حساسه ها و مبدلهای اندازه گیری در سیستمهای ابزار دقیق

تألیف:

دکتر حمید رضا تقی راد

تقدیم به پژوهشگرانِ کوشا و صدّیقِ
گروه روباتیک ارس

فصل اوّل ۶

مقدمه ۶

فصل اول: مقدمه ۹

۱-۱) مقدمه ۹
۱-۲) معرفی سیستم ابزار دقیق ۹
۱-۳) کاربردهای سیستمهای ابزار دقیق ۱۲
۱-۴) خطا در سیستمهای ابزار دقیق ۱۲
۱-۵) معرفی حساسه های مورد استفاده در مبدلهای صنعتی ۱۴
۱-۵-۲) ترانسفورمر دیفرانسیلی (DT) ۱۷
۱-۵-۳) کرنش سنج مقاومتی ۲۰
۱-۵-۴) حساسهٔ خازنی ۲۳
۱-۵-۵)حساسهٔ پیزوالکتریک ۲۶
۱-۵-۶) حساسهٔ پیزو مقاومتی ۲۸
۱-۵-۷) حساسهٔ فتو الکتریک ۲۹
۱-۵-۸) آشکارساز مقاومتی حرارت (RTD) ۳۲
۱-۵-۹) ترمیستورها ۳۳
۱-۵-۱۰) ترموکوپل ۳۴
۱-۵-۱۱)حساسه های زمان و فرکانس ۳۵
۱-۶) جمع بندی ۳۹
مسائل ۳۹
مراجع ۳۹

فصل دوّم ۴۰

مدارهای بهسازی ۴۰

فصل دوم: مدارهای بهسازی ۴۱

۲-۱) مقدمه ۴۱
۲-۱-۱) تبدیل سطح و بایاس سیگنال ۴۱
۲-۱-۲) خطی سازی ۴۱
۲-۱-۳)تبدیل سیگنال ۴۲
۲-۱-۴) فیلتر کردن و تطابق امپدانس ۴۳
۲-۱-۵)تأثیر بارگذاری ۴۴
۲-۲) مدارهای بهسازی غیر فعال ۴۵
۲-۱-۱) تقسیم ولتاژ ۴۶
۲-۱-۲) مدار پل ۴۷
۲-۱-۳) فیلترهای غیر فعال ۵۶
۲-۳) مدارهای فعال مورد استفاده در سیستمهای ابزار دقیق ۶۷
۲-۳-۱) تعقیب کنندهٔ ولتاژ ۶۷
۳-۳-۱) تقویت کنندهٔ معکوس ساز ۶۷
۲-۳-۳) تقویت کنندهٔ جمع کننده ۶۹
۲-۳-۴) تقویت کنندهٔ غیر معکوس ساز ۶۹
۲-۳-۵) تقویت کنندهٔ تفاضلی ۷۰
۲-۳-۶) مبدل ولتاژ به جریان ۷۳
۲-۳-۷) مبدل جریان به ولتاژ ۷۵
۲-۳-۹) مدار مشتق گیر ۷۶
۲-۴) راهنمای طراحی مدارهای بهسازی ۷۷
۲-۴-۱) تقسیم ولتاژ ..... Error! Bookmark not defined.
۲-۴-۲)مدار پل ..... Error! Bookmark not defined.
۲-۴-۳)فیلترهای غیر فعال ..... Error! Bookmark not defined.
۲-۵) جمع بندی ۸۱
مسائل ۸۱
مراجع ۸۱

فصل سوّم ۸۲

سیستمهای اندازه گیری نیرو، گشتاور و فشار ۸۲

فصل سوم: سیستمهای اندازه گیری نیرو، گشتاور و فشار ۸۳

۳-۱) مقدمه ۸۳
۳-۲) تنش و کرنش ۸۳
۳-۳) کرنش سنجها و تنش سنجها ۸۳

۳-۴) اندازه گیری نیرو ۸۳
۳-۵) اندازه گیری گشتاور ۸۳
۳-۶) اندازه گیری فشار ۸۳
۳-۷) جمع بندی ۸۳
مسائل ۸۳
مراجع ۸۳

فصل چهارم ۸۵

اندازه گیری موقعیت، سرعت و شتاب ۸۵

فصل چهارم: اندازه گیری موقعیت، سرعت و شتاب ۸۶

۴-۱) مقدمه ۸۶
۴-۲) روابط سینماتیکی ۸۶
۴-۳) اندازه گیری موقعیت ۸۶
۴-۴) اندازه گیری سرعت ۸۶
۴-۵) مبدلهای سایزمیک ۸۶
۴-۶) جمع بندی ۸۶
مسائل ۸۶
مراجع ۸۶

فصل پنجم ۸۸

اندازه گیری ۸۸

درجه حرارت ۸۸

فصل پنجم: اندازه گیری درجه حرارت ۸۹

۵-۱) مقدمه ۸۹
۵-۲) ترمومترهای مقاومتی ۸۹
۵-۳) ترمیستورها ۸۹
۵-۴) ترموکوپل ۸۹
۵-۵) دما سنجهای تشعشعی ۸۹
۵-۶) سایر حساسه های دما سنجی ۸۹

۵-۷) طراحی سیستمهای اندازه گیری درجه حرارت ۸۹
۵-۸) جمع بندی ۸۹
مسائل ۸۹
مراجع ۸۹

فصل ششم ۹۱

اندازه گیری ۹۱

جریان سیال ۹۱

فصل ششم: اندازه گیری جریان سیال ۹۲

6-1) مقدمه ۹۲
6-2) اندازه گیری سرعت جریان سیال ۹۲
6-3) دبی سنجی در سیستمهای بسته توسط اندازه گیری فشار ۹۲
6-4) دبی سنجی در سیستمهای نیمه بسته ۹۲
6-5) دبی سنجی در کانالهای باز توسط اندازه گیری اختلاف فشار ۹۲
6-6) دبی سنجی سیال تراکم پذیر در سیستمهای بسته ۹۲
6-7) سایر روشهای اندازه گیری جریان سیال ۹۲
6-8) جمع بندی ۹۲
مسائل ۹۲
مراجع ۹۲

ضمائم ۹۴

ضمیمهٔ الف: واحد های مهندسی ۹۵

ضمیمهٔ ب: جداول دماسنجهای مختلف ۹۵

B-1) جداول ترموکوپلها ۹۵
B-2) جداول ترمیستورها ۹۵

ضمیمهٔ ج: ۹۵

واژه نامه ۹۵

فهرست راهنما **۹۵**

فصل اوّل

مقدمه

فصل اول: مقدمه

۱-۱) مقدمه

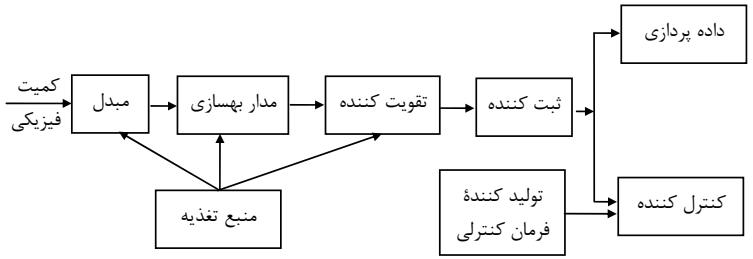
در این کتاب با مبانی سیستمهای ابزار دقیق آشنا می شویم. مفاد این کتاب به گونه ای تنظیم شده است که توانایی لازم به منظور انتخاب روش مناسب، حساسهٔ و مبدل مورد نیاز و مدارهای بهسازی لازم برای اندازه گیری کمیات مختلف و متداول مورد نیاز سیستمهای کنترل صنعتی ایجاد شود. این کمیات شامل نیرو، گشتاور، فشار، موقعیت، سرعت، شتاب درجه حرارت و دبی جریان سیال می باشد که طی فصول دوم تا ششم بررسی می گردند. در این فصل ابتدا به معرفی سیستمهای ابزار دقیق و کاربرد آن در فرآیندهای صنعتی پرداخته و موضوع خطای اندازه گیری تشریح می شود. سپس حساسه های مختلف مورد استفاده در سیستمهای ابزار دقیق معرفی شده و نحوه و محدودیتهای کاربردی آنها به صورت مختصر بررسی می گردد.

۱-۲) معرفی سیستم ابزار دقیق

به صورت عمومی یک سیستم ابزار دقیق شامل بخشهایی است که در شکل (۱-۱) نمایش داده شده است. در این نمایش مبدل[1] وسیله ایست که با استفاده از یک یا چند نوع حساسه کمیت فیزیکی مورد اندازه گیری مانند سرعت، نیرو یا درجه حرارت را به کمیتی دیگر و غالباً الکتریکی همانند مقاومت الکتریکی، ولتاژ یا جریان تبدیل می کند. به عنوان مثال یک کرنش سنج[2] کرنش یا تغییر طول نسبی را در یک جسم به تغییر مقاومت تبدیل نموده، که آنرا براحتی توسط مداری الکتریکی می توان به تغییر ولتاژ تبدیل نمود. نوع این عملیات در قسمتی از سیستم ابزار دقیق صورت می پذیرد که در شکل (۱-۱) به مدار بهسازی[3] نامیده شده است. از آنجا که بدین ترتیب کرنش ایجاد شده در یک جسم به ولتاژ الکتریکی تبدیل شده است، براحتی می توان آنرا اندازه گیری نموده، مورد نمایش بصری قرار داد، یا آنرا به ثبت کننده های آنالوگ یا دیجیتال منتقل نمود و به منظور مونیتورینگ یا کنترل فرآیند مورد نظر مورد استفاده قرار داد.

---

[1] Transducer
[2] Strain gauge
[3] Signal conditioner



شکل (۱-۱) بلوک دیاگرام عمومی یک سیستم ابزار دقیق

با توجه به تناسب کمیت فیزیکی مورد اندازه گیری و ولتاژ تقویت شدهٔ خروجی سیستم، می توان با انجام عملیات کالیبراسیون ضریب تناسب (ضریب حساسیت) در سیستم ابزار دقیق را تعیین نمود. بدین ترتیب اجزاء عمومی یک سیستم ابزار دقیق به شرح زیر می باشند.

– **منبع تغذیه**: انرژی الکتریکی لازم برای تحریک مبدل، مدار بهسازی و تقویت کننده را تولید می کند. با توجه به نوع مبدل و مدار بهسازی می توان از منابع تغذیهٔ DC یا AC استفاده نمود.

– **مبدل**: این وسیله کمیت فیزیکی مورد اندازه گیری را به کمیت الکتریکی تبدیل می کند. انواع حساسه های بکار گرفته شده در مبدلهای صنعتی، در ادامهٔ این فصل معرفی می شوند.

