جزوه درس اندازه‌گیری

تهیه و تنظیم:

دکتر مجتبی پیشوائی

عضو هیئت علمی دانشگاه سراسری تفرش

بسمه تعالی

عنوان درس: اندازه‌گیری الکتریکی

کتابهای قابل استفاده:

۱- "اندازه‌گیری الکتریکی" – تالیف: "ساونی" –ترجمه: محمود دیانی- مجید ملکان- مرکز نشر دانشگاهی-۱۳۷۱
۲- "اندازه‌گیری الکترونیکی" –تالیف: امیر حسین رضایی- محمدرضا ذهابی-دانشگاه امیرکبیر واحد تفرش-۱۳۷۵
۳- "دستگاههای اندازه‌گیری" –تالیف: مسعود سلطانی-دانشگاه تهران-چاپ یازدهم ۱۳۷۵
۴- کتب لاتین تحت عنوان Electrical Measurment (Systems) و یا عناوینی شبیه به آن

عناوین مطابق توصیه شورایعالی برنامه‌ریزی: مفهوم و اهمیت اندازه‌گیری، تعاریف اولیه، اجزاء سیستمهای اندازه‌گیری، خطاها و آنالیز آن، طبقه‌بندی دستگاههای اندازه‌گیری، اسیلوسکوپهای عادی و دستگاههای ثبّات، دستگاههای اندازه‌گیری آنالوگ، مغناطیس ثابت و سیم‌پیچی متحرک و بالعکس با آهن متحرک، الکترودینامیکی، فرودینامیکی القایی، الکترواستاتیکی، ...
دستگاههای اندازه‌گیری جریان و ولتاژ DC و AC و روشهای اندازه‌گیری مقادیر خیلی کم و خیلی زیاد ولتاژ و جریان، دستگاههای اندازه‌گیری با ضرب کننده‌ها، اندازه‌گیری توان اکتیو و راکتیو یک فاز و سه فاز، اندازه‌گیری مقاومتها، خازنها و سلفها و ضریب Q، پلهای اندازه‌گیری و کاربردهای آنها، ترانسدیوسرها، دستگاههای اندازه‌گیری فرکانس و هارمونیکها، اسیلوسکوپهای پیشرفته، دستگاههای متفرقه اندازه‌گیری نظیر SVTVM، Curve Tracers VTVM، Wave Analyzer

فصل‌بندی این جزوه:

۱- اندازه‌گیری و اهمیت و کاربردها
۲- ویژگیهای استاتیک دستگاههای اندازه‌گیری
۳- ویژگیهای دینامیک دستگاههای اندازه‌گیری
۴- خطاها و آنالیز خطا
۵- اسیلوسکوپ
۶- دستگاههای اندازه‌گیری قیاسی
۷- گالوانومتر و کاربردهای آن
۸- دستگاه آهن گردان
۹- دستگاه الکترودینامیکی
۱۰-دستگاه الکترواستاتیکی
۱۱-دستگاه القایی و انرژی سنجی
۱۲-پلهای اندازه‌گیری
۱۳-دستگاهها و روشهای اندازه‌گیری فرکانس
۱۴-معرفی مختصر دستگاههای اندازه‌گیری دیجیتال
۱۵-سنسورها (سنجها) و ترانسدیوسرها (مبدلها)

فهرست

فصل اول – اندازه‌گیری، اهمیت و کاربردها **۱**

۱-۱) اندازه‌گیری چیست؟ ۱

۱-۲) چگونه اندازه‌گیری می‌کنیم؟ ۱

۱-۳) کمیتهای مرجع ۱

۱-۴) کالیبره‌سازی (مدرج نمودن) دستگاه ۴

۱-۵) کاربردهای اندازه‌گیری ۴

۱-۶) سیستم اندازه‌گیری ۴

۱-۷) اندازه‌گیری الکتریکی ۵

۱-۸) اجزاء یک سیستم اندازه‌گیری الکتریکی ۵

۱-۹) روش تفاوتی و روش تعادلی ۶

۱-۱۰) دستگاههای قیاسی و دستگاههای رقمی ۷

فصل دوم – مشخصه‌های استاتیک دستگاهها و سیستمهای اندازه‌گیری **۸**

۲-۱) تعریف مشخصه (ویژگی) ۸

۲-۲) مشخصه‌های دینامیک و استاتیک دستگاه اندازه‌گیری ۸

۲-۳) مشخصه‌های استاتیک سیستم اندازه‌گیری ۸

۲-۴) صحت یا درستی ۹

۲-۵) خطا ۹

۲-۶) حساسیت ۱۰

۲-۷) قدرت تفکیک (تمایز) ۱۱

۲-۸) تکرار پذیری – دقت ۱۲

۲-۹) ارقام با معنی Significant figures ۱۳

۲-۱۰) خطی بودن و خطی سازی ۱۴

۲-۱۱) پسماند (Hysteresis) ۱۵

۲-۱۲) ناحیه مرده و زمان مرده ۱۶

۲-۱۳) اثرهای بارگذاری ۱۷

۲-۱۳-۱) اثرهای بارگذاری ناشی از دستگاههای با اتصال موازی ۱۷

۲-۱۳-۲) اثرهای بارگذاری ناشی از دستگاههای با اتصال متوالی (سری) ۱۹

۲-۱۴) تطبیق امپدانس و انتقال توان بیشینه ۲۰

فصل سوم – مشخصه‌های دینامیک سیستمهای اندازه‌گیری ۲۲
۳-۱) پاسخ دینامیک (پویا) ۲۲
۳-۲) حوزه فرکانس و حوزه زمان ۲۲
۳-۳) مشخصه‌های دینامیک ۲۳
۳-۴) خطای دینامیک (پویا) ۲۳
۳-۵) مشخصه‌های دینامیک عناصر با تابع تبدیل درجه ۱ ۲۳
۳-۵-۱) پاسخ زمانی با فرض ورودی پله $(X = A_2 \cdot u(t))$ و ضربه $(X = A_2 \cdot \delta(t))$ ۲۳
۳-۵-۲) پاسخ فرکانسی (پاسخ حالت پایدار) ۲۴
۳-۵-۳) عناصر با زمان تاخیر ۲۵
۳-۶) مشخصه‌های دینامیک سیستم‌های درجه دوم ۲۵
۳-۶-۱) پاسخ زمانی ۲۵
۳-۶-۲) پاسخ فرکانسی ۲۶
۳-۷) سیستمهای با درجات بالاتر ۲۷
۳-۸) کاهش خطای دینامیک ۲۷

فصل چهارم – خطاها و آنالیز خطا ۲۹
۴-۱) خطای حدی ۲۹
۴-۲) ترکیب کمیتهای دارای خطای حدی ۲۹
۴-۲-۱) جمع دو کمیت ۲۹
۴-۲-۲) تفاضل دو کمیت ۳۰
۴-۲-۳) جمع یا تفاضل بیش از دو کمیت ۳۰
۴-۲-۴) ضرب دو کمیت ۳۰
۴-۲-۵) خارج قسمت ۳۰
۴-۲-۶) ضرب و تقسیم بیش از دو کمیت ۳۰
۴-۲-۷) توان یک کمیت ۳۱
۴-۲-۸) ضرب توانها ۳۱
۴-۳) انواع خطاها در اندازه‌گیری ۳۲
۴-۳-۱) خطاهای آشکار ۳۲
۴-۳-۲) خطاهای سیستمی ۳۲
۴-۳-۳) خطاهای تصادفی ۳۳
۴-۴) بررسی آماری داده‌ها ۳۳
۴-۴-۱) میانگین حسابی ۳۳
۴-۴-۲) پراکندگی ۳۳
۴-۴-۳) منحنی نرمال (بهنجار) یا گوسی خطاها ۳۴

۴-۴-۴) انحراف معیار میانگین ۳۵

فصل پنجم – اسیلوسکوپ (نوسان نما) اشعه کاتدی ۳۶
۵-۱) معرفی اسیلوسکوپ ۳۶
۵-۲) اجزا و بلوک دیاگرام اسیلوسکوپ ۳۶
۵-۳) لامپ اشعه کاتدی ۳۷
۵-۳-۱) تفنگ الکترونی ۳۸
۵-۳-۲) انحراف الکترواستاتیکی ۴۰
۵-۳-۳) محدودیت فرکانس ۴۲
۵-۳-۴) انحراف دهنده الکترومغناطیسی ۴۳
۵-۴) اسیلوسکوپ چند کاناله ۴۴
۵-۵) پردازش سیگنال عمودی ۴۵
۵-۵-۱) تقویت عمودی ۴۵
۵-۵-۲) تضعیف کننده‌ها ۴۵
۵-۵-۳) تزویج ac و dc ۴۸
۵-۶) پروب ۴۹
۵-۷) سیگنال افقی و مدار جاروب (سیستم انحراف افقی) ۴۹
۵-۷-۱) تولید سیگنال افقی ۴۹
۵-۷-۲) موج دندانه اره‌ای ۵۱
۵-۷-۳) انواع تریگر ۵۳
۵-۷-۴) اثر سنکرون نبودن پالسهای تریگر با شکل موج ورودی عمودی ۵۴
۵-۷-۵) ورودی افقی برای دیدن یک سیگنال برحسب سیگنال دیگر ۵۴
۵-۸) اندازه‌گیری فاز و فرکانس (منحنیهای لیساژو) ۵۵

فصل ششم – دستگاههای اندازه‌گیری الکتریکی آنالوگ (قیاسی) ۵۷
۶-۱) معرفی ۵۷
۶-۲) اصول عملکرد ۵۷
۶-۲-۱) اثر مغناطیسی ۵۷
۶-۲-۲) اثر گرمایی ۵۸
۶-۲-۳) اثر الکترواستاتیکی ۵۸
۶-۲-۴) اثر القایی ۵۸
۶-۲-۵) اثر هال ۵۹
۶-۳) نیروهای عامل ۵۹
۶-۳-۱) نیروی انحراف دهنده ۵۹

۶-۳-۲) نیروی کنترل کننده ۵۹
۶-۳-۳) نیروی میرا کننده ۵۹
۶-۴) علائم روی دستگاههای اندازه‌گیری آنالوگ و مفهوم آنها ۶۱
۶-۵) یادآوری مفاهیم مقادیر متوسط، موثر، روابط فازوری در جریان و ولتاژ متناوب ۶۳

فصل هفتم – گالوانومتر و کاربردهای آن در اندازه‌گیری ۶۹
۷-۱) معرفی ۶۹
۷-۲) معادله گشتاور در گالوانومتر (حالت استاتیک) ۷۰
۷-۳) رفتار دینامیک گالوانومتر ۷۲
۷-۴) استفاده از گالوانومتر به عنوان ثبات ۷۴
۷-۵) آمپرسنج DC به کمک گالوانومتر قاب گردان (گالوانومتر دارسونوال) ۷۴
۷-۶) ولت‌سنج DC به کمک گالوانومتر دارسونال ۷۶
۷-۷) اهم‌سنج با استفاده از گالوانومتر دارسونوال ۷۸
۷-۸) اندازه‌گیری ولتاژ و جریان AC به کمک گالوانومتر دارسونوال ۸۰
۷-۹) مالتی‌متر ۸۳
۷-۱۰) خطاهای دستگاه قاب گردان ۸۳
۷-۱۱) دستگاه با قاب صلیبی ۸۳

فصل هشتم – دستگاه آهن گردان ۸۶
۸-۱) معرفی ۸۶
۸-۲) معادله کلی گشتاور ۸۷
۸-۳) توانائی کار با ac و dc ۸۷
۸-۴) مقیاس ۸۷
۸-۵) آمپرسنج با دستگاه آهن‌گردان ۸۸
۸-۶) ولت‌سنج با دستگاه آهن‌گردان ۸۸
۸-۷) مقایسه دستگاههای جذبی با دفعی ۸۹
۸-۸) خطاهای آهن‌گردان ۸۹
۸-۸-۱) خطاهای مشترک در ac و dc ۸۹
۸-۸-۲) خطاهای منحصر به ac (خطای فرکانس) ۸۹
۸-۹) مزایا و معایب ۹۰
۸-۹-۱) مزایا ۹۰
۸-۹-۲) معایب ۹۱

فصل نهم – دستگاه الکترودینامیکی ۹۳
۹-۱) معرفی ۹۳
۹-۲) معادله گشتاور ۹۴
۹-۳) معادله تعادل در حالت dc ۹۵
۹-۴) معادله تعادل در حالت ac ۹۵
۹-۵) آمپرسنج الکترودینامومتری ۹۵
۹-۶) ولت‌سنج الکترودینامومتری ۹۶
۹-۷) سنجش توان با دستگاه الکترودینامیکی ۹۷
۹-۷-۱) واتمتر ۹۷
۹-۷-۲) سنجش توان راکتیو (وارمتر) ۹۸
۹-۷-۳) سنجش توان ظاهری ۹۸
۹-۸) خطاهای دستگاه الکترودینامیکی ۹۹
۹-۹) مزایا و معایب ۹۹
۹-۹-۱) مزایا ۹۹
۹-۹-۲) معایب ۹۹
۹-۱۰)دستگاه فرودینامیکی ۱۰۰
۹-۱۱) محاسبه ضریب توان ($\cos\phi$) با استفاده از دستگاه الکترودینامیکی با قاب صلیبی ۱۰۰

