ تغییر در شار مغناطیسی).
- ✓ در برخی از حسگرها میدان مغناطیسی دائم توسط جریان DC ایجاد می شود ولی با وجود آن به آنها حسگرهای مغناطیس دائم می گویند.

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

- ✓ نمونه ای از کاربردهای سنسورهای مجاورتی

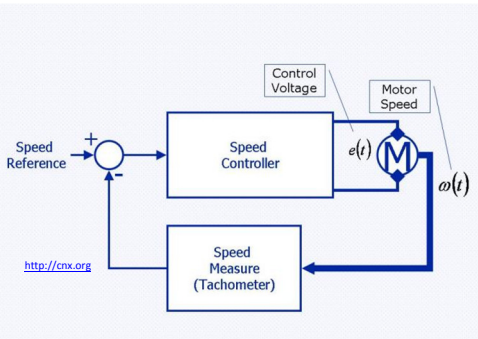


www.ab.com/catalogs

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

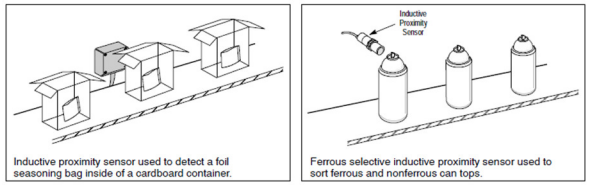
انواع حسگرهای مغناطیس دائم:

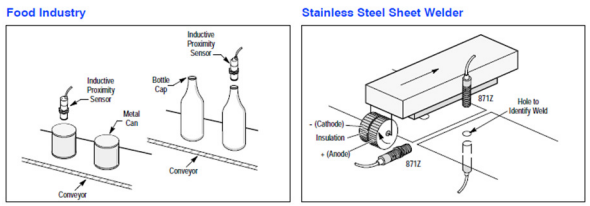
- تاکومتر DC (تاکوژنراتور)
- تاکومتر AC
- تاکومتر القایی AC



سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

- ✓ نمونه ای از کاربردهای سنسورهای مجاورتی





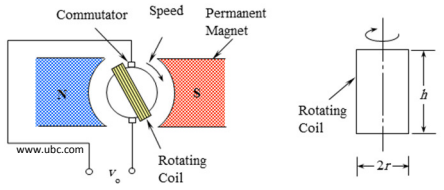
www.ab.com/catalogs

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

تاکومتر DC (دورانی):

- ✓ از دوران سیم پیچ درون میدان مغناطیسی دائم ولتاژی متناسب با سرعت دورانی ایجاد می-شود.
- ✓ برای کویلی با ارتفاع **h** و عرض **2r** با **n** دور و سرعت دورانی ω_c در میدان مغناطیسی باچگالی شار β ، با استفاده از قانون فارادی داریم:

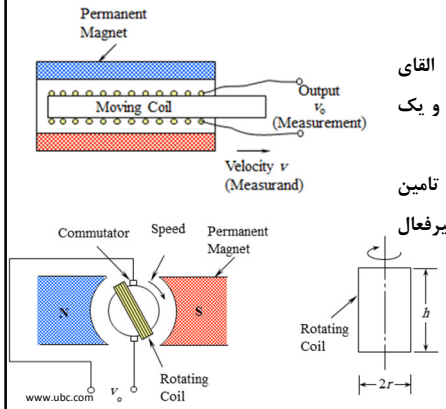
$$v_o = (2nhr\beta)\omega_c$$



سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

تاکومتر DC (تاکوژنراتور):

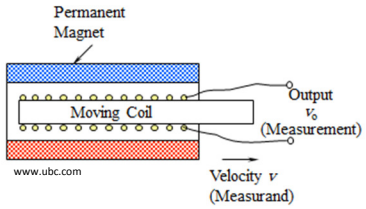
- ✓ در دو نوع خطی و دورانی موجود است.
- ✓ در این مبدلها از خاصیت القای الکترومغناطیس بین یک آهنربای دائم و یک سیم پیچ متحرک استفاده شده است.
- ✓ توان خروجی از مبدل از جسم متحرک تامین شده و بنابراین این مبدل از نوع غیرفعال است.



سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

تاکومتر DC (خطی):

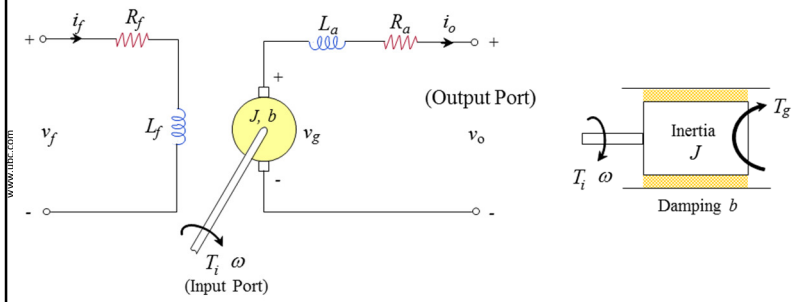
- ✓ هسته به جسمی که هدف اندازه گیری سرعت آن است متصل شده و در اثر حرکت سیم پیچ ولتاژی در آن القا می شود که با سرعت جسم متناسب است.



$$v_0 \propto v$$

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

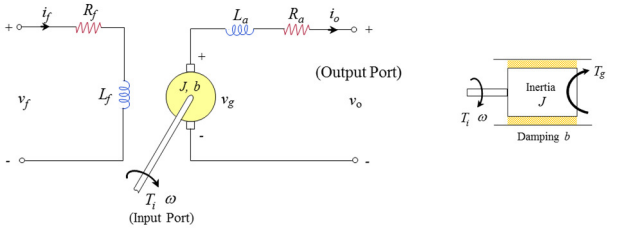
مدلسازی DC Tachometer:



- ✓ میدان مغناطیسی دائم با اعمال جریان مستقیم v_f ایجاد می شود. سرعت دورانی ω_i و گشتاور T_i دو ورودی سیستم هستند. ولتاژ خروجی v_oو جریان در مدار آرمیچر، دو خروجی سیستم هستند. هدف به دست آوردن تابع تبدیل سیستم است.

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

مدلسازی DC Tachometer:



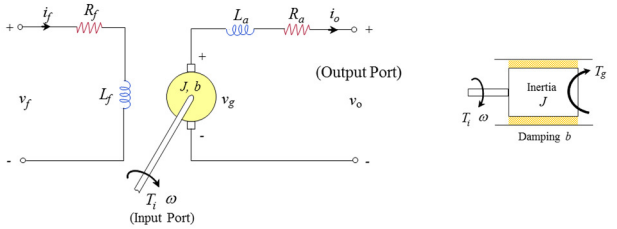
$$v_g = K' i_f \omega_i \quad \Rightarrow \quad v_g = K\omega_i$$

$$T_g = K' i_f i_o \quad \Rightarrow \quad T_g = K i_o$$

گشتاور لازم برای چرخش روتور

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

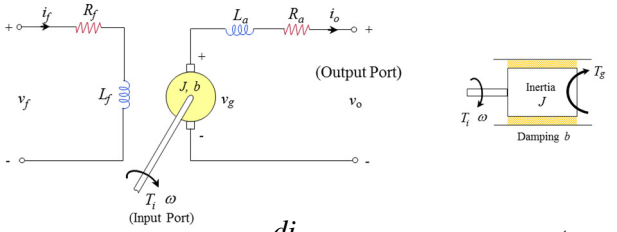
مدلسازی DC Tachometer:



$$\begin{bmatrix} V_o \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K + (R_a + sL_a)(b + sJ)/K & -(R_a + sL_a)/K \\ -(b + sJ)/K & 1/K \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \omega_i \\ T_i \end{pmatrix}$$

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

مدلسازی DC Tachometer:



$$v_o = v_g - R_a i_o - L_a \frac{di_o}{dt} \quad \Rightarrow \quad V_o = K\omega_i - (R_a + sL_a) I_o$$

$$T_i = J \frac{d\omega_i}{dt} + b\omega_i + T_g \quad \Rightarrow \quad K I_o = T_i - (b + sJ)\omega_i$$

Ti گشتاوری است که از جسم چرخان گرفته شده است و باعث اثرات نامطلوب بارگذاری می شود.