– **مدار بهسازی**: این مدارهای الکتریکی وظیفهٔ تبدیل، جبرانسازی و تغییر سیگنال خروجی از مبدل را به کمیتی الکتریکی که قابلیت استفادهٔ مناسب در سایر بخشهای سیستم را داشته باشد به عهده دارد. به عنوان مثال پل وتسون[1] برای تبدیل مقاومت الکتریکی در کرنش سنجها و سایر حساسه های مقاومتی به ولتاژ الکتریکی استفاده می شود. فیلترها، جبرانسازها، مشتق گیرها و انتگرال گیرها، مدولاتورها و دمدولاتورها انواع دیگری از مدارهای بهسازی می باشند.

– **تقویت کننده**: این بخش از سیستم زمانی بکار گرفته می شود، که ولتاژ خروجی مبدل بقدر کافی قوی نباشد. گاهاً این مدار با مدار بهسازی ترکیب می شود و در غالب یک بلوک نیز در سیستم ابزار دقیق قابل نمایش است. بهرهٔ تقویت کننده های صنعتی مورد استفاده در سیستمهای ابزار دقیق بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ بوده و ضریب تقویت متناسب با نیاز سایر اجزاء سیستم ابزار دقیق به منظور همخوانی لازم بین اجزاء انتخاب می شود.

---

[1] Wheatstone Bridge

– **ثبت کننده**: وسایل اندازه گیری ولتاژ الکتریکی که کمیت مورد اندازه گیری را به نحو مقتضی در معرض نمایش کاربران قرار می دهند به عنوان ثبت کننده در سیستم ابزار دقیق شناخته می شوند. انواع ولتمترهای آنالوگ و دیجیتال، اسیلوسکوپها، اسیلوگرافها، ثبت کننده های مغناطیسی، مبدلهای A/D و ثبت کننده های دیجیتالی و یا حافظه های کامپیوتری در سیستمهای ابزار دقیق صنعتی مورد استفاده واقع می شوند.

– **سیستم داده پردازی:** به عنوان عامل اصلی تبدیل اطلاعات ولتاژ خروجی مبدلها به اطلاعاتی بر حسب کمیت مورد نظر مورد بهره برداری قرار می گیرد. اهمیت این نوع سیستمها در زمانی که تعداد زیادی کمیت فیزیکی یک فرآیند به صورت همزمان مورد اندازه گیری واقع می شوند و ضبط و استفاده به موقع آنها از عهدهٔ کاربران خارج باشد، بیشتر روشن است. به عنوان مثال کمیتهای مختلفی که در حین تست جاده ای یک خودرو مورد اندازه گیری واقع می شود، معمولاً خارج از توان سیستمهای دستی برای ضبط و برازش می باشد، فلذا با استفاده از D/A های صنعتی کلیهٔ اطلاعات بدست آمده در حین یک آزمایش در داخل کامپیوتر ذخیره شده و توسط نرم افزار مناسب مورد برازش قرار می گیرد.بدین ترتیب امکان بررسی و نمایش از کیفیت عملکرد خودرو در طی انجام تستهای عملکردی وجود خواهد داشت.

– **کنترل کنندهٔ فرآیند**: کنترل کننده در سیستمهای ابزار دقیق نقش نظارت و تنظیم فرآیند را به عهده دارد. سیگنال الکتریکی حاصل از اندازه گیری یک یا چند خروجی یک فرآیند متناسب با مقدار کمیت در آن فرایند بوده که مورد مونیتورینگ و نظارت مستمر کاربر قرار می گیرد. با مقایسهٔ میزان کمیتهای مورد نظر در فرآیند با مقادیر مطلوب آنها، خطای عملکردی سیستم تعیین می شود. اگر خطای عملکردی تنها به رؤیت کاربران برسد، سیستم ابزار دقیق شامل سیستم مونیتورینگتنها بوده و تنظیم فرآیند توسط مهندسین ابزار دقیق فرآیند و به صورت دستی صورت می گیرد. در حالیکه از خطای عملکرد سیستم که به صورت ولتاژ الکتریکی تبدیل شده است می توان در کنترل کننده های خودکار بهره گیری نموده و با استفاده از الگوریتم کنترلی مناسب که به صورت سخت افزاری یا نرم افزاری در این بخش تعبیه شده است، مبادرت به تنظیم فرمان ورودی فرآیند نمود. به عنوان مثال یک کورهٔ القائی عملیات حرارتی را در نظر بگیرید، که بایستی یک پروفیل حرارتی خاصی را برای انجام عملیات حرارتی فولاد تعقیب نماید. کنترل کننده با دریافت این پروفیل حرارتی از یک سو و اطلاعات دقیق حرارت کوره از سوی دیگر، به صورت روی خط[1]، مبادرت به تعیین سیگنال خطای عملکرد نموده و توسط این سیگنال خطا جریان ورودی کوره را تنظیم می نماید. و بدین ترتیب

online [1]

در صورتی که الگوریتم کنترلی خوب و سریع عمل نماید پروفیل حرارتی مورد نظر در کوره ایجاد خواهد شد.

۱-۳) کاربردهای سیستمهای ابزار دقیق

با توجه به ماهیت سیستمهای ابزاردقیق به منظور سه کاربرد عمده در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند:

-**تحلیل مهندسی**: از سیستم ابزار دقیق به منظور تحلیل مهندسی عملکرد یک ماشین، سیستم، یا فرآیند صنعتی به صورت کلی و یا بررسی عملکرد اجزاء یا ساختار آن می توان بهره جست. این فاز تحلیل مهندسی که عملاً به صورت تجربی عملکرد یک سیستم را تعیین می کند همواره در مرحله نمونه سازی یک محصول جدید راهگشای مهندسین طراح در انجام بهینه سازی طراحی می باشد. همچنین در برخی موارد مدل ریاضی و کامپیوتری از سیستم مورد نظر توسط اطلاعات اندازه گیری بر روی سیستم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و در صورت تأیید صحت مدل، بسیاری از بهینه سازیها قبل از اجرا در مرحلهٔ نمونه سازی، بر روی مدل سبیه سازی شدهٔ سیستم صورت می پذیرد. بدین ترتیب آزمایشات مختلفی که بر روی یک محصول جدید به منظور اطمینان از عملکرد آن صورت می گیرد توسط سیستمهای مجهز اندازه گیری و ابزار دقیق در آزمایشگاه های مربوطه صورت می گیرد. همچنین در سیستمهایی که اطمینان از عملکرد سیستم و امنیت کاربر یکی از پارامترهای اصلی مورد نظر باشد، می بایست کمیات مهمی که این امنیت را ایجاد می کنند مورد بررسی و تحلیل دقیق مهندسی توسط سیستمهای ابزار دقیق قرار گیرد.

۱-۴) خطا در سیستمهای ابزار دقیق

خطا به صورت کلی به فاصله بین مقدار اندازه گیری شده و مقدار واقعی اطلاق می شود. وجود خطای اندازه گیری در هر سیستم عملی و صنعتی غیر قابل اجتناب بوده ولی با پیشرفت تکنولوژی میزان خطا کاهش و تکرار پذیری سیستمهای ابزار دقیق افزایش یافته اند. در هر سیستم اندازه گیری معمولا درصد خطای سیستم توسط سازندگان مورد آزمایش قرار گرفته و ارائه می شود. به عنوان مثال اگر درصد خطای یک سیستم ±2% معرفی شده باشد، انتظار می رود مقادیر اندازه گیری شده در باندی با اختلاف تنها ±2% مقادیر واقعی قرار گیرند. معمولا خطای یک سیستم ابزار دقیق از ترکیب خطاهای مبدل، خطاهای مدارات بهسازی،

خطاهای تقویت کننده و خطای ثبات تشکیل می شود. که این خطای نهایی از فرم دو خطاهای اجزاء محاسبه می شود یعنی :

$$e_a = \sqrt{e_t^2 + e_{sc}^2 + e_a^2 + e_R^2} \qquad (۱-۱)$$

که در آن e_a : خطای ترکیب

e_t : خطای مبدل

e_{sc} : خطای مدارات بهسازی

e_a : خطای تقویت کننده

e_R : خطای ثبات

می باشد. معمولا خطای اندازه گیری در آزمایشات متعدد کالیبراسیون توسط سازندگان تعیین می شود. به عنوان مثال یک نمونه از آزمایشات کالیبراسیون یک المان اندازه گیری در یک سیستم ابزار دقیق را مطابق شکل (۱-۲) در نظر بگیرید قسمت اصلی نقاط اندازه گیری شده غالبا توسط یک خط راست قابل تقریب است. شیب و offset این خط را به صورت عملی با استفاده از تقریب حداقل مربعات خطا[1] می توان تعیین نمود.

به هر حال با فیت کردن یک خط راست در قسمتهای اولیه آزمایش کالیبراسیون و توان بهره این المان یا "ضریب حساسیت" S آنرا تعیین نمود.

$$S = \frac{\Delta Q_0}{\Delta Q_i} \qquad (۲-۱)$$

S را بهره کالیبراسیون یا ضریب حساسیت وسیله اندازه گیری می نامیم. در بسیاری از مواقع خط رسم شده از مبدأ عبور ننموده و دارای یک Offset Z_0 می باشد که در شکل (۱-۴) نشان داده شده است. بدین ترتیب :

$$Q_0 = SQ_i + Z_0 \qquad (۳-۱)$$

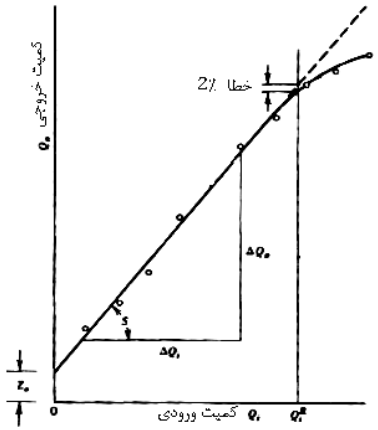
در بسیاری از سیستمها ابزار دقیق قابلیت تنظیم این Offset وجود داشته و معمولاً توسط مدارات بهسازی این عملیات به صورت تجربی صورت می پذیرد. لذا می توان خروجی این وسیله اندازه گیری را به صورت زیر تعیین نمود:

$$Q_0 = SQ_i \qquad (۴-۱)$$

برای مقادیر بزرگ ورودی حساسه معمولا پاسخ سیستم از حالت خطی خارج می شود اگر این اختلاف بیش از ۱٪ یا ۲ ٪ گردد دیگر محدوده خطی حساسه معتبر نبوده و ناحیه اعتبار نتایج

[1] Least Square approximation

این وسیله اندازه گیری مشخص می شود. این ناحیه توسط خطی که با علامت Q_i^R نمایش داده شده است معین گردیده است.