فصل دهم – دستگاه الکترواستاتیکی ۱۰۳
۱۰-۱) معرفی ۱۰۳
۱۰-۲) معادله گشتاور ۱۰۳
۱۰-۳) توسعه محدوده سنجش در ولت‌سنج الکتروستاتیکی ۱۰۴
۱۰-۳-۱) مقسم ولتاژ مقاومتی ۱۰۴
۱۰-۳-۲) مقسم ولتاژ خازنی ۱۰۵
۱۰-۴) ویژگیهای دستگاه الکتروستاتیکی ۱۰۶
۱۰-۵) مزایا و معایب ۱۰۷
۱۰-۵-۱) مزایا ۱۰۷
۱۰-۵-۲) معایب ۱۰۷

فصل یازدهم – دستگاه القایی و انرژی‌سنجی ۱۰۸
۱۱-۱) معرفی ۱۰۸
۱۱-۲) معادله گشتاور ۱۰۸
۱۱-۳) انواع دستگاههای القایی ۱۰۹

۱۱-۳-۱) نوع فراریس ۱۰۹
۱۱-۳-۲) نوع قطب سایه‌دار ۱۱۰
۱۱-۴) مزایا و معایب ۱۱۱
۱۱-۴-۱) مزایا ۱۱۱
۱۱-۴-۲) معایب ۱۱۱
۱۱-۵) سنجش انرژی بوسیله دستگاه القایی ۱۱۲
۱۱-۵-۱) سیستم محرک ۱۱۳
۱۱-۵-۲) سیستم متحرک
۱۱۳
۱۱-۵-۳) سیستم ترمز ۱۱۳
۱۱-۵-۴)سیستم ثبت (شمارش) ۱۱۴
۱۱-۶) سنجش توان و انرژی سه فاز ac ۱۱۴

فصل دوازدهم – پلهای اندازه‌گیری ۱۱۵
۱۲-۱) معرفی ۱۱۵
۱۲-۲)پلهای تعادلی ۱۱۵
۱۲-۲-۱) پل وتستون ۱۱۵
۱۲-۲-۲) خطاهای پل وتستون ۱۱۶
۱۲-۲-۳) حساسیت پل وتستون ۱۱۶
۱۲-۲-۴) پل کلوین ۱۱۶
۱۲-۲-۵) تعیین محل اتصالی کابل و زمین ۱۱۸
۱۲-۳) پلهای تعادلی ac ۱۱۸
۱۲-۳-۱) پل اندازه‌گیری خازن ۱۱۹
۱۲-۳-۲) پل اندازه‌گیری سلف ۱۲۰
۱۲-۳-۳) پل ماکسول (اندازه‌گیری اندوکتانس مجهول با استفاده از خازن معلوم) ۱۲۰
۱۲-۳-۴) پل هی (اندازه‌گیری RL سری با Q بزرگ) ۱۲۱
۱۲-۳-۵) پل شرینگ برای اندازه‌گیری خازن با مقاومت سری خیلی کوچک ۱۲۱
۱۲-۳-۶) پل وین برای اندازه‌گیری فرکانس مجهول ۱۲۲
۱۲-۳-۷) پل هوی‌ساید برای اندازه‌گیری اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ ۱۲۲

فصل سیزدهم – دستگاهها و روشهای اندازه‌گیری فرکانس ۱۲۵
۱۳-۱) فرکانس سنج با تشدید مکانیکی ۱۲۵
۱۳-۲) فرکانس‌سنج با تشدید الکتریکی ۱۲۶
۱۳-۲-۱) دستگاه فرودینامیکی ۱۲۶

۱۳-۲-۲) فرکانس‌سنج الکترودینامیکی ۱۲۶

۱۳-۳) فرکانس‌سنج وتستون ۱۲۷
۱۳-۴) فرکانس‌سنج تناسبی ۱۲۸
۱۳-۵) فرکانس‌سنج با هسته اشباع‌پذیر ۱۲۹
۱۳-۶) سنجش هارمونیکها ۱۳۰
۱۳-۶-۱) تعیین طیف سیگنال در محدوده صوتی ۱۳۰
۱۳-۶-۲) تعیین طیف سیگنال با باند عریض ۱۳۰
۱۳-۶-۳) آنالیزر فوریه ۱۳۱
۱۳-۶-۴) تعیین دامنه یک فرکانس معین ۱۳۱

فصل چهاردهم – معرفی مختصر دستگاههای اندازه‌گیری دیجیتال ۱۳۲
۱۴-۱) معرفی ۱۳۲
۱۴-۲) ویژگیهای دستگاههای اندازه‌گیری دیجیتال ۱۳۲
۱۴-۳) فرآیند اندازه‌گیری در دستگاههای مالتی‌متر دیجیتال ۱۳۳
۱۴-۴) مبدل A/D یک شیبی ۱۳۴
۱۴-۵) مبدل A/D دو شیبی ۱۳۴
۱۴-۶) مبدل A/D با تبدیل ولتاژ به فرکانس ۱۳۶
۱۴-۷) بلوک دیاگرام یک مالتیمتر دیجیتال ۱۳۷

فصل پانزدهم – حسگرها و مبدلها ۱۳۸
۱۵-۱)معرفی ۱۳۸
۱۵-۲) مبدلهای جابجایی ۱۳۸
۱۵-۲-۱) پتانسیومترها ۱۳۸
۱۵-۲-۲) مبدلهای خازنی ۱۳۹
۱۵-۲-۳) مبدلهای رلوکتانسی ۱۴۰

فصل اول – اندازه‌گیری، اهمیت و کاربردها

۱-۱) اندازه‌گیری چیست؟

اندازه‌گیری با شمارش فرق دارد. در شمارش، اشیاء یا پدیده‌های تکرار شونده فقط از نظر تعداد مطرح می‌شوند اما اندازه‌گیری با "چگونگی‌ها" ی واقعی یا قراردادی (ملموس یا تعریف شده) سرو کار دارد. نیاز بشر به مقایسه شدت و ضعف این "چگونگی‌ها" در اشیاء و پدیده‌ها، باعث تعریف واحدهای قراردادی شده است. این واحدها یا معیارها برای سنجش کیفیات مورد نظر بکار می‌روند. سنجش کیفیت‌ها بوسیله واحدهای قراردادی و نسبت دادن عدد به کیفیت مورد نظر، همان "اندازه‌گیری" است.

پس، اندازه‌گیری توصیف کمّی (عددی) یک چگونگی در یک شی یا در یک پدیده است. البته این چگونگی یا مستقیماً بوسیله حواس قابل درک است، (همانند دما) یا خود نیز قراردادی است. (مثل ولتاژ)

در اثر کثرت استعمال برخی از واحدهای قراردادی و به عبارت بهتر در اثر تکرار توصیف کمی برخی از چگونگی‌ها (مثل طول، وزن و ...) هم اکنون آنها را کمیت می‌دانیم. در حالیکه اگر از ابتدا فرضاً برای "خستگی" هم توصیف کمی مناسبی پیدا و استعمال می‌شد، امروزه خستگی را نیز یک کمیت می‌دانستیم. کما اینکه هم اکنون برای "هوش" نیز همانند یک کمیت واقعی، واحد تعریف می‌شود، سنجیده می‌شود، و اعدادی به آن نسبت داده می‌شود!

در علم تجربی و دانش امروز بشر توصیف کمی چگونگی‌ها زیر بنا است. به گفته یکی از دانشمندان ایرانی معاصر [(1)] "فیزیک علم کمیت‌ها است" و نیز به نقل از گالیله: "آنچه را که قابل شمارش است بشمارید، آنچه را که قابل اندازه‌گیری است اندازه‌گیری کنید، و آنچه را که غیر قابل اندازه‌گیری است. قابلیت اندازه‌گیری بدهید."

۱-۲) چگونه اندازه‌گیری می‌کنیم؟

دو جنبه اساسی در پیدایش اندازه‌گیری عبارتند از:

* تعیین واحد برای توصیف کمی یک کیفیت
* تعیین روش (و دستگاه) برای اندازه‌گیری کمیت موردنظر

۱-۳) کمیتهای مرجع

مقدار یک کمیت با مقایسه کمیت مرجع یا " واحد" یا "معیار" اندازه‌گیری مورد نظر، سنجیده می‌شود. در جهان امروز کمیات مرجع یا استاندارد نیاز به یک تعریف و توافق بین المللی دارند. هم اکنون برای کمیت‌های فیزیکی این توافق انجام شده و واحدهای سیستم بین‌المللی، SI، تعاریف معینی دارند. این واحدها به واحدهای اصلی و فرعی تقسیم می‌شوند. در واقع کمیات تعریف شده فیزیکی همگی از هم مستقل نیستند و تقسیم‌بندی فرعی و اصلی نیز به

(۱): آقای دکتر صمد فرخی – استاد گروه فیزیک دانشگاه تهران و یکی از موسسین رآکتور هسته‌ای تحقیقاتی دانشگاه تهران که بعدها به سازمان انرژی اتمی ایران تبدیل شد.

همین دلیل است. هفت واحد یا کمیت مبنا (اصلی) هم اکنون مورد توافق قرار گرفته‌اند که عبارتند از:

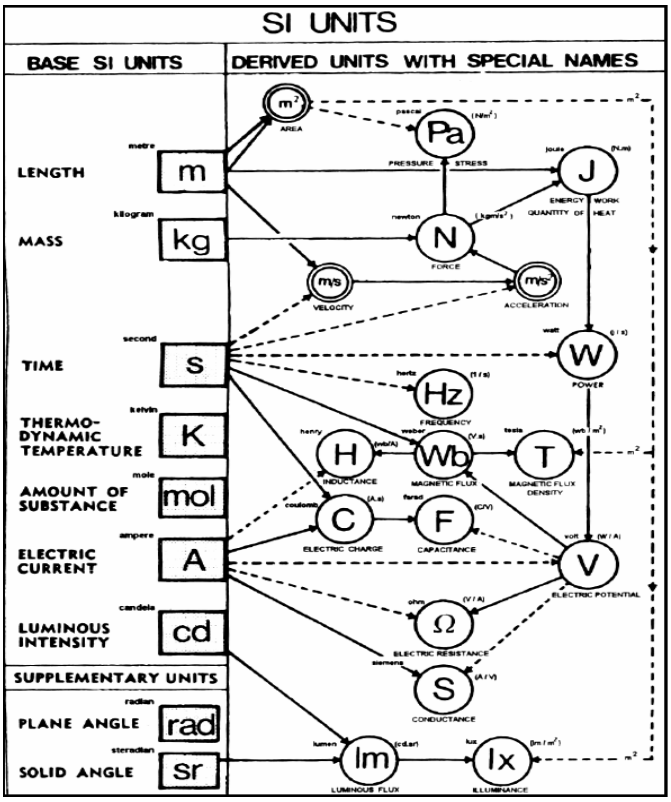
ردیف	نام کمیت	علامت	اسم واحد	نماد واحد
۱	طول، مکان، مسافت، جابجایی	l	متر	m
۲	جرم	m	کیلوگرم	kg
۳	زمان	t	ثانیه	S
۴	درجه حرارت	T	درجه کلوین	°K
۵	شدّت نور		شمع (candela)	Cd
۶	جریان الکتریکی	I	آمپر	A
۷	مقدار ماده خالص		مل(ملکول گرم)	mol
(واحدهای زاویه مسطحه (رادیان) و زاویه فضایی (استرادیان) نیز مورد بحث هستند.)				

ادعا اینست که کلیه کمیت‌های فیزیکی تعریف شده دیگر، از کمیات فوق مشتق می‌شوند. برخی از کمیتهای فرعی عبارتند از:

ردیف	نام کیفیت	علامت	اسم واحد	نماد واحد
۱	اختلاف پتانسیل الکتریکی یا نیروی محرکه الکتریکی	V	ولت	V
۲	بار الکتریکی	Q	کولمب	C
۳	مقاومت الکتریکی	R	اهم	Ω
۴	ظرفیت الکتریکی	C	فاراد	F

انرژی (ژول) – توان (وات)- نیرو (نیوتن) – فرکانس (هرتز) – روشنایی (لوکس) – شار نوری (لومن) شار مغناطیسی (وبر) - چگالی شار مغناطیسی (تسلا) –فشار (پاسکال)

جدول صفحه بعد نحوه اشتقاق کمیتهای فرعی از کمیتهای مبنا را نشان می‌دهد. به عنوان تمرین، با استفاده از این جدول تعریف واحدهای V (ولت)، C (کولمب) را بر حسب واحدهای اصلی بدست آورید.