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

مدلسازی DC Tachometer:

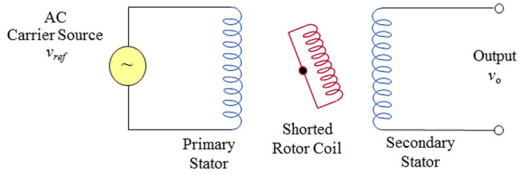
$$\begin{bmatrix} V_o \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K + (R_a + sL_a)(b + sJ)/K & -(R_a + sL_a)/K \\ -(b + sJ)/K & 1/K \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \omega_i \\ T_i \end{pmatrix}$$

- ورودی اصلی سیستم ω_i و خروجی مورد نظر V_o است.
- مولفه (1,1) ماتریس ضرایب نشان دهنده حساسیت سنسور است و افزایش آن مطلوبست.
- سایر عناصر، اثرات بارگذاری هستند و بایستی تا حد امکان کاهش یابند.
- حذف اثرات کوپلینگ (ارتباط یک ورودی با یک خروجی)
- رابطه استاتیکی بین ورودی و خروجی

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

تاکومتر القایی AC :

AC Induction Tachometer

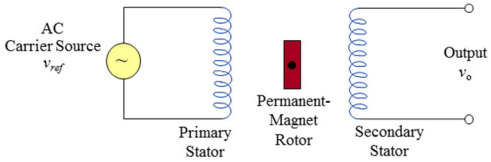


- ساختاری مشابه تاکومتر **AC** دارند با این تفاوت که یک سیم پیچ اتصال کوتاه به جای آهنربای دائم به عنوان روتور قرار گرفته است.
- اگر روتور ثابت باشد، عملکرد سیستم مانند یک ترانسفورماتور است، با چرخش روتور ولتاژ دیگری نیز بر روی ولتاژ فرکانس بالا سوار می شود که متناسب با سرعت چرخش روتور است.

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

تاکومتر AC :

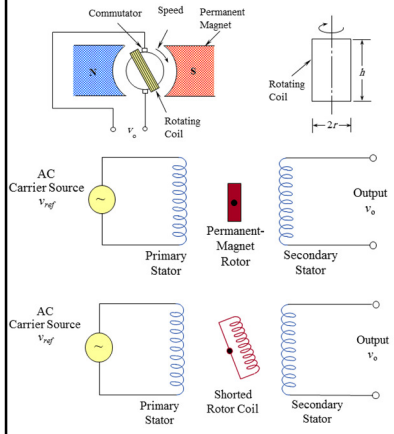
Permanent Magnet AC Tachometer



- در حالت سکون یا حرکت شبه استاتیک ولتاژ خروجی ثابت است.
- با حرکت دورانی روتور، ولتاژی متناسب با سرعت روتور ایجاد می گردد.
- به منظور تعیین سرعت دورانی، پیاده سازی (**Demodulation**) ولتاژ خروجی الزامی است.
- جهت حرکت با استفاده از زاویه فاز به دست می آید.

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

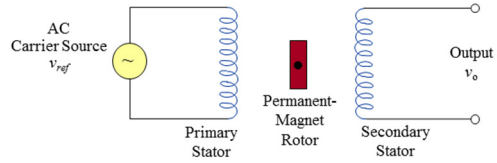
- مزیت اصلی تاکومترهای **AC** بر تاکومترهای **DC** عدم استفاده از جاروبک در آنهاست.
- وجود جاروبک باعث ایجاد پرشهایی در ولتاژ خروجی می شود که به آن نویز جاروبک گفته می شود. همچنین وجود جاروبک باعث اثر بارگذاری مکانیکی و احتمال پرشهای لحظه ای جاروبک از روی لغزنده در اثر اصطکاک می شود.



سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

تاکومتر AC :

Permanent Magnet AC Tachometer

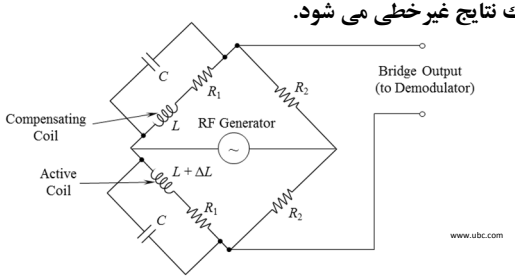


- برای فرکانسهای پایین (کمتر از 5 هرتز) فرکانس ولتاژ ورودی حدود 60 هرتز است.
- برای فرکانسهای میانه فرکانس ولتاژ ورودی حدود 400 هرتز مورد نیاز است.
- برای فرکانسهای بالا فرکانس ولتاژ ورودی در حدود 1500 هرتز مورد استفاده قرار می گیرد.

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

Eddy Current Transducer

- ✓ در حالتیکه هیچ شیئی در نزدیکی سنسور قرار ندارد پل در حالت بالانس قرار دارد.
- ✓ با تغییر ضریب القائی در سیم پیچ تعادل پل به هم خورده و سیگنال خروجی ایجاد می
- ✓ سیگنال خروجی پس از پیاده سازی برای تعیین جابجایی استفاده می شود.
- ✓ در جابجایی های بزرگ نتایج غیرخطی می شود.

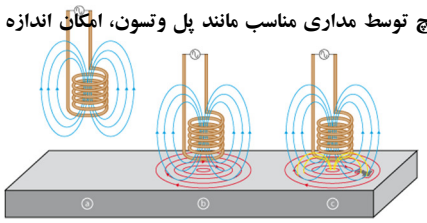


سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

حسگرهای مجاورتی جریان گردابی(Eddy Current Transducer):

اگر یک جریان متناوب به یک سیم پیچ اعمال گردد، یک میدان الکترومغناطیسی متناوب تولید می شود. اگر یک شی فلزی در مجاورت این میدان مغناطیسی متناوب قرار گیرد، در آن جریانهای القایی گردابی به وجود می آید. جریانهای القایی گردابی خود میدانی ایجاد می کنند که با میدان مغناطیسی ایجاد کننده آنها مخالفت می کند. در نتیجه امپدانس سیم پیچ و در ادامه دامنه جریان متناوب نیز تغییر می کند.

با اندازه گیری تغییر ضریب سلف سیم پیچ توسط مداری مناسب مانند پل وتسون، امکان اندازه گیری جابجایی از روی آن وجود دارد.



سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

Eddy Current Transducer

- Size: about 2 to 75 mm (0.079 to 3 in) in diameter, 20 to 40 mm (0.79 to 1.58 in) long
- Range: 0.25 to 30 mm (0.0098 to 1.2 in)
- Resolution: Up to 0.1 µm (3.9 µin)
- Bridge Circuit Frequency: 50 kHz to 10 MHz

❖ از این حسگر می توان برای آشکارسازی مواد فلزی، جابجایی، تشخیص عیب استفاده نمود.

❖ مزیت این سنسورها قیمت نسبتاً ارزان، اندازه کوچک و قابلیت اطمینان بالاست که به جابجاییهای کوچک بسیار حساسند.

سنسورهای آنالوگ برای اندازه گیری حرکت

برای ایجاد جریان گردابی نیاز به محیط رسانا است وکافی است بر روی جسم مورد نظر یک ورق نازک رسانا مانند ورق آلومینیمی چسبانده شود.

نوک حسگر شامل دو سیم پیچ یکسان است که دو بازوی پل وتسون را تشکیل می دهند. استفاده از سیم پیچ جبران ساز و سیم پیچ فعال برای حذف اثرات شرایط محیطی است.