شکل(۱-۲) پاسخ ورودی-خروجی یک المان اندازه گیری دریک ازمایش کالیبراسیون

از طرف دیگر معمولا مبدلها برای تعیین مشخصات فیزیکی یک کمیت مورد استفاده قرار می گیرند به عنوان مثال فشار، موقعیت یا سرعت از این انواع می باشند. اما عملکرد یک مبدل نسبت به کمیت فیزیکی دیگری که مورد اندازه گیری نیست، نیز می تواند تغییر کند. به عنوان مثال درجه حرارت یا شتاب می تواند در بهرهٔ حساسیت یک سنسور تاثیر مستقیم بگذارد. این تاثیر گذاری که در اثر عوامل محیطی یا شرایط عملکرد سیستم به سیستم اندازه گیری تحمیل می شود، نیز در فرم کلی به صورت خطای اندازه گیری تعبیر می شود.

انتخاب مبدل و سیستم ابزار دقیق مناسب برای هر کاربرد بایستی با توجه مصالحهٔ بین افت کل مورد نیاز و قیمت سنسور صورت گیرد. خطای معمول و مجاز در سیستمهای صنعتی با توجه به ارزش اقتصادی سنسورها بین ۲٪ تا ۵٪ می باشد.

۱-۵) معرفی حساسه های مورد استفاده در مبدلهای صنعتی

مبدلها وسایل الکترو مکانیکی می باشند که یک کمیت مکانیکی همانند نیرو یا جابجایی را به یک کمیت الکتریکی تبدیل می کنند که این کمیت قابل مشاهده می باشد. عنصر اصلی تشکیل دهنده یک مبدل حساسه آن می باشد که به عنوان مثال در یک مبدل تبدیل کننده

تنش به تغییر مقاومت، کرنش سنج المان اصلی این مبدل حساسه آن می باشد و مختصات اصلی مبدل نیرو به ولتاژ را این حساسه تعین می کند. حساسه های مختلفی در مبدلهای صنعتی مورد استفاده واقع می شوند که در این بخش به صورت اجمالی به بیان برخی از آنها از جمله پتانسیومترها ترانسفورمرهای دیفرنسیالی، کرنش سنجها، سنسورهای خازنی، پیزو الکتریکها، کریستالهای مقاومتی پیزو، ترمیستورها، ترموکوپلها و سنسور های زمان و فرکانس می پردازیم.

۱-۵-۱) پتانسیومترها :

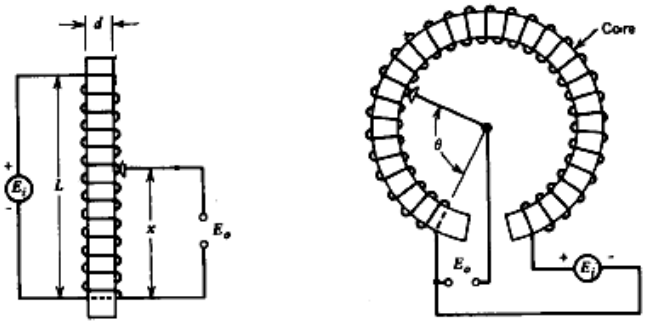
ساده ترین شکل پتانسیومتر از یک مقاومت به همراه یک جاروبک لغزشی تشکیل شده است، که در شکل (۱-۳) به نمایش گذاشته شده است. این حساسه از یک مقاومت به طول l که به منبع ولتاژ E_i متصل است تشکیل شده است، یک جاروبک در امتداد طول این حساسه حرکت کرده و رابطه ولتاژ خروجی حساسه E_0 و طول حرکت جاروبک با توجه به رابطه تقسیم ولتاژ به صورت زیر است.

$$E_0 = \frac{x}{l} \qquad \text{یا} \qquad x = \frac{E_0}{E_i} l \qquad (۵-۱)$$

بدین ترتیب برای اندازه گیری جابجایی خطی x می توان از این حساسه استفاده نمود. به منظور کاهش میزان اتلاف انرژی در این نوع حساسه از سیم هایی با مقاومت بالا که در هسته ای تابیده شده اند، استفاده می شود. اگر از هستهٔ استوانه ای استفاده شود می توان از این حساسه برای اندازه گیری حرکت زاویه ای استفاده نمود. مقاومت کل پتانسیومترهای مقاومتی بین 10 تا 10^6 اهم بوده و بستگی به طول، قطر هسته و مواد سیم مقاومتی دارند. با توجه به نحوه تابیدن سیم مقاومتی به دور هسته تغییرات مشاهده شده در مقاومت این حساسه به صورت پله ای مشاهده می شود که این موضوع رزولوشن حساسه را محدود به $\frac{L}{n}$ می کند L طول هسته و n تعداد حلقه های تابیده شده به دور هسته حساسه می باشد. این رزولوشن در عمل بین ۰/۰۵٪ تا ۱٪ معمول می باشد و با افزایش تعداد چرخشها و افزایش قطر هسته این رزولوشن کاهش می یابد.

محدوده عملکرد طولی پتانسیومترها مستقیما به طول پتانسیومتر مربوط می باشند. پتانسیومترهای صنعتی به طول یک متر نیز وجود دارند. برای پتانسیومترهای زاویه ای، محدوده چرخش زاویه ای را می توان با تبدیل هسته پتانسیومتر به فرم هلیکال تا حتی ۲۰ دور افزایش داد. در پتانسیومترهای مدرن به جای استفاده از سیم های مقاومتی از یک نوع پلاستیک هادی استفاده می شود، که دارای مقاومت الکتریکی بسیار زیادی است. بدین ترتیب

بدون نیاز به چرخش سیم حول یک هسته می توان با رزولوشن نامحدود و نویز کم و عمر بسیار بیشتر را با استفاده از اصل تقسیم ولتاژ در این حساسه استفاده نمود. مقاومت ۵۰ تا ۱۰۰ Ω/mm را می توان از انواع این نوع پلاستیکهای هادی بدست آورد. از طرف دیگر پتانسیومترهایی با سیم های مقاومتی بسیار نازک نیز ساخته می شوند که تا رزولوشن $1\ \mu m$ نیز به صورت تجاری وجود دارند.

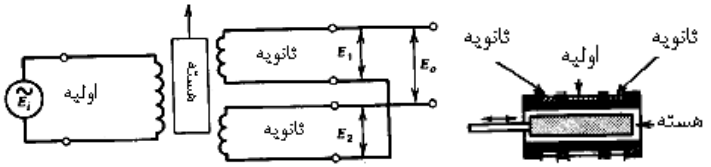


شکل(۱-۳) پتانسیومترهای مقاومتی برای اندازه گیری جابجایی خطی و زاویه ای

یکی دیگر از محدودیتهای این حساسه وجود نویز اندازه گیری در زمان حرکت جاروبک از یک سیم بر روی سیم دیگر است میزان نویز را در صورتی که سطح سیم های مقاومتی صاف و تمیز بوده و هیچگونه زنگ زدگی در آنها مشاهده نشود کاهش می یابد. با توجه به تماس مستقیم جاروبک و سیم، عمر پتانسیومترها نیز معمولا محدود بوده و تا ۲ میلیون سیکل حرکتی را در پتانسیومترهای سیم مقاومتی و ۱۰ میلیون سیکل حرکت را در پتانسیومترهای پلاستیک هادی می توان انتظار داشت. با توجه به این محدودیتها و رزولوشن آن از پتانسیومترها معمولا برای اندازه گیری جابجایی با طول بیش از 10^{mn} یا ۱۵ درجه استفاده می شود. از لحاظ قیمت نیز پتانسیومترها نسبتا ارزان قیمت بوده و نحوه استفاده از آنها بسیار آسان است چرا که با اضافه نموده یک منبع ولتاژ و یک ولتمتر می توان یک سیستم کامل اندازه گیری را توسط آن ایجاد نمود. محدودیت اصلی آن وجود نویز، استهلاک جاروبک و محدودیت پاسخ فرکانسی آن می باشد که در اندازه گیری های دینامیکی ایجاد اشکال می نماید.

۱-۵-۲) ترانسفورمر دیفرانسیلی (DT)

از ترانسفورمر دیفرانسیلی که بر اساس اصل اندوکتانس متغیر بنا شده است نیز برای اندازه گیری جابجائی استفاده می شود. یکی از مهمترین انواع ترانسفورمرهای دیفرانسیلی LVDT[1] می باشد. ساختار اصلی یک LVDT در شکل (۱-۴) نمایش داده شده است. این وسیله اندازه گیری از سه سیم پیچ متقارن که بر روی یک بوبین پیچیده شده اند ساخته شده است. هسته مغناطیسی در داخل بوبین و بدون تماس با هیچ سطحی حرکت می کند و بدین ترتیب یک مسیر برای بسته شدن فلوی مغناطیسی ایجاد می کند. این هسته مغناطیسی اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ اولیه و دو سیم پیچ ثانویه را کنترل می کند.



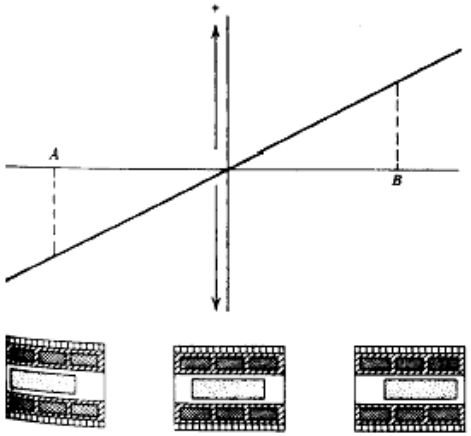
شکل(۴-۱) a)مقطعی از یک LVDT b)شماتیک دیاگرام مدار الکتریکیLVDT

با اعمال یک ولتاژ تغذیه AC در مدار اولیه ولتاژ القائی در هر دو سیم پیچ ثانویه، در صورتیکه هسته مغناطیسی دقیقا در مرکز قرار گیرد، ولتاژهای القائی ایجاد شده در دو سیم پیچ برابر بوده و ولتاژ خروجی E_0 صفر خواهد بود. اگر هسته مغناطیسی را از مرکز دور کنیم برابری اندوکتانس مغناطیسی دو سیم پیچ ثانویه تغییر کرده و ولتاژ خروجی E_0 متناسب با جابجایی هسته ایجاد می شود. رابطه خطی بین جابجایی هسته و ولتاژ خروجی در محدوده عملکرد LVDT عمل می نماید. فرکانس ولتاژ تغذیه LVDT می تواند بین ۵۰ تا ۲۵۰۰۰ هرتز تغییر کند برای استفاده LVDT در اندازه گیری حرکتهای دینامیکی فرکانس تغذیه LVDT بایستی ده برابر بزرگترین فرکانس سیگنال مورد اندازه گیری باشد.