واحدهای دستگاه SI دارای اجزاء و اضعاف تعریف شده دهدهی (اعشاری) هستند:

مقدار ضریب	نماد	پیشوند
10^{18}	E	Exa
10^{15}	P	Peta
10^{12}	T	Tera
10^{9}	G	Giga
10^{6}	M	Mega
10^{3}	K	Kilo
10^{2}	H	Hecto
10^{1}	Da	Deca
10^{-1}	d	Deci
10^{-2}	c	Centi
10^{-3}	m	Milli
10^{-6}	µ	Micro
10^{-9}	n	Nano
10^{-12}	p	Pico
10^{-15}	f	Femto
10^{-18}	a	Atto

۱-۴) کالیبره‌سازی (مدرج نمودن) دستگاه

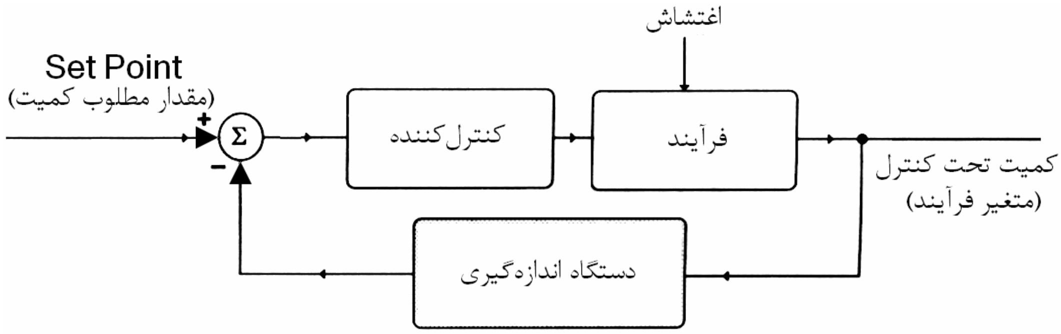
سیستم یا دستگاه اندازه‌گیری می‌بایست، با استفاده از مراجع استاندارد، مدرج (کالیبره) گردد. برای این کار عملکرد و عکس‌العمل دستگاه در قبال یک مجموعه از کمیت‌های معیین ثبت می‌گردد (در واقع یک تناظر یک به یک بین عملکرد دستگاه و کمیت موردنظر حاصل می‌شود.) و سپس دستگاه در معرض کمیت مجهول قرار گرفته و با توجه به عکس‌العمل دستگاه مقدار کمیت مجهول بدست می‌آید.

بدیهی است تناظر عکس‌العمل دستگاه به ورودی در دو مرحله فوق‌الذکر می‌بایست تضمین شود. یکی از مهمترین مسائل در کالیبراسیون همین است که احیاناً شرایط و پدیده‌های مختلفی علاوه بر کمیت موردنظر ما در عکس‌العمل دستگاه تاثیر دارند و ممکن است این تاثیرات در هنگام کالیبره‌سازی و در هنگام اندازه‌گیری یک کمیت مجهول یکسان نباشند. در واقع هنر سازنده در اینست که این موارد را بشناسد و اثر آنها را حتی الامکان خنثی سازد و یا جبران‌سازی مناسب انجام دهد. دقت کنید که دستگاه در هنگام کالیبره‌سازی ممکن است پاسخ غیرخطی داشته باشد اما این موضوع مانع از ایجاد یک تناظر یک به یک بین ورودی و خروجی نخواهد شد.

۱-۵) کاربردهای اندازه‌گیری

۱- اندازه‌گیری کمیات جهت اطلاع (و احیاناً اقدام لازم!) (مثلاً دماسنج در اتاق کار، کنتور آب منزل و ...)

۲- اندازه‌گیری در یک سیستم کنترل فرآیند (سیستم فیدبک)



شکل (۱-۱) نمودار ساده یک سیستم فیدبک

۳- اندازه‌گیری به عنوان بخشی از مطالعات تجربی برای حل مسائل مهندسی و ارزیابی تئوریها

سئوال: اندازه‌گیریهایی که در آزمایشگاه مدار و اندازه‌گیری I انجام می‌دهید، از نوع کدام یک از کاربردهای فوق است؟

۱-۶) سیستم اندازه‌گیری

گفته شد که عکس‌العمل دستگاه در قبال کمیت مجهول، در کنار استفاده از مجموعه مدرج شده دستگاه، امکان اندازه‌گیری را فراهم می‌آورد. یک دستگاه اندازه‌گیری لزوماً دارای یک بخش نیست و معمولاً از بخشهای مختلفی تشکیل می‌شود که هر کدام وظایف مشخصی دارند و نهایتاً کار اندازه‌گیری و نمایش کمیت را انجام می‌دهند. از این رو غالباً به جای اینکه گفته شود "دستگاه اندازه‌گیری" کلمه "سیستم" را بکار می‌برند و آخرین بخش که وظیفه عکس‌العمل و نمایش را دارد "دستگاه" نامیده می‌شود.

به بیان دیگر، یک دستگاه اندازه‌گیری معمولاً نسبت به یک نوع ورودی مثلاً مکانیکی، الکتریکی، الکترونیکی و یا ... (با شرایط معین) پاسخگو است و بنابراین در بسیاری از موارد کمیت موردنظر مستقیماً توسط دستگاه مدرج شده ما قابل اندازه‌گیری نیست و لازم است کمیت برای استفاده دستگاه دچار تغییر و تحول شود. به طبقاتی که این آماده‌سازی را انجام می‌دهند، به همراه دستگاه اندازه‌گیری، "سیستم" اندازه‌گیری گفته می‌شود.

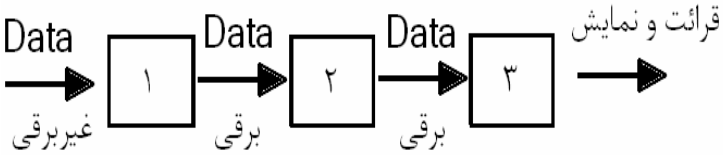
۱-۷) اندازه‌گیری الکتریکی

هنگامی که در یک سیستم اندازه‌گیری، آخرین طبقه (یعنی دستگاه اندازه‌گیری) نسبت به ورودی الکتریکی حساس و پاسخگو باشد، دستگاه اندازه‌گیری از نوع الکتریکی (یا الکترونیکی) خواهد بود و اندازه‌گیری در کل، اندازه‌گیری الکتریکی (یا الکترونیکی) نامیده می‌شود.

به نظر می‌رسد تفاوت بین دستگاههای الکتریکی و الکترونیکی ناشی از اجزاء، مقاومت ورودی، حساسیت، صحت، دقت، پیچیدگی، روشهای نمایشی و ... می‌باشد و ظاهراً تاکنون مرز مشخصی ارائه نشده است. می‌بینیم که دستگاهی مانند Wave Analyzer در سر فصلهای درس اندازه‌گیری الکتریکی توصیه می‌شود و در مقابل، در کتاب اندازه‌گیری الکترونیکی از گالوانومتر دارسونوال نیز صحبت شده است!

۱-۸) اجزاء یک سیستم اندازه‌گیری الکتریکی

بدیهی است مجموعه کمیات فیزیکی که نیاز به اندازه‌گیری آنها داریم بسیار فراتر از کمیات الکتریکی است و علاوه بر این، هر دستگاه اندازه‌گیری الکتریکی قادر نخواهد بود که کلیه کمیتهای الکتریکی و حتی یک کمیت معین بدون شرایط ویژه را اندازه‌گیری کند. طبقاتی که برای یک سیستم اندازه‌گیری عام در بند (۱-۶) برشمرده شد در یک سیستم اندازه‌گیری الکتریکی نیز معمولاً ضرورت دارند. اجزاء سیستم اندازه‌گیری الکتریکی را به صورت خلاصه شده زیر معرفی می‌کنیم:



۱- سنسور یا ترانسدیوسر که برای تبدیل کمیت غیربرقی به کمیت برقی (الکتریکی) بکار می‌رود.

۲- تغییردهنده یا پردازشگر (تقویت، تضعیف، یکسوسازی، تزویج، مدولاسیون، دمدولاسیون، چهار عمل اصلی، برش، ایجاد سطح dc، حذف هارمونیکها، فیلتر کردن طیف فرکانس و ...)

۳- دستگاه اندازه‌گیری که عمل اندازه‌گیری در آن انجام گرفته و داده برقی به اطلاعات قابل نمایش تبدیل می‌شود.

باید توجه داشت از یک سنسور معین می‌توان برای سنجش کمیات متفاوتی بهره جست. مثلاً سنسور حساس به کرنش برای سنجش حجم، فشار، شتاب، فلو، جابجایی، حرارت، قابل استفاده است. به عنوان یک مثال دیگر، سنسورهای حساس به جابجایی (فرضاً یک مقاومت متغیر) به همراه ابزارهای مناسب پیرامونی، می‌توانند اطلاعات برقی لازم برای سنجش بسیاری از کمیات مکانیکی را توسط دستگاه الکتریکی فراهم کنند.

۱-۹) روش تفاوتی و روش تعادلی

بسیاری از دستگاههای اندازه‌گیری از نقطه نظر روش اندازه‌گیری به دو دسته انحرافی (تفاوتی) و تعادلی تقسیم می‌شوند.

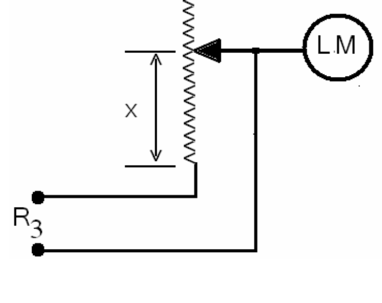
۱- **دستگاههای اندازه‌گیری با روش انحرافی** – در این دستگاهها سنجش کمیت ورودی با اندازه‌گیری تغییر در خروجی دستگاه نسبت به وضعیت اولیه انجام می‌شود. این تغییر از وضعیت اولیه (انحراف) می‌تواند مکانیکی باشد (همانند نشان دهنده‌های عقربه‌ای) و یا انحراف در یک کمیت الکتریکی مثل جریان، ولتاژ و غیره. در این دستگاهها با مشخص نمودن رابطه بین تغییرات خروجی و ورودی می‌توان دستگاه را مدرج نمود. دستگاههای اندازه‌گیری الکتریکی عموماً از این نوع هستند.

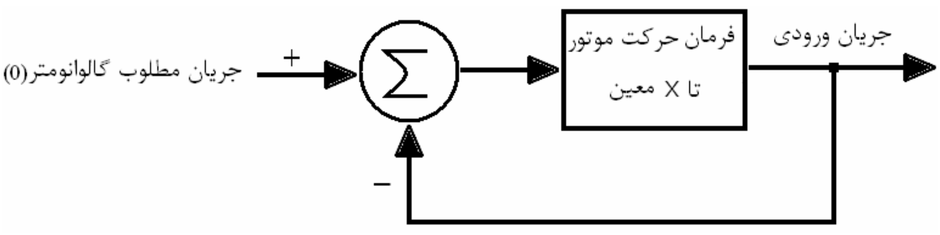
۲- **دستگاههای اندازه‌گیری با روش تعادلی**– در این دستگاهها هرگونه تغییر ناشی از کمیت ورودی، توسط یک عامل خارجی دیگر، خنثی شده، حالت تعادل توسط یک آشکارساز نشان داده می‌شود. در واقع، در اندازه‌گیری با این دستگاه، دو مرحله متمایز لازم است: یکی، آشکارسازی حالت تعادل است که نیاز به درجه‌بندی هم ندارد و باید در نوع خود از حساسیت زیادی برخوردار باشد. مرحله دوم تعیین مقدار و میزان عامل خارجی بکار رفته جهت ایجاد تعادل است.

مثال روشنی از این نوع دستگاه، ترازوی دو کفه‌ای است. در اینجا در مرحله اول دقت فروشنده کالا برای تعیین حالت تعادل لازم است و در مرحله دوم صحت وزنه‌های بکاررفته جهت توزین (یا همان ایجاد حالت تعادل) و آگاهی به مقدار آنها برای اندازه‌گیری دقیق و صحیح، ضروری خواهد بود.

در مقایسه دو روش فوق مزایا و معایبی برای هرکدام قابل بیان است. در اندازه‌گیری تعادلی دو مزیت وجود دارد: ۱- کمیت مورد سنجش مستقیماً با یک کمیت شناخته شده از همان جنس مقایسه می‌شود و بنابراین میزان درستی نتیجه معمولاً بیشتر از حالت انحرافی است که نیاز به کمیت واسطه دارند. (مقایسه کنید، یک ترازوی یک کفه‌ای که ابتدا باید فنر دستگاه توسط وزنه‌های استاندارد مدرج گردد و درستی نتیجه تابعی از درستی درجه‌بندی فنر و ثابت بودن مشخصات آن خواهد بود. در حالیکه در ترازوی دو کفه‌ای درستی نتیجه منوط به آگاهی از وزن وزنه‌های تعادل است.) ۲- در اندازه‌گیریهای تعادلی به دلیل حذف یک سیستم واسطه و انحراف حداقل خروجی دستگاه (چون اندازه‌گیری در حالت تعادل انجام می‌گیرد) امکان غیرخطی شدن سیستم (مثلاً اشباع شدن هسته مغناطیسی یا کشیده شدن بیش از حد فنر نیروسنج) بسیار کمتر است و لذا دقت اندازه‌گیری نیز بیشتر خواهد بود.

یکی از نقاط ضعف روش تعادلی محدودیت آن در اندازه‌گیری کمیت‌هایی است که با سرعت نسبی زیاد در حال تغییرند. به عبارت دیگر یک سیستم تعادلی معمولاً زمان بیشتری را جهت اندازه‌گیری لازم دارد و بنابراین نمی‌تواند به سرعت متغیر ورودی را دنبال کند. در عمل، با خود کار کردن (اتوماسیون) فرآیند ایجاد تعادل از طریق فیدبک، سرعت دستگاه تا حد زیادی بهبود می‌یابد. به عنوان مثال در یک پل وتستون که برای سنجش یک مقاومت مجهول بکار می‌رود، می‌توان تغییرات مقاومت R_3 (که نقش وزنه تعادل را دارد) را توسط سیستم اتوماتیک انجام داد.





بنابراین، به طور خلاصه، دستگاههای انحرافی دارای سرعت بیشتر و در عوض صحت و دقت کمتر هستند و با استفاده از اتوماتیک کردن فرآیند ایجاد تعادل می‌توان سرعت دستگاههای تعادلی را بهبود بخشید.

۱-۱۰) دستگاههای قیاسی و دستگاههای رقمی

تقسیم‌بندی دیگری که در مورد دستگاههای اندازه‌گیری انجام می‌شود تقسیم‌بندی به نوع قیاسی (آنالوگ) و رقمی (دیجیتال) است. در دستگاههای آنالوگ زاویه یا طول و کلاً میزان انحراف عقربه یا شاخص تابعی است از کمیت تحت اندازه‌گیری و از یک دیدگاه دیگر، نمایش خروجی دستگاه به صورت یک کمیت پیوسته است. اما در دستگاههای رقمی یا دیجیتال مقدار کمیت مورد نظر به صورت یک عدد روی صفحه دستگاه نمایش داده می‌شود. در واقع لزومی ندارد که اعداد روی صفحه نمایش تغییر کنند بلکه حرکت غیر پیوسته شاخص از یک عدد به عدد دیگر روی صفحه نیز، دستگاه را از نوع رقمی خواهد ساخت.

در یک دستگاه اندازه‌گیری الکتریکی، که ورودی غالباً یک کمیت الکتریکی از نوع آنالوگ است، وجود یک سیستم تبدیل A/D برای ساخت دستگاه دیجیتال ضروری است و پس از آن قرائت رقمی امکان‌پذیر خواهد بود. (سیستم A/D: سیستم تبدیل کننده کمیت آنالوگ به دیجیتال)

سئوال ۱- یک آمپرمتر که مقدار جریان را به صورت اعداد اعشاری در یک نمایشگر کریستال مایع (LCD) نمایش می‌دهد از نوع انحرافی یا تعادلی است؟

سئوال ۲- یک کنتور انرژی الکتریکی که در منازل نصب می‌شود از نوع قیاسی یا رقمی است؟ در مورد انحرافی یا تعادلی بودن آن چه نظری دارید؟

سئوال ۳- اگر پاسخ به قسمت اول سئوال ۲ این باشد که دستگاه رقمی است، تبدیل آنالوگ به دیجیتال در کدام بخش از دستگاه صورت می‌گیرد؟

فصل دوم – مشخصه‌های استاتیک دستگاهها و سیستمهای اندازه‌گیری

۲-۱) تعریف مشخصه (ویژگی)

هر دستگاه یا سازمان (سیستم – ماشین – مجموعه و ...) دارای ورودی‌ها و خروجیهای معینی است. رابطه بین کمیت ورودی و کمیت خروجی مشخصه دستگاه یا سیستم نامیده می‌شود. به عبارت دیگر مشخصه، ویژگی و یا وجه تمایز هر سیستم یا مجموعه، همان نحوه عملکرد سیستم بر ورودی‌ها است. (البته توجه داشته باشیم که در بسیاری از موارد تعیین ورودی و خروجی قراردادی است یعنی می‌توان جای این دو را عوض کرد.) مثلاً یکی از مشخصه‌های یک ژنراتور DC رابطه‌ای است که بین I_f و V_t به عنوان ورودی و خروجی آن وجود دارد. یکی دیگر از مشخصه‌های این دستگاه رابطه بین جریان بار و ولتاژ بار در حالت بارگیری از ژنراتور است. بنابراین می‌توان برای یک دستگاه یا سیستم، بسته به نقطه نظر مورد علاقه و یا شرایط کاربرد آن دستگاه مشخصه‌های متعددی تعریف نمود.

۲-۲) مشخصه‌های دینامیک و استاتیک دستگاه اندازه‌گیری

در حالیکه ورودی ثابت و یا دارای تغییرات بسیار کندی است و سیستم (دستگاه) به حالت پایدار خود رسیده است و به عبارت بهتر هنگامی که استفاده از سیستم به زمان بستگی ندارد، می‌توان معیارها و مشخصه‌هایی را تعریف نمود که کیفیت و ارزش اندازه‌گیری را به روشنی توصیف کنند. این معیارها را معیارها (و یا مشخصه‌ها)ی استاتیکی (ایستایی) سیستم یا دستگاه اندازه‌گیری می‌نامند.

بدیهی است، در مقابل، در بسیاری از اندازه‌گیریها، با کمیتهای سریعاً متغیر سر و کار داریم و در این موارد بایستی روابط دینامیکی (پویایی) موجود بین ورودی و خروجی را بررسی کنیم. این گونه توصیفها معمولاً در برگیرنده معادلات دیفرانسیل هستند. معیارهای کارکرد (یا ویژگیهای عملکردی) مبتنی بر روابط دینامیکی، مشخصات دینامیکی سیستم را تشکیل می‌دهند.

۲-۳) مشخصه‌های استاتیک سیستم اندازه‌گیری

مشخصه‌های متعددی برای یک سیستم اندازه‌گیری در حالت استاتیک تعریف شده‌اند که هرکدام گویای یک نوع علاقه و یا نیاز بهره‌بردار به ارزیابی نتایج اندازه‌گیری است. برخی از این مشخصه‌ها عبارتند از:

صحت یا درستی (Accurary)، حساسیت (Sensitivity)، قدرت تفکیک (Resolution)، تکرار پذیری (Repeatability)، دقت (Precision)، خطی بودن (Linearatiy)، پسماند (Hysteresis) و ناحیه مرده (Dead Zone)

۲-۴) صحت یا درستی

"صحت" معیاری است برای سنجش اختلاف بین مقدار خوانده شده از دستگاه با مقدار حقیقی کمیت اندازه‌گیری شده و یا با مقدار "درست" کمیت اندازه‌گیری شده. مقدار حقیقی را هیچگاه نمی‌توان از طریق اندازه‌گیری بدست آورد. راههایی برای گریز از این پارادوکس پیشنهاد شده است.

در تئوری: " مقدار واقعی کمیت برابر است با میانگین بینهایت مقدار اندازه‌گیری شده، در حالیکه انحراف میانگین به سمت صفر میل کند."

در عمل: کمیتی که با استفاده از روش نمونه بدست آمده باشد –روش نمونه روشی است که متخصصین امر به اتفاق کفایت آنرا برای کاربرد مورد نظر تایید کنند.

بدین معنا صحت و خطا دو تعریف معکوس و کاملاً وابسته به هم دارند. اما به طور سنتی (به چه دلیل؟) همواره محاسبات و آنالیزهای آماری و ریاضی در مورد "خطا" صورت گرفته است. بنابراین ما نیز توجه خود را به معیار "خطا" معطوف می‌کنیم.

۲-۵) خطا

اگر مقدار واقعی کمیت را At و مقدار خوانده شده را Am بگیریم در آن صورت تعاریف متعددی از خطا داریم که عبارتند از:

خطای مطلق:

$$\varepsilon_0 = \delta_A = A_m - A_t \qquad (۲-۱)$$

مفهوم خطای مطلق ارزیابی مناسبی از اندازه‌گیری بدست نمی‌دهد. مثلاً در اندازه‌گیری جریان ۱۰۰۰A خطای ۲A± ناچیز است در حالیکه در اندازه‌گیری جریان ۱۰A همین خطا غیرقابل قبول می‌شود. بنابراین کیفیت اندازه‌گیری به وسیله خطای استاتیک نسبی (ε_r) تعریف می‌شود.

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_A}{A_t} = \frac{A_m - A_t}{A_t} \qquad (۲-۲)$$

و درصد خطای استاتیک نسبی:

$$\varepsilon_r\% = \varepsilon_r \times 100 \qquad (۲-۳)$$

با یک جایگزینی ساده خواهیم داشت:

$$A_t = \frac{A_m}{1+\varepsilon_r} \qquad (۲-۴)$$

و اگر $\varepsilon_r \langle\langle 1$ باشد خواهیم داشت:

$$A_t = A_m(1-\varepsilon_r) \qquad (۲-۵)$$

صحت نسبی = ۱ – خطای نسبی (۲-۶)

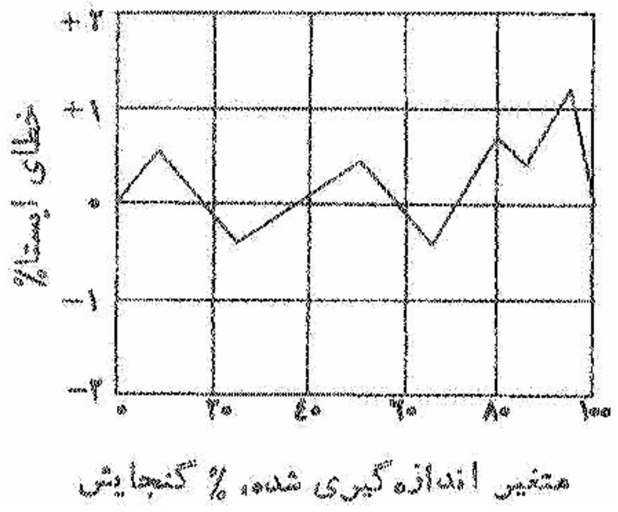
گاهی نیز خطای نسبی بر حسب کمیت متناظر با انحراف حداکثر محاسبه می‌شود. یعنی در مخرج کسر به جای A_t خروجی حداکثر را قرار می‌دهند:

$$\varepsilon_r = \frac{A_m - A_t}{A_{max}} \qquad (۷-۲)$$

تبصره: خطا و صحت نسبی و درصد، فقط در هنگامی که مخرج کسر مخالف صفر باشد تعریف می‌شوند.

بنابراین یک سیستم یا دستگاه اندازه‌گیری و یا یک فرآیند اندازه‌گیری را صحیح می‌دانیم هرگاه خطای نسبی آن کوچک (نزدیک به صفر) و یا صحت نسبی آن بزرگ (نزدیک به ۱) باشد. در مورد منابع خطا (عوامل بروز خطا) بررسی ریاضی و تجزیه و تحلیل آماری خطا و روشهای جبرانسازی خطا در فصل سوم صحبت خواهیم کرد.

در دستگاههایی که میزان خطای اندازه‌گیری از قبل توسط سازنده قابل تعیین می‌باشد، می‌توان این اطلاعات را به همراه دستگاه به استفاده کننده گزارش کرد تا در اندازه‌گیریهای بعدی برای افزایش صحت نتیجه از آن کمک بگیرد. معمولاً این اطلاعات بصورت ترسیمی و به نام منحنی کالیبره‌سازی خطا ارائه می‌شود. یک نمونه منحنی در شکل (۲-۱) داده شده است. گنجایش مقیاس طبق تعریف فاصله بین کمترین عدد و بیشترین عدد روی مقیاس ($x_{max} - x_{min}$) و گستره بیانگر مقدار ماکزیمم مقیاس دستگاه می‌باشد (x_{max}).



شکل (۲-۱) یک نمونه منحنی کالیبره‌سازی خطا

۲-۶) حساسیت

حساسیت استاتیک هر دستگاه یا سیستم اندازه گیری برابر است با نسبت اندازه سیگنال (یا پاسخ) خروجی به اندازه سیگنال ورودی یا کمیت اندازه‌گیری شونده. واحد حساسیت به تعریف خروجی و ورودی بستگی دارد (مثلاً شمارش بر ولت, میلی متر بر میلی آمپر و ...). گاهی نیز حساسیت به صورت معکوس بیان می شود یعنی نسبت اندازه کمیت اندازه‌گیری شونده به اندازه پاسخ. این نسبت را ضریب انحراف و یا حساسیت معکوس نیز نامیده‌اند. بسیاری از سازندگان حساسیت اسبابهایشان را بر حسب حساسیت معکوس بیان می کنند و با این حال آن را حساسیت می‌نامند.

با توجه به اینکه انتظار نداریم همواره برای تمام دستگاهها و سیستمها رابطه ورودی، خروجی خطی باشد حساسیت ایستا را برای نقطه کار معین تعریف می‌کنیم.

$$\text{حساسیت استاتیک} = \frac{dq_0}{dq_i} = \frac{\text{تغییر بسیار کوچک خروجی}}{\text{تغییر بسیار کوچک ورودی}} \qquad (۸-۲)$$

و بنابراین

$$\text{ضریب انحراف}=\frac{dq_i}{dq_0} \qquad (۸-۲)$$

در سیستمی که رابطه ورودی – خروجی خطی است به جای dq_i و dq_o میتوان کل محدوده تغییرات یا قسمت بزرگی از آن یعنی Δq_o و Δq_i را در نظر گرفت.

مثال – در یک پل وتستون برای تغییر 3mm در انحراف عقربه گالوانومتر باید مقاومت بازوی مجهول 7Ω تغییر کند حساسیت و ضریب انحراف را تعیین کنید:

$$\text{ضریب انحراف} = \frac{7.\Omega}{3.mm} = 2.33\Omega / mm$$

$$\text{حساسیت} = \frac{3.mm}{7.\Omega} = 0.429 mm / \Omega$$

مثال – لوله موبین یک دماسنج جیوه‌ای به قطر ۰/۲۵ mm است. اگر لوله از ماده ای با ضریب انبساط صفر ساخته شده و حساسیت برابر ۲/۵ mm/ºC و دمای کار ۲۰ºC باشد، حجم لوله را حساب کنید.