بهترین حساسیت این وسیله اندازه گیری با فرکانس ۱-۵KHz و دامنه ۵-۱۵ Vats بدست می آید. توان مورد استفاده کمتر از ۱W است. ضریب حساسیت LVDT هاس نمونه بین $0.02-0.2\,{}^{V}/_{mm}$ تغییر می کند ضریب حساسیت بالا تر متعلق به LVDT هایی با محدوده

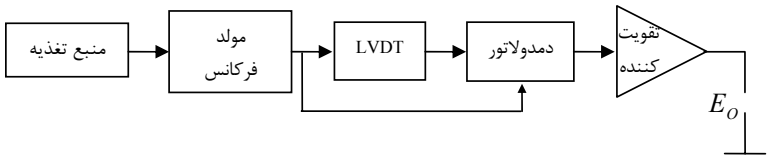
[1] Liner variable Differential Trans former

اندازه گیری کوچک و محدود به $\pm 2mm$ می باشد در صورتیکه با افزایش دامنه حرکت به $\pm 150mm$ این ضریب حساسیت به حداقل خود تنزل می کند.



شکل (۱-۵) نحوهٔ تغییر ولتاژ خروجی LVDT با موقعیت هسته

با توجه به نیاز این حساسه به منبع تغذیه DC با مشخصات ویژه نیاز به مدارات بهسازی سیگنال در این نوع وسیله اندازه گیری قطعی است. شماتیک یک نمونه از مدار بهسازی سیگنال ورودی و خروجی LVDT در شکل (۱-۸) نمایش داده شده است.

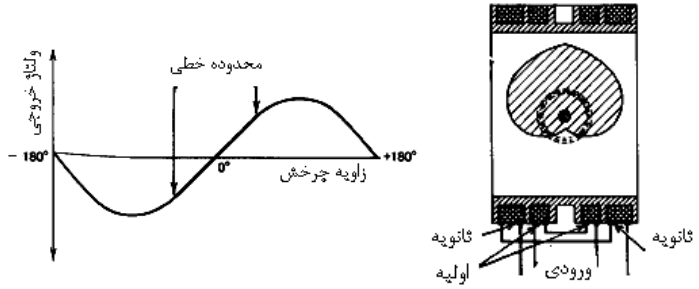


شکل(۱-۶) بلوک دیاگرام مدار بهسازی یک LVDT نمونه

در این مدار علاوه بر ایجاد ولتاژ تغذیه AC با فرکانس مشخص، خروجی LVDT که یک سیگنال AC می باشد، نیز توسط دمدولاتور به ولتاژ DC تبدیل شده است و توسط تقویت کننده این مدار به سطح ولتاژ مورد نیاز می رسد. معمولا این مدار بهسازی نیز همراه حساسه و به صورت مدار الکترونیکی در مجاورت حساسه در اختیار کاربر قرار می گیرد. در این

حالت حساسه DCDT[1] نامیده می شود. معمولا امپدانس خروجی این حساسه نسبتا کم و حدود ۱۰۰ Ω می باشد.

از همین اصل برای اندازه گیری زاویه ای نیز استفاده می شود. شکل (۱-۷) نمائی از یک RVDT[2] را نمایش می دهد که در آن به جای حرکت خطی یک هسته مغناطیسی از حرکت دورانی یک هسته مغناطیسی که به شکل قلب طراحی شده است استفاده می شود. پروفیل هسته مغناطیسی در ایجاد بالانس اندوکتانس مغانطیسی در چرخشهای زاویه ای محدود بسیار موثر است و بدقت طراحی می شود. علیرغم امکان حرکت زاویه ای کامل محور چرخش در RVDT و بازه خطی بودن خروجی محدود به $\pm 40^\circ$ می باشد. خروجی RVDT در یک چرخش کامل در شکل (۱-۷) نمایش داده شده است. خطی بودن معمول RVDT در بازه $\pm 40^\circ$ حدود ۰٫۵٪ می باشد در صورتیکه بازه زاویه ای را به $\pm 5^\circ$ تقلیل دهیم خطی بودن آن به ۰٫۱٪ بهبود می یابد.



شکل (۱-۷) a)مقطعی از یک RVDT b)سیگنال خروجی RVDT در یک چرخش کامل محور ورودی

در مقایسه با پتانسیومترها کلیه اقسام (DT) ترانسفورمرهای دیفرانسیلی دارای مزیتهای بسیاری می باشند. به علت عدم تماس هسته با بدنه در این حساسه، اصطکاک و مشکلات ناشی از آن حذف شده اند و این حساسه دارای رزولوشن بینهایت می باشد. همچنین هیچگونه هیسترزیس در این حساسه دیده نمی شود.

[1] Direct Current Diffrentiel Trans former
[2] Rotary Variable Diffrentiel Trans former

۱-۵-۳) کرنش سنج مقاومتی

کرنش سنجهای مقاومتی لایه های نازک سیمهای مقاومتی می باشند که بر روی سطوح اجزای یک ماشین یا سازه توسط چسبهای مخصوصی نصب می شوند. در صورت اعمال نیرو به این سطح، کرنش در آن بوجود آمده و به کرنش سنج نیز انتقال می یابد. در اثر کرنش اعمال شده به کرنش سنج طول سیمهای مقاومتی افزایس (در صورت کشش) و یا کاهش (در صورت فشار) می یابند. کرنش سنجها این ارتباط خطی بین نیروی اعمالی و تغییر مقاومت خود را در محدوده عملکرد خود بروز می دهند. برای درک ایده عملکرد کرنش سنج به رابطه مقاومت یک هادی فلزی توجه کنید:

$$R = \frac{\rho L}{A} \qquad (۱-۶)$$

که در آن ρ : مقاومت مخصوص فلز

L : طول هادی فلزی

A : سطح مقطع هادی فلزی میباشد

بدین ترتیب تغییرات مقاومت در یک مقاومت هادی فلزی از مشتق رابطه فوق تعیین می شود:

$$\frac{dR}{R} = \frac{1}{R}\left(\frac{d\rho L}{A} + \frac{dL\rho}{A} - \frac{dA}{A^2}\rho L\right)$$

$$= \frac{A}{\rho L}\left(\frac{d\rho L}{A} + \frac{dL\rho}{A} - \frac{dA}{A^2}\rho L\right)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \qquad (۱-۷)$$

که در آن $d\rho$ تغییرات خواص مقاومتی ماده، dL تغییرات طول و dA تغییرات سطح مقطع هادی مقاومتی را نمایش می دهد. از علم مقاومت مصالح تعریف کرنش را به صورت زیر تعبیر می کنیم.

$$\varepsilon_a = \frac{dL}{L} \qquad (۱-۸)$$

در صورتیکه نیروی کششی در طول یک فلز عمل نماید طول آن افزایش یافته اما سطح مقطع آن کاهش می یابد. لذا اگر تنش طولی را ε_a بنامیم و تنش عرضی را ε_t بنامیم با استفاده از رابطه پوآسون می توان نوشت :

$$\varepsilon_t = -\nu\varepsilon_a = -\nu\frac{dL}{L} \qquad (۱-۹)$$

که در آن ν نسبت پوآسون در فلزات است که مقدار آن حدود ۰/۳ می باشد. بدین ترتیب اگر سیم مقاومتی قبل از اعمال تنش دارای قطر d_0 باشد پس از اعمال آن به میزان فوق از قطر آن کاهش می یابد یا به عبارت دیگر:

$$d_t = d_0(1-\nu\frac{dL}{L}) \qquad (۱۰-۱)$$

لذا تغییرات سطح مقطع از رابطه زیر تعیین می شود :

$$A=\frac{\pi D^2}{4}$$

$$\frac{dA}{A}=\frac{1}{A}(\frac{2\pi D}{4}dD)=\frac{2dD}{D}$$

اما

$$\frac{dD}{D}=\frac{d_f-d_0}{d_0}=-\nu\frac{dL}{L}$$

لذا

$$\frac{dA}{A}=-2\nu\frac{dL}{L} \qquad (۱۱-۱)$$

لذا در نهایت خواهیم داشت:

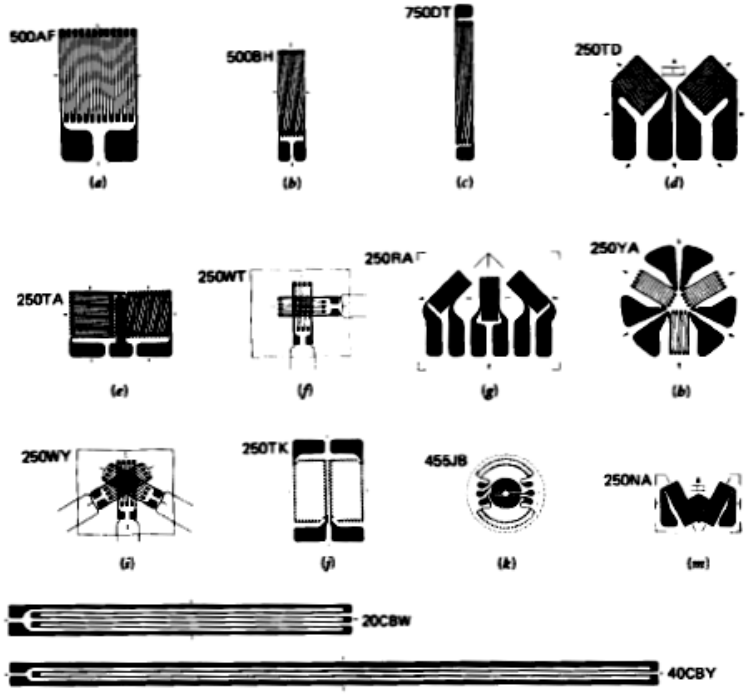
$$\frac{dR}{R}=\frac{d\rho}{\rho}+\frac{dL}{L}(1+2\nu) \qquad (۱۲-۱)$$

و ضریب حساسیت کرنش سنج عبارت است از:

$$S_A=\frac{dR/R}{\varepsilon_a}=\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_A}+(1+2\nu) \qquad (۱۳-۱)$$

با توجه به اینکه $1+2\nu\cong 1.6$ است و در آزمایشات مختلف برروی کرنش سنجهای صنعتی ضریب حساسیت بین ۲ و ۴ می باشد. مشخص می شود که در اثر کشش لایه های نازک سیمهای مقاومتی در یک کرنش سنج، خواص مقاومتی آن تحت تنش تغییر می کند. که این به دلیل افزایش الکترونهای آزاد سیم مقاومتی و اجازه حرکت آزادانه آن در اثر اعمال تنش می باشد. کرنش سنجها از مواد خاصی که از ضریب حساسیت خوبی برخوردار باشند ساخته می شوند. عمومی ترین ماده ای که برای ساخت کرنش سنج استفاده می شود آلیاژ مس– نیکل (۴۵٪Ni، ۵۵٪Cu) یا کرم– نیکل (۲۰٪Cr، ۸۰٪Ni) با ضریب حساسیت $S_A=2.1$ می باشد. شکل (۱-۸) انواع کرنش سنجهای متداول مورد استفاده در مصارف صنعتی را نمایش

می دهد. این انواع شامل کرنش سنجهایی که تنها طول سیم مقاومتی در یک راستا قرار گرفته اند و همچنین انواع کرنش سنجهای Rosette می باشند.