ضریب انبساط حجمی جیوه را $0.181\times10^{-3} /^{o} C$ بگیرید.

حل: چون لوله دارای ضریب انبساط صفر است طول و حجم آن تغییر نمی‌کند و تنها طول ستون جیوه تغییر خواهد کرد. بنابراین ورودی عبارتست از افزایش دما و خروجی افزایش ستون جیوه و حساسیت عبارت خواهد بود از:

$$S = \frac{\Delta q_o}{\Delta q_i} = \frac{(L_c + \Delta L_c) - L_c}{\Delta T} = \frac{\Delta L_c}{\Delta T} = 2.5 mm /^{o} C$$

از سوی دیگر اگر فرض کنیم مقطع لوله موئین A_c و ضریب انبساط حجمی جیوه α_v باشد خواهیم داشت.

$$A_c (L_c + \Delta L_c) = A_c (L_c + \alpha_v L_c \Delta T) \Rightarrow L_c = \frac{1}{\alpha_v} . \frac{\Delta L_c}{\Delta T}$$

$$L_c = \frac{1}{0.181\times10^{-3}} \times 2.5 = 13.8\times10^{3} mm$$

$$\text{حجم لوله} = A_c L_c = 680 mm^3$$

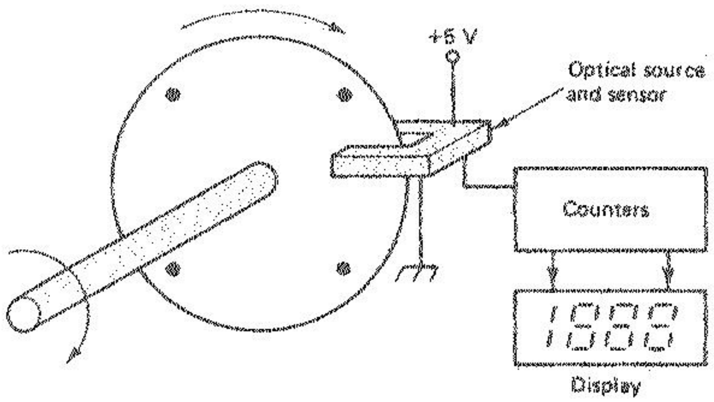
۷-۲) قدرت تفکیک (تمایز)

این کمیت مشخص کننده حداقل تغییرات لازم در ورودی جهت ایجاد یک تغییر قابل مشاهده در خروجی می‌باشد. هرگاه ورودی از یک مقدار معین (صفر یا غیر صفر) به آرامی شروع به تغییر نماید، در می‌یابیم که مقدار حداقلی تغییر وجود دارد که به ازای مقادیر کمتر از آن تغییر قابل مشاهده‌ای در خروجی ظاهر نمی‌گردد.

هنگامی که ورودی از صفر شروع به تغییر کند، این مقدار حداقل را "آستانه" و هنگامی که ورودی غیر صفر باشد، حداقل تغییر لازم برای عکس‌العمل قابل مشاهده دستگاه را "تفکیک یا تمایز" دستگاه می‌خوانند. بدیهی است واحد این کمیت از جنس کمیت ورودی است.

شکل ۲-۱ یک وسیله ساده برای اندازه گیری موقعیت یک محور را نشان می‌دهد. روی دیسک متصل به محور چهار سوراخ تعبیه شده است و با چرخش محور و عبور سوراخها از متقابل یک فرستنده و گیرنده نوری ، پالسهایی تولید می‌شود که با شمارش آنها میتوان موقعیت محور را مشخص نمود. از آنجا که محور باید حداقل ۹۰º بچرخد تا موقعیت جدید ثبت گردد، قدرت تفکیک دستگاه ۹۰º است.

resolution = 2^n



شکل (۲-۲) یک ترانسدیوسر (مبدل) دیجیتالی موقعیت

سئوال – اگر بخواهیم قدرت تفکیک دستگاه ۰,۱ درجه باشد چند سوراخ روی دیسک باید ایجاد شود؟

مثال – یک ولت سنج با قاب گردان مقیاس یکنواختی با ۱۰۰ درجه تقسیم دارد. ماکزیمم ولتاژ قابل اندازه گیری ۲۰۰ ولت بوده و تقسیم‌بندی مقیاس به گونه‌ای است که تا $\frac{1}{10}$ درجه تقسیم مقیاس را می‌توان با قطعیت خوبی مشاهده کرد. تفکیک دستگاه را پیدا کنید:

حل - یک درجه تقسیم مقیاس: $\frac{200v}{100} = 2v$

تفکیک = $\frac{1}{10}$ درجه مقیاس $= \frac{1}{10} \times 2 = 0.2v$

مثال – در یک مبدل A/D ولتاژ هشت بیتی با محدوده ولتاژ ورودی ۰ تا ۵v قدرت تفکیک چقدر است؟ اگر این مبدل به یک سنسور حرارتی با خروجی ۱۰mv/ºC وصل شود قادر است یک سیستم اندازه‌گیری با قدرت تفکیک ۱ºC ارائه دهد یا خیر؟

حل - ۸ بیت ← $2^8 = 256$

یعنی مبدل قادر است محدوده مورد نظر را حداکثر ۲۵۶ قسمت کند ← درجه تفکیک $\frac{5v}{256} = 19.5mv$

10mv 1ºC
19.5mv X≈2ºC

پس قدرت تفکیک کل سیستم 2ºC است.

سئوال – راه‌حل شما برای اینکه قدرت تفکیک همان 1ºC باشد چیست؟

۸-۲) تکرار پذیری – دقت

این دو واژه گاهی به جای یکدیگر بکار می‌روند و در واقع معیاری هستند برای بیان میزان پراکندگی مقادیر اندازه‌گیری شده به ازای یک ورودی ثابت, بدیهی است هر چه میزان پراکندگی کمتر باشد دقت دستگاه بیشتر است.

باید دقت کرد که درستی (صحت) با دقت تفاوت دارد به عنوان مثال فرض کنید با یک اهم متر رقمی مقاومتی با مقدار حقیقی 692Ω را ۵ بار اندازه گیری کرده و نتایج 693.2، 693.1، 693.5، 692.9، 692.8 را بدست

آورده‌ایم در اینجا دقت دستگاه مناسب است اما صحت دستگاه خیر- (چه عواملی ممکن است باعث بروز این خطا شده باشد؟)

بنابراین ممکن است دقت دستگاه بسیار خوب باشد اما صحت آن مورد تردید واقع شود. از سوی دیگر ممکن است اهم‌متر دیگری نتایج پراکنده‌تر ولی صحیح تری ارائه دهد مثلاً (692، 691.3، 692.7، 692.5، 691.5). یعنی دستگاه ممکن است دقیق باشد و صحیح نباشد و یا بالعکس. مشکل دستگاههای دقیق غیر صحیح را می توان با جبرانسازی خطا، (در صورت نیاز به اندازه‌گیری کمیتهای مطلق) اصلاح نمود و یا حتی با همان ترتیب جهت اندازه گیریهای مقایسه ای بکار برد.تکرارپذیری (یا دقت) به عنوان یک کمیت دارای فرمولهای محاسباتی متفاوتی است که برخی از آنها عبارتند از:

$$\text{پراکندگی \%} = \frac{\text{حداکثر رقم قرائت شده - حداقل رقم قرائت شده}}{\text{خروجی حداکثر}} \times ۱۰۰ \qquad (۲\text{-}۱۰)$$

$$\text{تکرار پذیری \%} = \frac{\text{متوسط قرائت - بزرگترین انحراف نسبت به متوسط}}{\text{خروجی حداکثر}} \times ۱۰۰ \qquad (۲\text{-}۱۱)$$

$$\text{تکرار پذیری \%} = \frac{\text{انحراف استاندارد}}{\text{خروجی حداکثر}} \times ۱۰۰ \qquad (۲\text{-}۱۲)$$

$$\text{تکرار پذیری \%} = \frac{\text{انحراف استاندارد}}{\text{متوسط قرائت}} \times ۱۰۰ \qquad (۲\text{-}۱۳)$$

(انحراف استاندارد: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum^{n} di^2}{n}}$)

تبصره – در این فرمولها کوچک بودن درصد مهم است

۲-۹) ارقام با معنی Significant figures

یک نشانه دقت اندازه‌گیری تعداد ارقام با معنایی است که نتیجه اندازه‌گیری با آنها بیان می‌شود. هر چه تعداد ارقام با معنی بیشتر باشد دقت اندازه‌گیری بیشتر است. در واقع در اندازه‌گیری هر عدد را با ارقامی ثبت می‌کنیم که به درستی آنها اطمینان داریم. جز رقم آخر که تصور می‌شود نزدیکترین مقدار را به مقدار حقیقی دارد. بنابراین اگر فرضا ولتاژی را با عدد ۲۱۸ ولت مشخص کنیم معنی آن این است که ۳ رقم با معنا داریم و رقم ۸ رقم مشکوک اندازه‌گیری است و دقت دستگاه تا حد ۱ ولت است یعنی ولتاژ مورد نظر به ۲۱۸ نزدیکتر است تا به ۲۱۷ یا ۲۱۹. اما اگر همین کمیت را با ۲۱۸,۱ نمایش دهیم دارای چهار رقم با معنا هستیم و دقت دستگاه تا ۰,۱ ولت می‌باشد و مقدار ولتاژ به ۲۱۸,۱ نزدیکتر است تا ۲۱۸,۰ یا ۲۱۸,۲. در اینجا نیز رقم ۱ بعد از ممیز رقم مشکوک اندازه‌گیری است. میزان دقت یا رقم مشکوک را می‌توان به دو صورت مشخص کرد:

۱- نوشتن رقم آخر بصورت مورب (ایتالیک) مثلاً: 218.*1* ۲- نوشتن محدوده شک بعد از رقم 218.1±0.05

باید توجه داشت که آوردن بیش از یک رقم مشکوک بی‌فایده است. به همین دلیل در عملیات حسابی (جمع، تفریق، ضرب و تقسیم) می‌بایست ارقام زائد ورودی را حذف نماییم.

مثال – مقدار حاصل از اتصال متوالی (سری) سه مقاومت با مقادیر 72.3، 2.73 و 0.612 اهم را بدست آورید.

حل: $R = R_1 + R_2 + R_3 = 75.5642 \rightarrow R = 75.6$

مثال – ولتاژ و جریان ثبت شده در یک مدار dc به ترتیب برابرند با 12.16v و 1.34A، توان را حساب کنید.

حل: توان برابر است با حاصلضرب ولتاژ و جریان،پس داریم: $P = V.I = 12.16 \times 1.34 = 16.2944 \rightarrow P = 16.2$

یعنی ورود ارقام ۹، ۴ و ۴ در نتیجه اندازه‌گیری بی‌فایده است و تنها رقم ۲ به عنوان رقم مشکوک باقی می‌ماند.

۲-۱۰) خطی بودن و خطی سازی

یکی از مطلوبترین مشخصه‌های دستگاه یا سیستم اندازه‌گیری خطی بودن آن (به معنای تناسب خطی خروجی و ورودی) می‌باشد. به دلیل اینکه تعیین کمیت ورودی با ضرب خروجی در یک ثابت به مراتب آسانتر از مراجعه به منحنیها یا معادلات غیرخطی تعیین کننده رفتار سیستم است. از آنجا که معمولاً رفتار سیستم نمی‌تواند بطور کامل و دقیق خطی باشد از روش‌های تقریب خط راست استفاده می‌شود. بدیهی است که در این حالت باید مقداری خطا را بپذیریم. معمولاً این خطا را در هر اندازه‌گیری بر اساس درصد انحراف کل مقیاس خروجی (Percent of Full-Scale Output = %FSO) می‌سنجند.

یکی از روشهای تقریبی با اتصال نقاط ابتدا و انتهای اندازه‌گیری بدست می‌آید. در روش دیگر کلیه مقادیر را داخل دو خط راست موازی محصور کرده و خطی در وسط و به موازات این دو رسم می‌شود. این خط تقریب کننده "خط راست مستقل" نامیده می‌شود. در اینجا حداکثر خطای فاصله کمتر از روش اول است.

روش سوم تقریب خطی با حداقل مربعات خطا است. در این روش مشخصه را با خط راست به گونه‌ای تقریب می‌کنند که مجموع مربعات خطا کمترین مقدار را داشته باشد. این روش در مقایسه با دو روش قبل خطای کمتری در بر دارد. جهت تعیین ضرایب خط راست مزبور به روش ذیل عمل می‌شود:

$$m = \frac{n\sum(xy) - \sum x \sum y}{n\sum x^2 - \left(\sum x\right)^2} \qquad (۲-۱۴)$$

$$b = \frac{\sum y - m\sum x}{n} \qquad (۲-۱۵)$$

x_i, y_i مقادیر ورودی و خروجی

n : تعداد داده‌ها

m : شیب خط راست

b : عرض از مبدا خط (محل تقاطع خط با محور y)

برای بیان کمیتی که میزان خطی بودن سیستم را نشان دهد " درصد حداکثر انحراف از خط راست" را به صورت ذیل تعریف می‌کنند:

$$\text{درصد انحراف از خط راست} = \frac{\text{بیشینه انحراف}}{\text{انحراف تمام مقیاس}} \times ۱۰۰ \qquad (۲-۱۶)$$

مطلوب آن است که این درصد تا حد ممکن کم باشد تا خطا در خروجی سیستم کاهش یابد.