شکل (۱-۸)انواع متداول کرنش سنجهای مقاومتی

که امتداد طولی کرنش سنج در دو محور یا سه محور متعامد یا غیر متعامد قرار گرفته اند. با توجه به نازکی این لایه فلزی معمولا یک پوشش بر روی آن کشیده شده است که از شکست و پارگی خطوط مقاومتی جلوگیری می کند. همچنین پس از نصب کرنش سنج بر روی سطوح این لایه ایزولاسیون الکتریکی کرنش سنج را با محیط فراهم می سازد. کرنش سنج ها در طول های متفاوت بین 0.2mm تا 102mm در شکل (۱-۸) نمایش داده شده اند. مقاومت معادل کرنش سنجها معمولاً 120Ω یا 350Ω است. اما کرنش سنجهای مخصوص با مقاومت $500-1000\Omega$ نیز در صنعت به صورت خاص استفاده می شوند. ضریب حساسیت

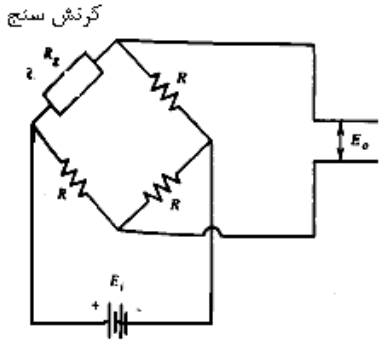
کرنش سنج S_g در عمل از ضریب حساسیت تئوری آن S_A کوچکتر است و توسط آزمایش کالیبراسیون تعیین می شود.

$$S_g = \frac{\Delta R / R}{E} \qquad (۱۴-۱)$$

این تغییر مقاومت توسط مدار پل وتسون به ولتاژ تبدیل می شود. اگر یک کرنش سنج واحد را در یکی از پلهای مدار وتسون و سه مقاومت ثابت را در سه پل دیگر مطابق شکل (۱-۹) قرار دهیم ولتاژ خروجی از رابطه زیر تعیین می شود.

$$E_0 = \frac{E_i}{4}\left(\frac{\Delta R_g}{R_g}\right) = \frac{1}{4} E_i S_g \varepsilon \qquad (۱۵-۱)$$

ولتاژ ورودی بسته به اندازه کرنش سنج انتخاب می شود و در نتیجه آن ولتاژ خروجی E_0 معمولا بین $1-10\mu V$ به ازای واحد کرنش به دست می آید



شکل(۹-۱) مدار پل وتستون مورد استفاده کرنش سنجهای مقاومتی

۱-۵-۴) حساسهٔ خازنی

اصول طراحی سنسور خازنی در شکل (۱-۱۰) نشان داده شده است. این حساسه از دو صفحه فلزی که مقابل هم با یک فاصله هوایی قرار گرفته اند تشکیل شده است. ظرفیت خازنی در این حالت برابر است با :

$$C = \frac{kKA}{h} \qquad (۱۵-۱)$$

که در آن C ظرفیت خازن به (PF)، K ثابت دی الکتریک مربوط به جنس مواد موجود در فاصله هوایی، A سطح مقطع مقابل هم دو سطح فلزی، h فاصله هوایی دو صفحه، k ضریب تناسب و برابر 8.85×10^{-3} می باشد.

از این سنسور خازنی به دو صورت می توان برای اندازه گیری موقعیت خطی استفاده نمود. در روش اول مطابق شکل (۱-۱۰)، تغییرات عمودی بر سطوح و Δh در اندازه گیری تاثیر گذار بوده و در روش دوم حرکت افقی سطوح و تغییر سطح متقابل در آنها در اندازه گیری تاثیر گذار خواهد بود. اگر فاصله عمودی سطوح h به اندازه Δh تغییر کند خواهیم داشت:

$$C + \Delta C = \frac{kKA}{h + \Delta h} \Rightarrow \Delta C = -\frac{kKA}{h + \Delta h}\left(\frac{\Delta h}{h}\right) \qquad (۱۶-۱)$$

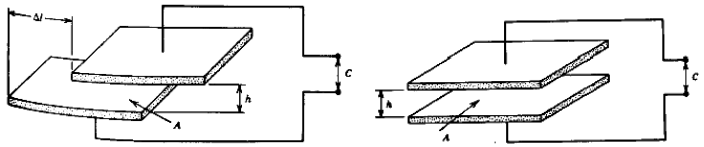
لذا ضریب حساسیت این حساسه عبارت است از:

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta h} = -\frac{kKA}{h(h + \Delta h)} \qquad (۱۷-۱)$$

که متاسفانه این ضریب حساسیت تابعی از Δh می باشد و لذا نمی توان از این روش در اندازه گیری بهره جست. اما با تقریب زیر و با در نظر گرفتن این که $\Delta h \ll h$ می باشد می توان نوشت:

$$\frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta h}{h} \Rightarrow S = \frac{\Delta C}{\Delta h} = -\frac{kKA}{h^2} \qquad (۱۸-۱)$$

که در آن ضریب حساسیت با معکوس مجذور h ارتباط دارد



شکل(۱۰-۱) a)سنسور خازنی با صفحات صاف فلزی b)سنسور خازنی با تغییر سطح خازن

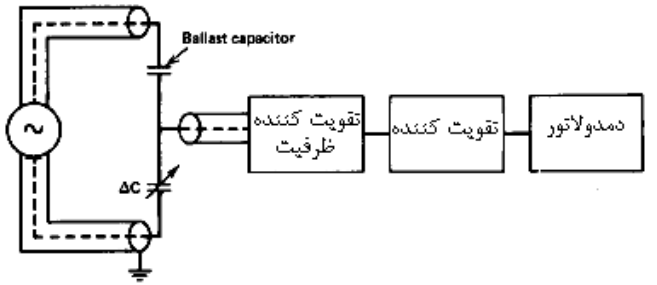
حال در روش دوم اگر سطوح فلزی را به صورت افقی از هم جدا کنیم (به اندازه $\Delta\ell$ مطابق شکل (۱-۱۰b)) تغییر سطوح متقابل از رابطه زیر دست می آید :

$$C = \frac{kK\ell W}{h} \Rightarrow C + \Delta C = \frac{kKW}{h}(\ell + \Delta\ell)$$
$$\Rightarrow \Delta C = \frac{kKW}{h}\Delta\ell \Rightarrow \frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta\ell}{\ell} \qquad (۱۹-۱)$$

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta \ell} = \frac{C}{\ell} = \frac{kKW}{h} \qquad (۲۰-۱)$$

این رابطه خطی بوده و خصوصیت حساسه خازنی، در صوتی که از این روش استفاده شود را نشان می دهد. لذا محدودیتی در بازه عمل کرد سیستم به علت غیر خطی بودن مشاهده نشده و برای انجام اندازه گیری طولی نسبت به روش اول ترجیح دارد.

اما بایستی توجه کنیم که ضریب حساسیت سنسور خازنی ذاتا بسیار کوچک است. به عنوان مثال برای سنسور با ابعاد w=10 mm و h=0.2 mm ضریب حساسیت تئوری برابر است با $S = 0.4422\ PF/mm$. این ضریب حساسیت از لحاظ تئوریک با کاهش فاصله هوایی h قابل بهبود می باشد. اما به لحاظ مشکلات و محدودیت های مکانیکی و الکتریکی نمی توان آن را خیلی کاهش داد. لذا وجود مدار بهسازی برای ایجاد حساسیت لازم در این ضریب حساسیت کوچک لازم است. در این مدار سنسور خازنی به همراه یک خازن Ballast توسط مدار تحریک سینوسی با فرکانس (۳/۴ kHz) تحریک شده و با توجه به شکل مدار تغییرات سنسور خازنی در حد $10^{-5}\ PF$ نیز توسط مدار تقویت شده و آشکار سازی می گردد. ولتاژ خروجی مدار به صورت dc و متناسب با ΔC عمل می کند. سنسور های خازنی دارای دو مزیت عمده می باشند. اول اینکه در ابعاد و اندازه های کوچک و با اینرسی بسیار کمی ساخته می شوند.



شکل(۱۱-۱)مداری برای اندازه گیری تغییرات کوچک ظرفیت در خازن

و به علت عدم وجود اصطکاک یا مقاومت حرکت با کمترین نیرویی قابل جابجایی می باشند. دوم آنکه عملکرد سنسور خازنی نسبت به تغییرات فشار، درجه حرارت و . . . بسیار مقاوم است.

۱-۵-۵)حساسهٔ پیزوالکتریک

لغت پیزو در اصطلاح به معنای فشار و الکتریک به معنای تولید شارژ الکتریکی است. یک حساسه پیزو الکتریک از ماده ای ساخته شده است، که در اثر فشار یا نیروی اعمالی به آن تولید بار الکتریکی یا اختلاف پتانسیل می نماید و مواد پیزو الکتریک همانند یک کریستال منفرد کوارتز یا مواد کریستالی باریم– تایتانایت (Barium-Titanate) حاوی مولکولهایی با بار الکتریکی نامتقارن می باشند. در اثر فشار کریستال تغییر فرم یافته و بارهای مثبت و منفی جابجا شده و در اثر جابجایی بارهای داخل کریستال سطوح خارجی کریستال نیز دارای بارهایی مخالف بارهای داخلی می گردند. اگر این سطوح را با الکترودهای فلزی بپوشانیم بار الکتریکی ایجاد شده q توسط ولتاژ خروجی E_o قابل تعیین است. چرا که:

$$q = E_0.C \qquad (۲۱-۱)$$

که در آن C ظرفیت خازنی کریستال پیزو الکتریک می باشد. اما بار تولید شده q متناسب با فشار P یا نیروی اعمالی به کریستال می باشد.

$$q = S_q.A.P \qquad (۲۲-۱)$$

که در آن S_q ضریب حساسیت شارژ کریستال پیزو الکتریک و A سطح مقطع کریستال که توسط الکترود پوشانده شده است می باشد. این ضریب برای حساسیت کریستال کوارتز حدود $2.2\ PC/N$ و برای کریستال $BaTiO_3$ برابر $130\ PC/N$ می باشد. ولتاژ خروجی که توسط حساسه پیزو الکتریک بدست بدست می آید از رابطه زیر تعیین می شود.

$$E_0 = \frac{q}{C} = \frac{S_q.A.P}{\frac{k.K.A}{h}} \Rightarrow E_0 = (\frac{S_q}{k.K})h.p \qquad (۲۳-۱)$$

و لذا ضریب حساسیت ولتاژ پیزو برابر است با:

$$S_E = \frac{S_q}{\kappa.K} \qquad (۲۴-۱)$$

و ولتاژ خروجی برابر است با:

$$E_0 = S_E.h.p \qquad (۲۵-۱)$$

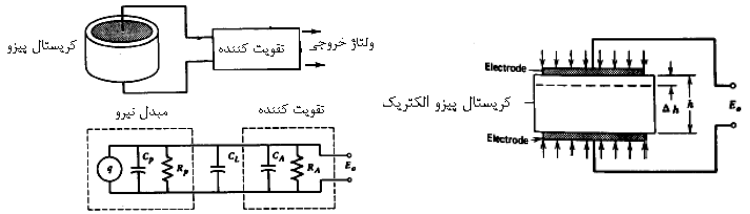
این ضریب حساسیت بستگی به جهت گیری کریستال های پیزو داشته و تعداد آن را برای یک کریستال کوارتز برابر $0.055^{V.m}/_{N}$ و این مقدار برابر $0.011^{V.m}/_{N}$ برای $BaTiO_3$ می باشد.