تبصره - در بعضی از موارد تقریب خطی عملکرد سیستم یا دستگاه به دلیل ایجاد خطا مورد قبول نبوده و باید مدل دقیقتری از سیستم را بدست آورد. روشهای تقریب چند جمله‌ای یا تقریب خطی تکه‌ای از جمله این روشها هستند.

مثال – یک مقاومت متغیر ۱۰۰۰۰ اهمی با درصد انحراف از خط راست ۰٫۱ در دسترس است و جابجایی بازوی اتصال °۳۲۰ می‌باشد.

الف- بیشینه انحراف موضع را بر حسب درجه و انحراف مقاومت را بر حسب اهم پیدا کنید.

ب- اگر این مقاومت باید به صورت پتانسیومتری با مقیاس خطی ۰ تا ۱٫۶ ولت بکار رود بیشینه خطای ولتاژ را پیدا کنید.

حل – الف

$$\text{ماکزیمم انحراف موضع} = \frac{\text{انحراف تمام مقیاس} \times \text{درصد انحراف در خط راست}}{۱۰۰} = \frac{0.1 \times 320^\circ}{100} = 0.32^\circ$$

$$\text{ماکزیمم انحراف مقاومت} = \frac{0.1 \times 10{,}000}{100} = 10\Omega$$

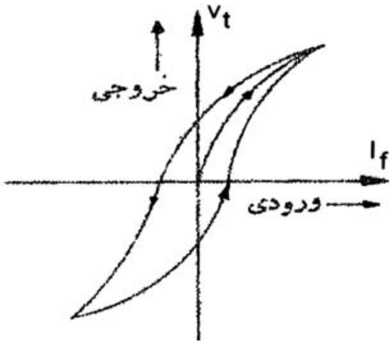
ب – جابجایی °۳۲۰ متناظر با ۱٫۶v است بنابراین °۰٫۳۲ متناظر است با

$$\text{ماکزیمم خطای ولتاژ} = 0.32^\circ \times \frac{1.6V}{320^\circ} = 1.5 \times 10^{-3} V = 1.6mV$$

۲-۱۱) پسماند (Hysteresis)

در صورتیکه در یک سیستم مقدار خروجی به ازای یک ورودی معین تابعی از جهت رو به کاهش یا رو به افزایش ورودی باشد، سیستم دارای هیسترزیس است. اثرهای پسماند در هر پدیده فیزیکی، شیمیایی یا برقی دیده می‌شود. عدم تطابق منحنیهای ورودی- خروجی ناشی از این واقعیت است که همه انرژیی که هنگام گذاشتن بار، به قسمتهای تحت تنش وارد می‌شود، هنگام برداشتن بار قابل بازگشت نیست. این بدان علت است که مطابق قانون دوم ترمودینامیک، هیچ فرآیند کاملاً برگشت پذیری در جهان وجود ندارد.

اثرهای پسماند در پدیده‌های الکتریکی نیز وجود دارد. یکی از مثالهای آن رابطه بین ولتاژ خروجی و جریان تحریک در مولدهای DC است که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



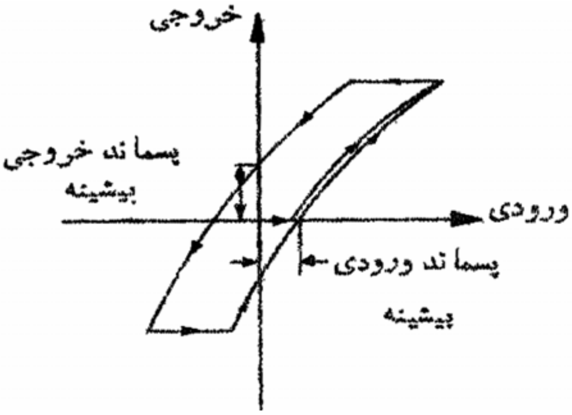
شکل (۲-۳) رابطه ورودی - خروجی در ژنراتور DC

هیسترزیس از نظر کمی طبق تعریف عبارتست از نسبت اختلاف حداکثر در خروجی، به خروجی حداکثر که معمولاً به صورت درصد بیان می‌شود.

$$\text{درصد هیسترزیس} = \frac{\text{ماکزیمم اختلاف دو خروجی برای یک ورودی معین}}{\text{خروجی حداکثر}} \times ۱۰۰ \qquad (۲-۱۶)$$

باید توجه کرد که لختی در هر سیستم می‌تواند تاثیری شبیه هیسترزیس را ایجاد نماید. برای جلوگیری از اشتباه هنگام هر افزایش یا کاهش در ورودی باید صبر نمود تا حالت گذرا طی شود و سپس اندازه‌گیری را انجام داد.

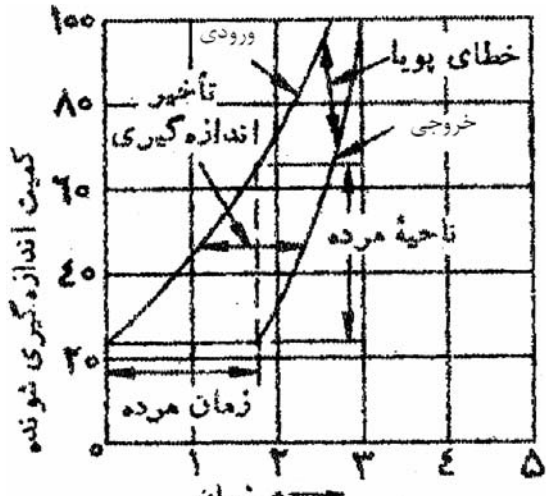
نمایش کلی منحنی هیسترزیس در هر سیستم یا دستگاه اندازه‌گیری به صورت شکل ۲-۴ می‌باشد.



شکل (۲-۴) نمایش کلی یک منحنی هیسترزیس

۲-۱۲) ناحیه مرده و زمان مرده

این دو مشخصه اگر چه در مجموعه مشخصه‌های ایستایی سیستم اندازه‌گیری مطرح می‌شوند اما در واقع به خطای دینامیک سیستم بستگی دارند. در یک سیستم اندازه‌گیری همواره "زمانی" برای پاسخ به ورودی لازم است. به عبارت دیگر سیستم همواره نسبت به تعقیب تغییرات ورودی دارای تاخیر است. تغییرات ورودی در طی این فاصله زمانی (تا قبل از شروع تغییرات خروجی) را ناحیه مرده می‌نامند. توجه شود که این کمیت با کمیت تفکیک یا تمایز تفاوت دارد (چرا؟). به بیان دیگر اگر سیستم به صورت آنی عمل می‌کرد یعنی تغییرات قابل مشاهده ورودی بدون هیچگونه تاخیر زمانی به خروجی منتقل می‌گردید ناحیه مرده وجود نداشت در حالیکه تفکیک در اینجا نیز امکان حضور داشت. به همین دلیل است که ناحیه مرده را متاثر از دینامیک سیستم می‌دانیم. شکل ۲-۵ زمان مرده و ناحیه مرده را در یک اندازه‌گیری که ورودی از یک مقدار غیر صفر رو به افزایش دارد، نشان می‌دهد.



شکل (۲-۵) ناحیه مرده و زمان مرده

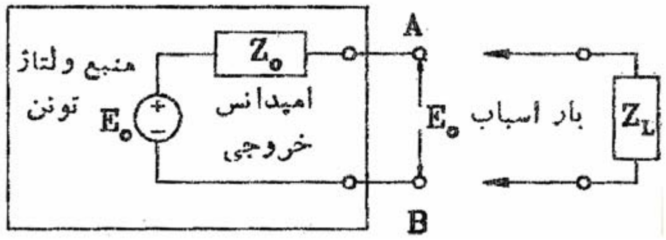
۲-۱۳) اثرهای بارگذاری

حالت ایده‌آل در یک سیستم اندازه‌گیری آن است که هیچکدام از بخشهای سیستم، سیگنال اصلی را، بجز براساس وظیفه خود، دچار تغییر نکنند اما در عمل هر بخش از سیستم اندازه‌گیری تا حدودی از وضعیت ایده‌آل فاصله داشته و سیگنال اصلی (کمیت تحت اندازه‌گیری) را دستخوش اعوجاج (تغییرات ناخواسته) می‌نماید. از یک دیدگاه دیگر و به طریق فلسفی می‌توان گفت با ورود سیستم اندازه‌گیری به مجموعه‌ای که کمیت مورد اندازه‌گیری در آن است، مجموعه تغییر می‌کند و بنابراین کمیت مورد اندازه‌گیری که برآیند آن مجموعه است نیز به احتمال قوی تغییر خواهد کرد. این پدیده را اثر بارگذاری سیستم اندازه‌گیری می‌نامند. البته در هر اندازه‌گیری می‌توان با شناخت کافی از کمیت مورد نظر و مجموعه‌ای که این کمیت در آنجا تولید شده و یا وجود دارد و با انتخاب صحیح سیستم اندازه‌گیری اثرات بارگذاری را حتی الامکان کاهش داد و حتی خطای ناشی از آنرا جبرانسازی نمود. در اینجا مهمترین نمونه‌های بارگذاری در سستم‌های اندازه‌گیری الکتریکی مورد بحث قرار می‌گیرند:

۲-۱۳-۱) اثرهای بارگذاری ناشی از دستگاههای با اتصال موازی

ولتمترها و اسیلوسکوپها از جمله دستگاههای اندازه‌گیری هستند که به صورت موازی به دو سر مدار وصل می‌شوند. شبکه‌ای را در نظر بگیرید که شامل امپدانسهای خطی و مولدهایی باشد که نهایتاً به صورت مدار معادل تونن شکل ۲-۵ نمایش داده شده‌اند. فرض کنید مسئله اندازه‌گیری ولتاژ خروجی شبکه باشد و E_0 ولتاژ مدار باز یعنی ولتاژی باشد که هنگامی که هیچگونه وسیله‌ای (اعم از بار یا دستگاه اندازه‌گیری) به خروجی وصل نیست در دو سر A و B ظاهر گردد.

در حالت ایده‌آل هنگامی که ولتمتر به پایانه متصل می‌شود باید هیچگونه تغییری در خروجی ایجاد نشود. اما اگر ولتمتری با امپدانس Z_L بین A و B وصل شود. جریان I_L از مدار می‌گذرد که سبب افت ولتاژ Z_0I_L می‌شود. بنابراین در این شرایط ولتاژ خروجی برابر است با:



شکل (۲-۶) اثر بارگذاری دستگاه موازی

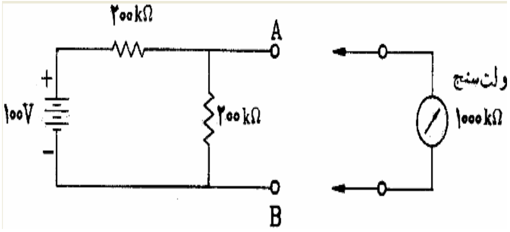
$$E_l \neq E_o, E_l = E_o - I_l Z_o = I_l Z_l \qquad \Rightarrow \frac{E_l}{E_o} = \frac{1}{1+\frac{Z_o}{Z_l}} \Rightarrow E_l = \frac{E_o}{(1+\frac{Z_o}{Z_l})}$$

ولتاژ اندازه‌گیری شده $E_l = \dfrac{E_o}{1+\dfrac{Z_o}{Z_l}}$ (۲-۱۸)

از معادله اخیر پیداست که برای اینکه سیگنال اصلی E_0 بدون اعوجاج بماند مقدار امپدانس ورودی سنجه باید بینهایت باشد (و یا امپدانس خروجی منبع، Z_0، باید صفر باشد) که در عمل چنین نیست.

و یا برای کاهش اعوجاج E_0 باید Z_L در مقایسه با Z_0 حتی الامکان بزرگ باشد. ($Z_l \rangle\rangle Z_o$) که این راه عملی است.

مثال – ولت‌سنجی با گستره ۵۰v به دو سر A و B مدار شکل ۲-۷ وصل شده است. ولتاژ مدار باز و خوانده ولت‌سنج را پیدا کرده خطای بارگذاری و صحت را محاسبه نمایید. مقاومت ولت‌سنج ۱۰۰۰kΩ است.