بیشتر سنسور های پیزو الکتریک از یک کریستال منفرد کوارتز ساخته می شوند که مدول الاستیسیته آن GPa ۸۶، مقاومت الکتریکی آن $10^{12}\Omega$ و ضریب دی الکتریک آن $40.6\ PF/m$ است. این کریستال در درجه حرارت های زیاد حتی تا 550^0C قابل کاربرد می باشد. ضریب حساسیت پایین آن نیز نسبت به $BaTiO_3$ با توجه به مدارات بهسازی با ضریب تقویت بالا قابل صرفنظر کردن می باشد.

امپدانس خروجی سنسور پیزو الکتریک نیز که همانند یک خازن عمل می کند با توجه به فرکانس نیروی ورودی و ظرفیت خازن پیزو از رابطه زیر به دست می آید :

$$Z = \frac{1}{WC} \qquad (۲۶-۱)$$

لذا امپدانس پیزو برای آزمایشات استاتیک (w=0) بینهایت بوده و تا $10K\Omega$ برای فرکانسهای بالاتر از ۱۰۰KHz کاهش می یابد. با توجه به این امپدانس بالا مدار بهسازی مناسبی برای اندازه گیری ولتاژ خروجی بایستی طراحی شود. یک مدار بهسازی مناسب برای پیزو الکتریک در شکل (۱-12b) داده شده است.



شکل(۱-۱۲) a) تغییر شکل کریستال پیزو الکتریک و تولید ولتاژ b)مدار بهسازی پیزو الکتریک

مدار داخلی پیزو علاوه بر تولید کننده بار الکتریکی q از یک خازن C_p (۱۰-۱۰۰۰ pF) و یک مقاومت نشتی R_p $(10^{14}\Omega)$، تشکیل شده است. ظرفیت خازنی سیمهای رابط نیز C_L در نظر گرفته شده است که در صورت استفاده از سیمهای کوتاه بین سنسور و مدار تقویت این ظرفیت خازن بیش از ظرفیت خازنی خود سنسور می باشد، فلذا از این ظرفیت نمی توان صرفنظر کرد. مدار تقویت کننده یا یک تقویت کننده بار الکتریکی بوده و یا یک Cathod follower می باشد که در هر دو صورت دارای امپدانس لازم برای ایزوله کردن سنسور پیزو الکتریک از محیط می باشد.

حال اگر نیرو یا فشار دائمی بر روی پیزو اعمال شده به نحوی که بار q و ولتاژ خروجی E_0 در آن ظاهر شود با توجه به وجود مقاومت داخلی خود کریستال پیزو این بار الکتریکی، جریان

می یابد و تنها زمان کوچکی برای مشاهده سیگنال خروجی با توجه به ثابت زمانی معادل مدار وجود خواهد داشت :

$$\tau_e = R_e C_e = \frac{R_p R_A}{R_P + R_A}(C_P + C_L + C_A) \qquad (۲۷-۱)$$

که در آن τ_e ثابت زمانی مدار معادل، R_e مقاومت مدار معادل و C_e ظرفیت خازنی مدار معادل می باشد. خوشبختانه با توجه به مقادیر مقاومتها و ظرفیتهای خازنی مدار پیزو این ثابت زمانی بین $10^{-3} - 10^{-5}s$ ثانیه بوده و مشکلی در مشاهده دقیق سیگنال وجود نخواهد داشت. اما در صورت افزایش فشار ورودی این مشکل بیشتر به چشم خواهد خورد. یکی از مزیتهای اصلی سنسور پیزو الکتریک داشتن پاسخ فرکانسی با پهنای باند بسیار زیاد است. با توجه به ساختار فیزیکی این حساسه فرکانس اصلی سیستم بسیار بالا و حدود $10 - 10^3\ KHz$ بوده و لذا از این سنسور در جائیکه رفتار دینامیکی یک سیستم با فرکانس بالا را بخواهیم اندازه گیری کنیم می توان استفاده نمود.

۱-۵-۶) حساسهٔ پیزو مقاومتی[1]

این گونه سنسورها از موادی تشکیل شده اند که مقاومت الکتریکی آنها تحت اعمال فشار یا نیرو تغییر می کند. تحقیقات بر روی این مواد توسط آزمایشگاه تلفن Bell در سال ۱۹۵۰ شروع و نهایتا منجر به ساخت یک ترانزیستور بر اساس این مواد گردید. مواد تشکیل دهنده سنسورها پیزومقاومتی، مواد نیمه هادی خاص، و عموماً سیلیکون دارای کمی بور (Baron) برای مثبت نمودن آن و آرسنیک برای بار منفی نیمه هادی است. مقاومت مواد نیمه هادی برحسب رابطه زیر بیان می شود:

$$\rho = \frac{1}{eN\mu} \qquad (۲۸-۱)$$

که در آن

e : بار الکتریکی ماده است، که بستگی به میزان ناخالصی نیمه هادی دارد.

N : تعداد کاریرهای بار الکتریکی می باشد که بستگی به میزان تجمع ناخالصی دارد.

μ: قدرت حرکت کاریرهای بار الکتریکی است که بستگی به میزان کرنش اعمال شده به کریستال نیمه هادی در امتداد محور کریستال، دارد.

[1] Piezoresistive Sensors

همانطور که از این رابطه ملاحظه می شود، مقاومت نیمه هادی را می توان توسط ناخالصی در ماده کنترل نمود. میزان ناخالصی معمولا بین $10^{16} - 10^{20}$ اتم بر cm^3 بوده که به ازای 10^{20} اتم بر cm^3 مقاومت اولیه $500\mu\Omega$ در این ماده ایجاد می شود که این مقدار سی هزار بار بزرگتر از مقاومت مس می باشد به واسطه این مقاومت بسیار بزرگ می توان از این مواد در ابعاد کوچک برای ساخت سنسور های پیزو- مقاومتی استفاده نمود. همچنین از رابطه فوق می توان استنباط نمود که در صورت اعمال تنش یا کرنش به این نوع مواد مقاومت آنها تغییر می کند. با توجه به سه بعدی بودن کریستال مواد پیزو– مقاومتی و همچنین امکان اعمال تنش به آنها در سه جهت x-y-z رابطه بین تنش اعمالی به کریستال و تغییر مقاومت به صورت تئوریک با استفاده از ریاضیات تانسورها قابل بیان است، که جزئیات آن از حوصله این کتاب خارج است. اما در نتیجه آن و با استفاده از آزمایشات کالیبراسیون می توان نشان داد که کاهش ولتاژ در امتداد سنسور (یا افزایش مقاومت ماده) تابعی از چگالی جریان I' و میزان و نوع اعمال تنش به آن τ می باشد.

لذا ضریب حساسیت سنسور های پیزو- مقاومتی را با تنظیم میزان تجمع ناخالصی ها و بهینه سازی راستای اعمال نیرو برای افزایش تأثیر آن، در تعقیب مقاومت الکتریکی مدار نیمه هادی می توان به میزان قابل توجهی افزایش داد. بعنوان مثال یک سنسور پیزو– مقاومتی معمول دارای ضریب حساسیت ۱۰۰ بوده که در مقایسه با یک کرنش سنج مقاومتی با ضریب حساسیت ۲، ۵۰ بار حساس تر عمل می نماید. بدین علّت با استفاده از این نوع مواد در سنسور های مینیاتوری قابلیت تبدیل حرکات مکانیکی بسیار کوچک و تبدیل آن به مقادیر ولتاژ قابل استفاده برای کاربر وجود دارد. نمونه ای از این نوع مبدل ها برای فشار سنجی و شتاب سنجی با ابعاد کوچکتر از یک تار مو نیز در صنعت استفاده شده است.

۱-۵-۷) حساسهٔ فتو الکتریک

در بسیاری از کاربردهائی که لازم است از سنسورها بدون تماس استفاده شود می توان از سنسورهای فتو الکتریک بهره برد. در این نوع حساسه میزان شدت نور را می توان به کمیت مورد اندازه گیری نسبت داد. سه نوع مختلف آشکارساز فتو الکتریک (یا فتوسل[1]) برای تبدیل شدت نور به ولتاژ الکتریکی وجود دارند که عبارتند از :

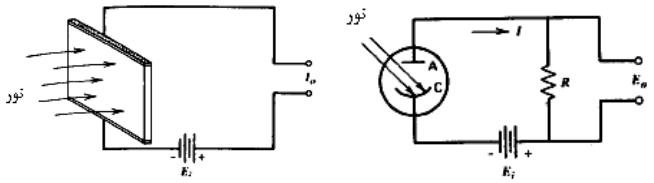
a) Photo emissive cells b) Photo conductive cells c) Photo voltaic cells

[1] Photo Cell

در سلولهای فتو- امیسیو که در شکل (۱-۱۳ a) نمایش داده شده اند تابش نور بر روی کاتد C باعث آزاد شدن الکترون و انتقال آن به آند A در لامپ خلا گردیده و متناسب با شدت نور اعمالی جریان الکتریکی در مدار برقرار می شود. لذا :

$$I = S\varphi \qquad (۲۹-۱)$$

که در آن S ضریب حساسیت سلول فتو الکتریک و φ شدت نور تابیده می باشد. ضریب حساسیت این فتوسل بستگی مستقیم به ماده مورد استفاده در کاتد دارد. معمولاً از یک لایه نقره که اکسید شده و بر روی آن یک لایه سزیم قرار گرفته است در کاتد استفاده می شود. ضریب حساسیت این فتوسل همچنین ارتباط به طول موج نور تابیده شده λ دارد. لذا در این نوع حساسه بایستی حتماً از نور تک رنگ که دارای طول موج ثابتی ایست استفاده نمود. در غیر اینصورت انجام عملیات کالیبراسیون این حساسه بسیار دشوار خواهد شد.