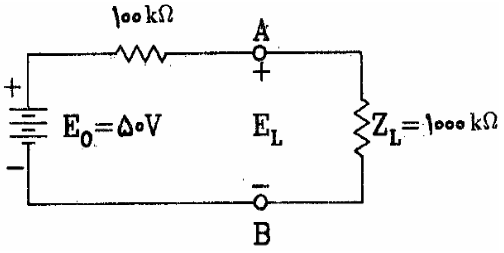


شکل (۲-۷) مدار قبل از وصل ولت‌متر

حل - مدار را به هم ارز تونن آن ساده می‌کنیم: (شکل۲-۸)

ولتاژ مدار باز (ولتاژ تونن) $E_0 = 100 \times \dfrac{200}{400} = 50v$

امپدانس خروجی (مقاومت تونن) $Z_0 = \dfrac{200 \times 200}{200 + 200} = 100k\Omega$



شکل (۲-۸) مدار به همراه ولت‌متر

$$E_l = \dfrac{E_o}{1 + \dfrac{Z_o}{Z_l}} = 45.5V$$

$$\text{خطای بارگذاری} = \dfrac{45.5 - 50}{50} \times 100 = 9\%$$

$$\text{صحت} = 100 - 9 = 91\%$$

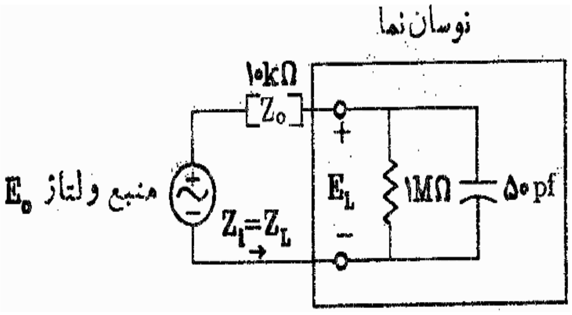
تمرین – می‌توان دید که اگر می‌خواستیم به صحت 99% دست یابیم می‌بایست ولت‌سنجی با مقاومت ورودی ۱۰۰ برابر مقاومت خروجی انتخاب می‌کردیم.

*تحلیل اثرهای بارگذاری در مدارهای AC به سادگی DC نیست چرا که Z_0 و Z_L خود توابعی از فرکانس‌اند. به خصوص به دلیل اثر خازن ورودی سنجه، مقدار امپدانس Z_L در فرکانسهای بالا کم شده و در نتیجه سیگنالهای ورودی دچار تضعیف بیشتری می‌شوند. نه تنها اندازه سیگنال بلکه فاز آن نیز تاثیر می‌پذیرد. در مورد سیگنالهای غیر سینوسی مشکل بیشتری وجود دارد و آن تغییر شکل موج است. (چرا؟)

در شکل موجهای غیرسینوسی (با استفاده از بسط فوریه) سیگنالهای متعدد سینوسی با فرکانسهای مختلف وجود دارند که هر کدام با توجه به فرکانس‌شان دچار تضعیف دامنه و تغییر فاز مخصوص به خود می‌شوند و در نهایت در جمع آنها با هم سیگنال خروجی تغییر شکل نیز می‌یابد.

مثال – اسیلوسکوپی که مقاومت ورودی آن ۱MΩ و موازی با خازن ۵۰PF است به دو سر مداری وصل شده است که مقاومت خروجی موثر آن ۱۰KΩ است. اگر ولتاژ مدار باز یک موج سینوسی با فرکانس ۱۰۰KHz و دامنه ۱,۰v باشد ولتاژی که اسیلوسکوپ نشان می‌دهد چقدر است؟

حل: مدار هم‌ارز سیستم در شکل ۲-۹ دیده می‌شود:



شکل (۲-۹) اثر بارگذاری اسیلوسکوپ در مدار AC

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 100 \times 1000 \times 50 \times 10^{-12}} = 32000\Omega$$

پس امپدانس ورودی اسیلوسکوپ برابر است با:

$$Z_L = \frac{R \times (-jX_C)}{R - jX_C} = \frac{10^6 \times (-j32 \times 10^3)}{10^6 - j32 \times 10^3} \approx -j32 \times 10^3\Omega = (32 \times 10^3 \angle -90^\circ)$$

و ولتاژ بین سرهای بار برابر است با:

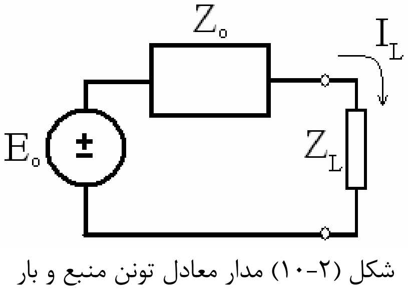
$$E_l = \frac{E_o}{1 + \frac{Z_o}{Z_l}} = 0.954\angle -17.4^\circ$$

این بدان معنا است که اندازه ولتاژ باز نموده اسیلوسکوپ ۰٫۹۵۴ مقدار اصلی است یعنی دامنه با خطایی برابر ۴٫۶٪ نمایش داده شده و همچنین فاز ولتاژ خروجی نسبت به حالت بی‌باری ۱۷٫۴° پس فاز دارد.

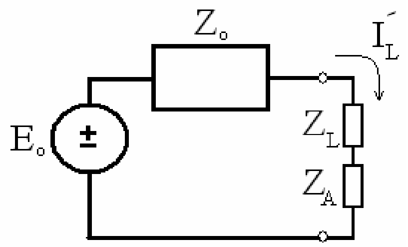
اگر فرکانس منبع ولتاژ سینوسی به جای ۱۰۰KHz، ۱MHz بود در آن صورت با محاسبه بدست می‌آمد که مقدار اندازه‌گیری شده ۰٫۳۰۴ برابر مقدار اصلی آن و تغییر فاز ۷۲٫۳° است. (به عنوان تمرین این محاسبه را انجام دهید.)

۲-۱۳-۲) اثرهای بارگذاری ناشی از دستگاههای با اتصال متوالی (سری)

فرض کنید در شکل (۲-۱۰) می‌خواهیم جریان شاخه Z_L را اندازه‌گیری کنیم. یکی از روشهای بسیار معمول استفاده از دستگاه آمپرسنج است. این دستگاهها عموماً به صورت سری با شاخه وصل می‌شوند و جریان عبوری را اندازه‌گیری می‌کنند. در حالت ایده‌آل امپدانس آمپرسنج صفر است و بنابراین وارد کردن آن در مدار هیچگونه تاثیری بر جریان شاخه نخواهد گذاشت. اما در عمل وجود امپدانس آمپرمتر باعث تغییر در مدار و در نتیجه قرائت غیر واقعی خواهد شد. اگر امپدانس آمپرمتر را Z_A بنامیم. با توجه به شکل (۲-۱۱) خواهیم داشت.



شکل (۲-۱۰) مدار معادل تونن منبع و بار



شکل (۲-۱۱) Z_A امپدانس دستگا اندازه‌گیری سری است

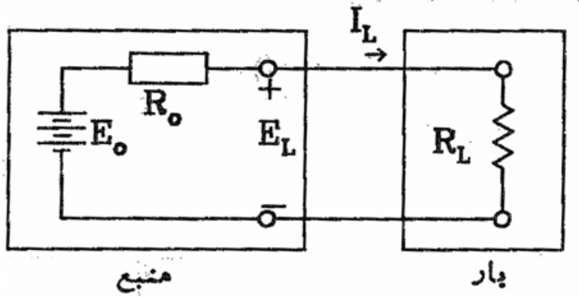
$$I_l' = \frac{E_o}{(Z_o + Z_l) + Z_A} = \frac{I_l}{1 + \dfrac{Z_A}{(Z_l + Z_o)}} \qquad (۲-۱۹)$$

می‌توان دید برای اینکه مقدار قرائت شده با مقدار حقیقی جریان شاخه (قبل از وصل آمپرمتر) تقریباً یکسان باشد باید $Z_A \langle\langle Z_L + Z_o$ باشد. یعنی امپدانس ورودی آمپرسنج نسبت به امپدانس شاخه باید بسیار کوچک باشد.

تمرین – با محاسبه تعیین کنید برای بدست آوردن صحت ۹۹٪ مقاومت ($Z_L + Z_0$) باید چند برابر مقاومت سنجه باشد؟ برای صحت ۹۵٪ چطور؟

۲-۱۴) تطبیق امپدانس و انتقال توان بیشینه

همانگونه که دیدیم سیستم اندازه‌گیری می‌تواند از طبقات متعددی تشکیل شود. همچنین دیدیم که معمولاً بعد از طبقه اول (Transducer یا Sensor) سیگنال یا داده‌هایی که از طبقه‌ای به طبقه دیگر منتقل می‌شود دارای ماهیت الکتریکی است. در بسیاری از اوقات لازم است که توان انتقالی از یک طبقه به طبقه دیگر بیشینه باشد. شرط لازم برای انتقال توان بیشینه بین دو طبقه تطبیق امپدانس این دو طبقه است. مسئله انتقال توان بیشینه را برای یک سیستم مقاومتی تحلیل می‌کنیم (شکل ۲-۱۲). فرض کنیم E_0 و E_L به ترتیب ولتاژ منبع در حالت بی‌باری و بارداری باشند و R_0 و R_L نیز به ترتیب مقاومت منبع و مقاومت بار (منظور از مقاومت بار مقاومت ورودی طبقه‌ای است که سیگنال را دریافت می‌کنند و منظور از R_0 و E_0 اجزای مدار معادل تونن طبقه‌ای است که سیگنال را تحویل می‌دهد.



شکل (۲-۱۲) مدار نمونه برای بررسی قضیه انتقال توان ماگزیمم

توان انتقال یافته به بار $P = I_L^2 R_L = \dfrac{E_o^2 R_L}{(R_o + R_L)^2}$ (۲-۲۰)

انتقال توان ماکزیمم هنگامی است که $dP / dR_L = 0$ باشد.

تمرین – با محاسبه شرط تطبیق امپدانس را بدست آورید. (جواب $R_L = R_0$) (۲-۲۱)

میزان توان انتقالی در حالت انتقال توان بیشینه: توان انتقال یافته به بار $= P_{max} = \dfrac{E_0^2}{4R_0}$ (۲-۲۲)

توان منبع: $\dfrac{E_0^2}{2R_0}$

در مدارهای AC معمولاً امپدانس خروجی منبع و امپدانس بار، مقاومتی خالص نیستند. یعنی داریم:

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \qquad Z_L = R_L + jX_L$$

در این مدارها شرط انتقال توان بیشینه (تطبیق امپدانس) به صورت زیر در می‌آید.

$$Z_L = R_L + jX_L = R_0 - jX_0 = \bar{Z}_0 \qquad (۲۳-۲)$$

مثال - با محاسبه رابطه ۲۳ را بدست آورید.

رابطه توان در اینجا به صورت زیر مطرح می‌شود.

$$P_L = R_L I_L^2 \qquad I_L = \frac{E_0}{(Z_L + Z_0)} \qquad \Rightarrow P_L = \frac{R_L E_0^2}{(Z_L + Z_0)^2}$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial R_L} = \frac{E_0^2 (Z_L + Z_0)^2 - 2(Z_L + Z_0) R_L E_0^2}{(Z_L + Z_0)^4} = \frac{E_0^2 (Z_L + Z_0 - 2R_L)}{(Z_L + Z_0)^2}$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial R_L} = 0 \Rightarrow Z_L + Z_0 - 2R_L = 0 \qquad R_L + jX_L + R_0 + jX_0 = 2R_L \Rightarrow \begin{cases} R_L + R_0 = 2R_L \Rightarrow R_0 = R_L \\ X_L + X_0 = 0 \Rightarrow X_L = -X_0 \end{cases}$$

$$P_L = \frac{R_L E_0^2}{(2R_L)^2} = \frac{E_0^2}{4R_L} = \frac{E_0^2}{4R_0} \Rightarrow P_S = P_0 + P_L = 2P_L \Rightarrow \eta = 50\%$$

همانطور که دیده می‌شود برای انتقال توان بیشینه بازده برابر ۵۰٪ می‌باشد.

مثال – یک منبع ولتاژ مدار باز ۲۰v و امپدانس خروجی ۰,۵+j۱Ω است. منبع ولتاژ از طریق شبکه انتقالی به امپدانس ۱,۵+j۴Ω به بار وصل شده است. در چه باری توان بیشینه انتقال می‌یابد؟ توان بیشینه، توان در منبع و شبکه انتقال را محاسبه کنید. بازده در حالت انتقال توان بیشینه چقدر است؟

حل – امپدانس خروجی منبع و شبکه انتقال برابر است با:

$$(0.5 + j1) + (1.5 + j4) = (2 + j5)\Omega$$

برای انتقال توان بیشینه باید $Z_L = (2 - j5)\Omega$ باشد.

$$P_{max} = \frac{E_o^2}{4R_o} = \frac{20^2}{4 \times 2} = 50W \qquad I_L = \frac{20}{(2 + j5) + (2 - j5)} = 5A$$

اتلاف توان در منبع $= 5^2 \times 0.5 = 12.5W$

اتلاف توان در شبکه انتقال $= 5^2 \times 1.5 = 37.5W$

کل اتلاف $= 50W$

$$\eta = \frac{50}{50 + (12.5 + 37.5)} = 50\%$$

فصل سوم – مشخصه‌های دینامیک سیستمهای اندازه‌گیری

۳-۱) پاسخ دینامیک (پویا)

گفتیم که وقتی به سنجه یا سیستم اندازه‌گیری ورودی اعمال می‌شود سنجه یا سیستم نمی‌تواند فوراً به وضعیت پایدار نهایی خود برسد و پیش از رسیدن به این وضعیت از حالت گذرا عبور می‌کند. در بسیاری از کاربردهای اندازه‌گیری لازم می‌شود که پاسخ سیستم در حالت گذرا نیز بررسی شود و حتی در برخی از کاربردها پاسخ گذرای سیستم یعنی نحوه رسیدن سیستم به حالت پایدار نهایی از پاسخ حالت پایدار مهمتر است. از سوی دیگر سیستمهای اندازه‌گیری در بسیاری از کاربردهای صنعتی همواره در معرض ورودیهایی قرار دارند که ماهیت ایستا ندارند، بلکه پویا هستند. یعنی ورودی با زمان تغییر می‌کند. در این حالت چون ورودی لحظه به لحظه تغییر می‌کند خروجی نیز در حال تغییر خواهد بود. رفتار سیستم در این حالت نیز با پاسخ پویای سیستم تشریح می‌شود.