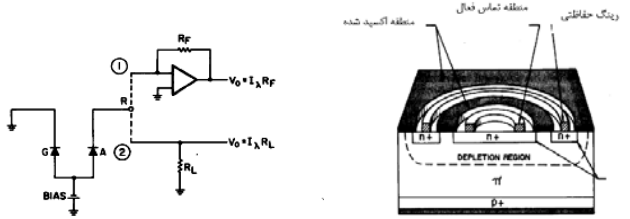


شکل(۱-۱۳) a)مدار یک سلول فتو امیسیو b) مدار یک سلول فتو کانداکتیو

سلولهای فتو– کانداکتیو از مواد نیمه هادی همانند سولفاید کادمیم (CdS) یا سلناید کادمیم (CdSe) ساخته می شوند، که میزان هدایت الکتریکی آنها حساسیت زیادی به نور تابیده شده به سطح آنها دارد. مقاومت الکتریکی این مواد در اثر تابش نور کاهش می یابد و در این مواد در اثر جذب فوتونهای نور تابیده شده بر سطح ماده، الکترونهای بیشتری تحریک شده که در باند هدایتی قرار گیرند و بدین ترتیب هدایت الکتریکی نیمه هادی افزایش می یابد. این الکترونهای آزاد جریان الکتریکی را ایجاد می کنند که متناسب با شدت نور تابش شده می باشد. مقاومت الکتریکی این مواد در تاریکی و در شدت نور معمولی به صورت قابل توجهی تغییر می کند و به صورت معمول بین $100 - 10000\ \Omega$ در حساسه های معمولی مشاهده می شود لذا جریان الکتریکی تولید شده نسبتا زیاد می باشد. ضریب حساسیت این نوع فتوسل که بستگی به میزان مستهلک کردن انرژی و ولتاژ ورودی E_i دارد بین $10 - 10^{-5}\ A/lm$ متغیر است.

این نوع فتوسل به انواع مختلف طیف تشعشعی از تشعشع حرارتی تا تشعشع نورهای مادون قرمز، نور مرئی و ماوراء بنفش پاسخ می دهند. ضریب حساسیت این فتوسل که در مقابل طول موجهای مختلف تغییر می کند، با افزایش طول موج کاهش می یابد. لذا این نوع فتوسلها نیز

دارای محدودیتی مشابه به سلول فتو-امیسیو در آشکار سازی نورها به طول موج متغیر می باشند. همچنین در این نوع فتوسل مدت زمانی طول می کشد تا جریان خروجی فتوسل پس از اعمال نور به آن به حالت ماندگار خود رسیده و همچنین پس از قطع منبع نور نیز این زمان تأخیر مشاهده می شود. این زمان تأخیر با توجه به اندازه و نوع فتوسل بین $10^{-6} - 10\ s$ می باشد. لذا در اندازه گیری های دینامیکی باید پاسخ فرکانسی فتوسل مورد توجه قرار گیرد.
سلول فتو- ولتائیک با استفاده از تکنولوژی ترانزیستور توسعه یافته است. سلول فتو – ولتائیک در واقع یک فتو دیود P-N است که مطابق شکل (۱-۱۴) از سیلیکون دیفیوز شده و رینگهای حفاظتی تشکیل شده است. در اثر تابش نور به منطقه تماس فعال، اتصال الکتریکی، جریان الکتریکی از منطقه P به منطقه N نفوذ یافته ایجاد شده که به آن اثر فتوولتائیک می گویند. به علت این مشخصه فیزیکی این فتو سل در طیف وسیعی از نور قابل استفاده بوده و دارای پاسخ زمانی بسیار سریع و ضریب حساسیت بالا، خطی بودن، کم نویز بودن و همچنین سادگی در مدار بهسازی آن می باشد.



شکل (۱-۱۴)سلول فتوولتاییک ومدار الکتریکی آن

برای این که از این فتو دیود به عنوان حساسه استفاده شود مطابق مدار (۱-۱۴) از یک ولتاژ بایاس E_b در جهت مخالف P وN اعمال می شود و بدین ترتیب فتو دیود به یک فتو کنداکتور تبدیل می شود در این مورد، فتوسل همانند یک منبع جریان عمل نموده و جریان ثابتی را به مقاومت بار R_l تزریق می کند، که میزان جریان متناسب با شدت نور اعمالی است. این شدت جریان از جمع جریان تولید شده در حالت بدون تابش (جریان تاریکی) به علاوه جریان ایجاد شده در اثر تابش تشکیل شده است. جریان تاریکی مقدار بایاس ثابتی داشته در صورتیکه شرایط محیط مثل درجه حرارت تغییر چندانی نداشته باشد و لذا با جریان بایاس E_o قابل تنظیم خواهد بود. در مدار شکل (۱-۱۴) دو نوع اتصال خروجی برای سیستم پیش بینی شده است، که در اتصال اول از یک مدار تقویت Op-Amp استفاده شده است. این

اتصال برای کاهش اثرات نویز در حالتی که پهنای باند کمتری مورد نیاز باشد نسبت به حالت ساده دوم ترجیح دارد. پاسخ فرکانسی یک فتو دیود بسیار عالی است و پهنای باند ۴۵ MHz و ثابت زمانی ۵ns براحتی قابل حصول است. خطی بودن این فتوسل نیز با پهنای ٪1± حتی تا ۷ decade فرکانسی پا برجاست.

۱-۵-۸) آشکارساز مقاومتی حرارت[1] (RTD)

ایده تغییر مقاومت الکتریکی فلزات در اثر حرارت، ساختار حساسه های RTD را تشکیل می دهد. این حساسه یک هادی فلزی است که یا به صورت سیم پیچ و یا به صورت یک لایه یا چندین خطوط کنار هم (grid) ساخته می شود تغییر مقاومت الکتریکی فلزات به صورت زیر تعبیر می شود:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \gamma_1(T - T_0) + \gamma_2(T - T_0^{\ 2}) + \cdots + \gamma_n(T - T_0)^n \qquad (۳۰-۱)$$

که در آن:
T_0 درجه حرارت نامی
R_0 مقاومت نامی در درجه حرارت T_0
$\gamma_1 \ldots \gamma_n$ ضرایب درجه حرارت در معادله مقاومت می باشند.
RTD ها معمولاً ارزان قیمت، دقیق و پایدارند و معمولاً در سیستم اندازه گیری کوره ها مورد استفاده قرار می گیرند. پلاتین به عنوان یکی از فلزات اصلی مورد استفاده در این نوع حساسه ها می باشد، که دارای پایداری مناسب بوده و حداقل تأثیر پذیری را در اثر آلودگی های محیطی از خود نشان می دهد و در محدوده وسیعی از درجه حرارت $(4^\circ K - 106T^\circ K)$ قابل استفاده است. سنسورهای ساخته شده از این ماده همچنین تکرار پذیری زیادی از خود نشان می دهند. به منظور استفاده صنعتی از این ماده معمولاً آنرا به صورت سیم پیچ بر روی لوله های سرامیکی یا شیشه ای طراحی می کنند. این نوع حساسه ها در محیطهای صنعتی کاملاً ایمن بوده و شتابهای تا 100g را می توانند تحمل کند.
ضریب حساسیت این نوع حساسه ها نسبتا زیاد بوده و به عنوان مثال در یک نوع از آن $S_R = 0.39\Omega/^oC@0^oC$. اما این ضریب حساسیت با توجه به معادله فوق به درجه حرارت مرتبط است و با افزایش درجه حرارت به ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتیگراد، به مقادیر ۰/۳۷۸، ۰/۳۶۷، ۰/۳۵۵، ۰/۳۴۴ و ۰/۳۲۲ کاهش می یابد.

[1] Resistance Temperature Detectors

پاسخ دینامیکی این حساسه بستگی مستقیم به نوع طراحی آن و شیوه ساپورت آن دارد. برای سیم پیچهای با شعاع بزرگ که بر روی لوله های سرامیکی پیچیده شده اند این ثابت زمانی تا چند ثانیه نیز می رسد. برای انواع لایه ای یا grid ثابت زمانی به ۰/۱ ثانیه هم می رسد.

۱-۵-۹) ترمیستورها[1]

نوع دیگری از حساسه های مقاومتی حرارتی به ترمیستورها معروفند. اصول کار ترمیستورها همانند RTD ها می باشد، با این تفاوت که این نوع حساسه ها از مواد نیمه هادی ساخته می شوند. این نوع مواد نیمه هادی که شامل اکسیدهای مس، کبالت، منگنز، نیکل و تیتانیوم می باشند دارای ضریب حساسیت زیاد نسبت به تغییر درجه حرارت بوده و لذا می توان به صورتهای مینیاتوری از آنها، حساسه هایی بسیار کوچک تهیه نمود.

تغییر مقاومت این مواد با درجه حرارت از رابطه زیر تعیین می شود :

$$\ln \rho = A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \cdots + \frac{A_n}{T^n} \qquad (۳۱-۱)$$

که در آن:

ρ مقاومت مخصوص ماده،

$A_1 \cdots A_n$ ضرایب تغییر مقاومت ماده و

T درجه حرارت مطلق بر حسب $^\circ K$ می باشد

معمولا به صورت تقریبی تنها از دو ترم اول برای تعیین تغییر مقاومت استفاده می شود که این در حالتی که تغییرات درجه حرارت کوچک باشد معتبر است:

$$\ln \rho = A_0 + \frac{\beta}{T} \qquad (۳۲-۱)$$

مزایای این نوع حساسه ها عبارتند از:

- بسیار کوچک و مینیاتوری می توانند ساخته شوند (۰/۱mm) لذا بصورت دقیق درجه حرارت یک نقطه معین را می توانند اندازه گیری کنند.
- مقاومت بالای آنها اثر مقاومت سیمهای ارتباطی را کاهش می دهد.
- خروجی آنها ۱۰ برابر خروجی RTD ها است.
- بسیار صنعتی و ایمن در کاربردهای صنعتی می باشند.

عیب عمدهٔ این حساسه ها این است که خروجی آن رابطه غیر خطی با درجه حرارت دارد و به این علّت در بازه ای محدود درجه حرارت قابل استفاده اند. مگر اینکه این رابطه غیر خطی

[1] Thermistors

دقیقا کالیبره شده و توسط مدار بهسازی پروسس شود. با پیشرفت تکنولوژی ساخت این نوع حساسه ها، شکل پایدار، تکرار پذیر و قابل اطمینان از ترمیستورها با حداکثر خطای ۰/۵٪ در محدوده بازهٔ نامی سنسور در اختیار کاربران قرار گرفته است.

۱-۵-۱۰) ترموکوپل

اساس کار ترموکوپلها ببر پایهٔ اثر Seebeck بنیان گذارده شده است: هر گاه دو ماده غیر همجنس را به هم متصل سازیم، در اثر اختلاف دما در دو سر این مواد، پتانسیل الکتریکی بین آنها ایجاد می شود. از این اثر برای اندازه گیری حرارت می توان استفاده نمود. از بسیاری از مواد برای ساختن ترموکوپل می توان استفاده نمود. حساسیت ترموالکتریکی برخی مواد مهم بر حسب ($\mu V/^\circ C$) در مجاورت پلاتین در جدول زیر داده شده اند:

ماده	ضریب حساسیت ترمو-الکتریک $\mu V/^\circ C$	ماده	ضریب حساسیت ترمو-الکتریک $\mu V/^\circ C$
کنستانتان	-۳۵	مس	+۶/۵
نیکل	-۱۵	طلا	+۶/۵
آلوپل	-۱۳/۶	تنگستن	+ ۷/۵
کربن	+۳	آهن	+۱۸/۵
آلومینیم	+۳/۵	کرومل	+ ۲۵/۸
نقره	+۶/۵	سیلیکون	+۴۴۰

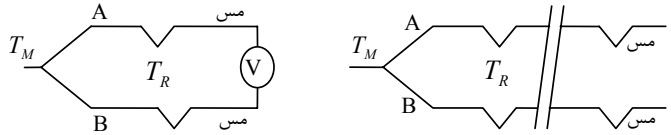
جدول(۱-۱)حساسیتهای ترموالکتریکی برخی مواد مورد استفاده در ترموکوپلها در مجاورت با پلاتین

ضریب حساسیت ترموکوپلها در حالتیکه از پلاتین استفاده نشود به صورت زیر محاسبه می شود :

$$S_{\text{کرومل/الومل}} = S_{\text{پلاتین/کرومل}} - S_{\text{پلاتین/الومل}} = -(-۱۳/۶) - ۲۵/۸ = ۳۹/۴ \quad \mu V/^o C$$

مواد مورد استفاده در ترموکوپلهای صنعتی معمولاً آهن/کنستانتان، کرومل/آلومل، کرومل/کنستانتان، مس/کنستانتان و پلاتین/پلاتین-رودیم می باشد. نحوهٔ اندازه گیری درجه حرارت در مداری مطابق شکل (۱-۱۵) صورت می پذیرد، که در آن ماده A,B از یک سر

نقطه مورد نظر برای اندازه گیری درجه حرارت T_M قرار گرفته و از یک سر دیگر در یک درجه حرارت مرجع (که بایستی کاملا ثابت باشد) قرار میگیرند.



شکل(۱-۱۵)مدار یک ترموکوپل معمول

اختلاف پتانسیل بین دو ماده A,B در درجه حرارت مرجع مطابق اثر Seebeck متناسب با اختلاف درجه حرارت $T_M - T_R$ می باشد و از رابطه زیر محاسبه میشود.

$$E_o = S_{A/B}(T_M - T_R) \qquad (۳۳-۱)$$

معمولاً درجه حرارت مرجع در مجاورت نقطه اندازه گیری درجه حرارت صورت نگرفته بلکه مطابق شکل (۱-۱۵) این نقطه توسط سیمهای ارتباطی در محل دوری از محیط اندازه گیری درجه حرارت صورت میپذیرد. درجه حرارت مرجع نیز معمولاً توسط محفظه ای که توسط آب مخلوط با یخ به صورت ثابت در درجه حرارت 0^oC نگهداری میشود. ترموکوپلها میتوانند از سیمهای بسیار نازکی ساخته شوند و لذا اندازه این حساسه بسیار کوچک است و پاسخ زمانی آن نسبتا سریع است اما خروجی ترموکوپلها نیز غیر خطی میباشند و حتما از کالیبراسیون برای استفاده از این حساسه بایستی استفاده نمود. معایب دیگر ترمو کوپلها ولتاژ ضعیف خروجی آنها و نیاز به نگهداری دقیق درجه حرارت مرجع T_R می باشد.

۱-۵-۱۱)حساسه های زمان و فرکانس

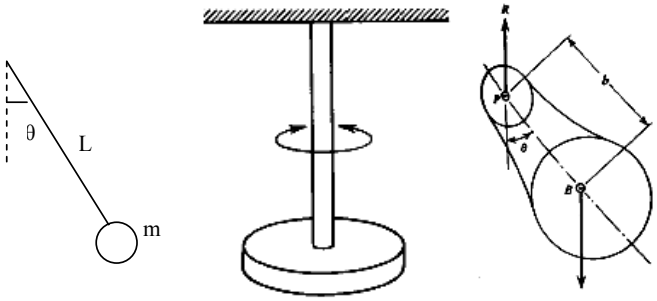
زمان کمیتی است آشنا برای همگان اما تعریف دقیق آن بسیار مشکل بوده و با توجه به نظریه نسبیت نمی توان از آن استنباطی مطلقی داشت. در ابتدا برای اندازه گیری زمان از حرکات زمین به دور خود یا به دور خورشید استفاده میشد. به این نوع زمان سنجی Ephemeris time اطلاق میشود. با توجه به حرکت خورشید اگر اندازه گیری زمان را نسبت به ستاره های دور دست انجام دهیم به معیار دقیقتری رسیده که به آن Sidereal Time اطلاق میشود. امروزه تعریف زمان را با استفاده از طول موج تشعشعی مواد، به ویژه اسیلاتورهایی که توسط اشعه سزیم تولید شود تا دقت ۱۱ رقم به تعیین می کنند. اما اینگونه مشخص است هنوز تعریف دقیق و مطلقی از زمان نمیتوان داشت. برای اندازه گیری زمان و معکوس آن $f = 1/T$ یا

فرکانس از روشهای مختلفی میتوان بهره برد. از جمله از نوسان یک پاندول مرکب مطابق شکل(۱-۱۶) و از رابطه زیر میتوان زمان را با توجه به پریود نوسانات کوچک محاسبه نمود.

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgb}} \qquad (۳۹-۱)$$

که در آن m جرم پاندول g ثابت جاذبه I ممان اینرسی پاندول نسبت به محور دوران و b فاصله مرکز جرم تا مرکز دوران میباشد. اگر از یک پاندول ساده استفاده کنیم این رابطه به صورت زیر ساده میشود.

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \qquad (۴۰-۱)$$

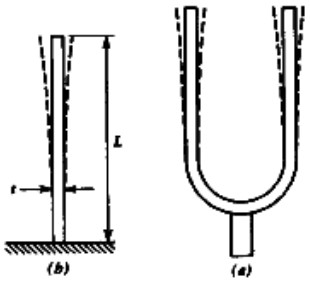


شکل(۱-۱۶) a) پاندول مرکب b) پاندول پیچشی c) پاندول ساده

در یک پاندول پیچشی پریود نوسانات از رابطه

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{\frac{I}{K}} \qquad (۴۰-۱)$$

که در آن I ممان اینرسی پیچشی جسم K ضریب سختی پیچشی پاندول است. از این پاندولها در ساعتهای قدیمی جهت محاسبه زمان بهره گرفته میشود. روش دیگر محاسبه زمان یا فرکانس از طریق ایده مورد استفاده در دیاپازون قابل اجرا است. فرکانس صوتی یک دیاپازون که در شکل (۱-۱۷) آمده است، تابعی از شکل هندسی دقیق آن و طول دیاپازون و جنس آن است.



شکل(۱-۱۷) a) دیاپازون b) مدل ارتعاشی یک تیر Cartilever

فرکانس اصلی نوسانات یک دیاپازون را می توان توسط مدل تقریبی یک تیرCartilever به دست آورد.

$$f = 0.5596\sqrt{\frac{EI}{\rho L^4 A}} \qquad (۴۱-۱)$$

که در آن

E: ضریب مدول الاستیسیتهٔ مربوط به جنس تیر،

ρ: دانسیته یا جرم حجمی جسم

L: طول تیر

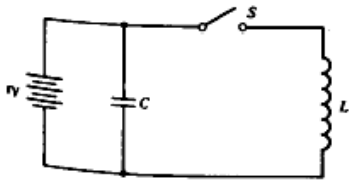
A: سطح مقطع تیر و

I: ممان اینرسی هندسی سطح مقطع تیر می باشد.

انواع این نوع دیاپازونها در فرکانسهای شنوایی ۲۰Hz-۲۰KHz ساخته شده اند. از نوع الکتریکی اسیلاتور که بر اساس عملکرد یک دیاپازون کار می کند و دارای نوسانات دائمی است به جای پاندول ساعتهای قدیمی در زمان سنجی استفاده شده است. مشابه با اسیلاتورهای مکانیکی میتوان از اسیلاتورهای الکتریکی نیز برای اندازه گیری زمان استفاده نمود.

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{LC} \qquad (۴۲-۱)$$

در صورت عدم وجود هر گونه مقاومتی در مدار سیستم دارای نوسانات دائمی میباشد. برای اسیلاتورهای صنعتی به صورت دائم انرژی الکتریکی مطابق با انرژی از بین رفته در سیستم به آن تزریق میشود.



شکل(۱-۱۸) مدارLC در اسیلاتور الکتریکی

روش مدرن امروزی در ایجاد اسیلاتورها استفاده از کریستالهای پیزو الکتریک میباشد. همچنانکه قبلا معرفی شد یک کریستال پیزو الکتریک توانایی ایجاد ولتاژ الکتریکی در صورت اعمال فشار به آن را دارد و همچنین بر عکس در اثر اعمال ولتاژ کریستال انعطاف پذیر بوده و از خود حرکتی بروز خواهد داد. با توجه به این انعطاف پذیری هر کریستال بسته به شکل و اندازه خود دارای یک فرکانس طبیعی نوسانات است که بین ۵KHz-۱۰MHz بسته به مشخصات کریستال متغیر است. اگر از یک کریستال پیزو در یک مدار اسیلاتور استفاده شود این ارتعاشات طبیعی در سیستم به وجود آمده و با تزریق انرژی مناسب در این سیستم میتوان نوسانات دائمی طولانی مدت را به دست آورد. امروزه ساعتهای کوارتز بسیار دقیقی میتوان ساخت که دقت آنها در طول یکسال بیش از ۰/۱ ثانیه باشد. با توجه به این خصوصیت کریستالهای پیزو، از آن در کاربردهای مبدلهای فشار، نیرو ، شتاب سنجها، اسیلاتورها و شمارنده های الکترونیکی استفاده میشود.

۱-۶) جمع بندی

مسائل

مراجع

فصل دوّم

مدارهای بهسازی