بنابراین بطور خلاصه پاسخ پویای سیستم در دو حالت ایجاد می‌شود:

۱- ورودی ثابت (ایستا) است اما سیستم در پاسخ به این ورودی به وضعیت پایدار نرسیده است

۲- ورودی متغیر با زمان است (پله، شیب، سینوسی، ضربه و یا هر ورودی دلخواه دیگر)

باید توجه داشت که در حالت اول یعنی در حالتی که یک ورودی ثابت از لحظه $t=0$ به دستگاه اعمال شده است، (یا تغییر ثابتی در ورودی در لحظه $t=0$ ظاهر گردیده است) در واقع می‌توانیم بگوییم که به دستگاه یک ورودی پله اعمال شده است. یعنی پاسخ دینامیک سیستم در حالت اول همان پاسخ سیستم در حالت دوم است با این ویژگی که ورودی از نوع پله است.

۳-۲) حوزه فرکانس و حوزه زمان

سیستمهای اندازه‌گیری می‌توانند در معرض هرگونه ورودی قرار گیرند. تقریباً در تمام کاربردها ماهیت سیگنالها تصادفی و غیر قابل پیش‌بینی کامل و دقیق است. لذا رفتار پویای سیستم را در پاسخ به برخی سیگنالهای استاندارد پله، شیب، سهمی و ضربه مورد ارزیابی قرار می‌دهند. بدیهی است نقطه نظر اصلی در این ارزیابیها، بررسی تغییرات خروجی با گذشت زمان است. لذا بررسی در حوزه زمان بخش اصلی بررسی پاسخ دینامیک سیستم است. نکته قابل توجه در این بررسی این است که رفتار پویای سیستم در حوزه زمان بستگی به قطبهای سیستم داشته و مستقل از نوع ورودی است. لذا مطالعه پاسخ سیستم به یکی از سیگنالهای استاندارد (که معمولاً سیگنال پله انتخاب می‌شود) برای پیش‌بینی پاسخ سیستم به هر ورودی دیگر کافی است.

از سوی دیگر می‌دانیم که تمام ورودیهای حقیقی را می‌توان به صورت طیفی از فرکانسهای مختلف در نظر گرفت (مطابق سری فوریه تمام سیگنالها را می‌توان به مجموعه‌ای از سیگنالهای سینوسی تجزیه کرد). با این ویژگی، اگر خواهان بررسی پاسخ سیستم به یک سیگنال مفروض باشیم (به خصوص پاسخ حالت دائمی)، کافی است

پاسخ سیستم به مولفه‌های سینوسی آن سیگنال را دریابیم. از آنجا که تفاوت حاصله در خروجی برای هر سیگنال سینوسی در فاز و دامنه آن خواهد بود و این اختلاف به فرکانس سیگنال سینوسی بستگی دارد. لذا پاسخ دینامیک در حوزه فرکانس به عنوان نوع دیگری از پاسخ دینامیک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مشخصه‌هایی که در حوزه فرکانس بررسی می‌شوند عبارتند از مشخصه دامنه (منحنی دامنه – فرکانس) و مشخصه فاز (منحنی فاز – فرکانس)

۳-۳) مشخصه‌های دینامیک

هنگامی که بررسی در حوزه زمان صورت می‌گیرد (فرضاً با ورودی پله) پارامترهایی همچون زمان صعود، ثابت زمانی و زمان مرده معیارهای مناسبی برای ارزیابی خواهند بود. علاوه بر اینها در صورتیکه تابع تبدیل سیستم از درجه دوم باشد پارامترهای دیگر از قبیل ضریب میرائی، فرکانس تشدید. زمان استقرار و درصد فراجهش (overshoot) نیز اهمیت پیدا می‌کنند. در مورد سیستمهای با درجات بالاتر سعی می‌شود آنها را با یک بلوک تاخیر و یک سیستم درجه یک یا دو مدلسازی کنند.

در بررسی در حوزه فرکانس مشخصه دامنه (میزان تغییر دامنه در فرکانسهای مختلف) و مشخصه فاز (میزان تغییر فاز در فرکانسهای مختلف) حائز اهمیت می‌باشند.

۳-۴) خطای دینامیک (پویا)

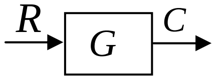
خطای پویا طبق تعریف برابر است با اختلاف بین مقدار حقیقی کمیت وابسته به زمان و مقدار باز نموده دستگاه، اگر فرض شود که خطای ایستا وجود ندارد. می‌توان دید که خطای پویا نسبت به زمان تغییر می‌کند و لذا خطای پویا برای هر لحظه از زمان قابل بیان است و سعی می‌شود مقدار آن به صورت یک تابع از زمان تعریف گردد.
توجه: ممکن است خطای پویا صفر شود ولی خطای مانا مقدار داشته باشد.

۳-۵) مشخصه‌های دینامیک عناصر با تابع تبدیل درجه ۱ (برای سیستمهای خطی مستقل از زمان)

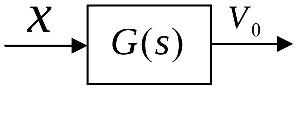
تابع تبدیل: G(s) لاپلاس خروجی به لاپلاس ورودی (۱-۳)

$$G(S)=\frac{C(s)}{R(s)}$$

درجه سیستم: بالاترین توان متغیر مختلط S در مخرج تابع تبدیل هر سیستم.



تابع تبدیل این عناصر به صورت $G(s)=\frac{V_0}{x}=\frac{A_1}{1+\tau s}$ می‌باشد که A_1 گین استاتیک و τ ثابت زمانی آن است.



۳-۵-۱) پاسخ زمانی با فرض ورودی پله $(X = A_2 \cdot u(t))$ و ضربه $(X = A_2 \cdot \delta(t))$

برای ورودی پله، خروجی در حوزه زمان عبارت خواهد بود از:

$$V_0(t)=A_1A_2\left(1-e^{-t/\tau}\right) \qquad (۲-۳)$$

خطای نسبی دینامیک

$$\varepsilon_{dyn}(t)=\frac{V_0(t)}{A_2}-1 \qquad (۳-۳)$$

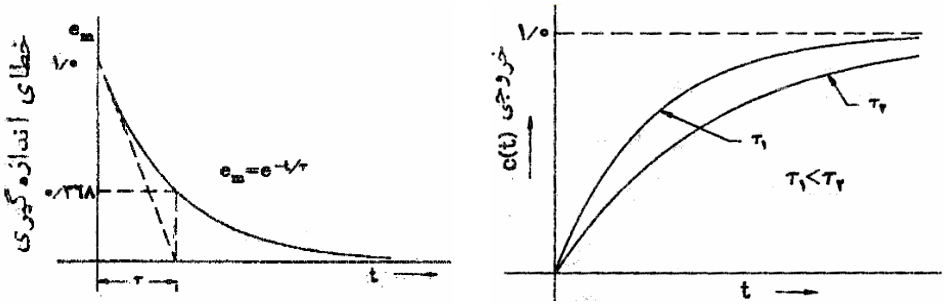
و اگر ورودی ضربه باشد، خروجی برابر است با:

$$V_0(t)=A_1A_2e^{-t/\tau} \qquad (۴-۳)$$

$$\varepsilon_{dyn}(t)\big|_{t\neq 0}=-V_O(t) \qquad (۵-۳)$$

پاسخ سیستم درجه اول به ورودی پله به صورت نمونه‌ای در شکل ۳-۱ آورده شده است.

زمان پاسخ در اینجا زمانی است که سیستم برای رسیدن به حالت مانای نهایی لازم دارد. مثلاً زمانی که لازم است که خروجی به ۹۹٪ ورودی برسد (یا ۹۰٪ آن).

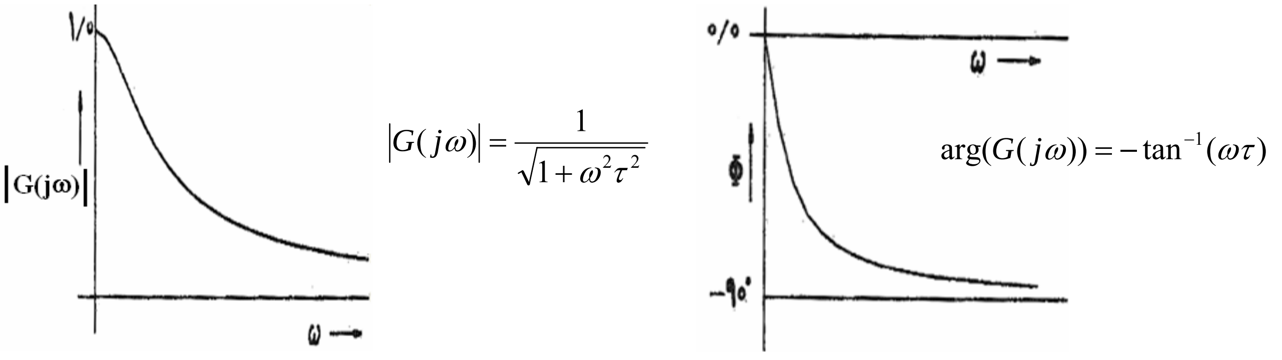


شکل (۳-۱) پاسخ سیستم درجه اول به ورودی پله

۳-۵-۲) پاسخ فرکانسی (پاسخ حالت پایدار)

$$G(j\omega)=\frac{A_1}{1+j(\tau\omega)}=\frac{A_1}{\sqrt{1+(\tau\omega)^2}}\angle tan^{-1}(-\tau\omega) \qquad (۶-۳)$$

نمونه این مشخصه برای دامنه و فاز در شکل ۳-۲ نمایش داده شده است.



$$|G(j\omega)|=\frac{1}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}}$$

$$\arg(G(j\omega))=-\tan^{-1}(\omega\tau)$$

شکل (۳-۲) پاسخ فرکانسی سیستم درجه ۱

مثال - سیگنال ورودی به یک سیستم درجه یک با ثابت زمانی $\tau=0.2\sec$ و $A_1=1$ به صورت زیر است. V_0 را بدست آورید.

$$X(t)=\sin(2t)+0.3\sin(20t)$$

حل -

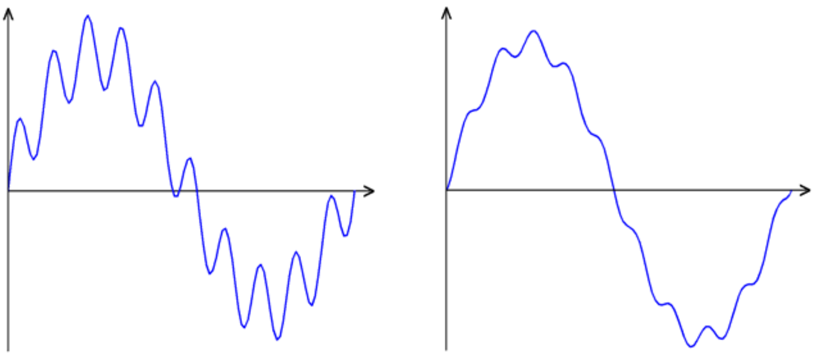
$$V_0(t)=0.93\cdot\sin(2t-21.8°)+0.072\cdot\sin(20t-76°)$$

می‌بینیم که مولفه فرکانس بالا به شدت تضعیف شده و فاز آنهم تغییر محسوسی دارد (شکل ۳-۳).

تمرین: اگر سیستمی با $\tau=0.0026\sec$ بکار رود خروجی به چه صورت خواهد بود؟

خطای دینامیک در این حالت کمتر است یا بیشتر؟

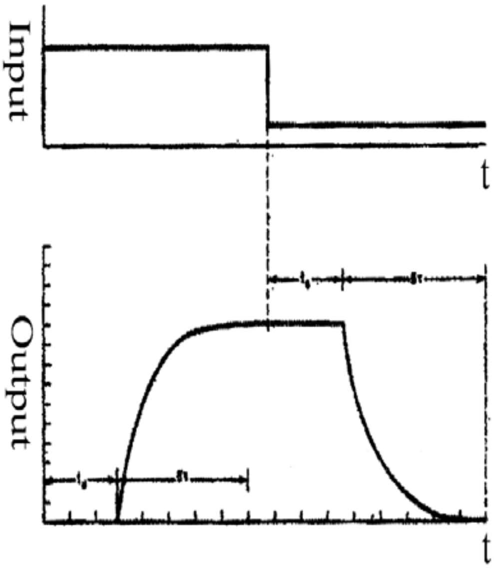
τ به نظر شما به چه عاملی بستگی دارد و برای کوچک شدن آن چه پیشنهادی می‌کنید؟



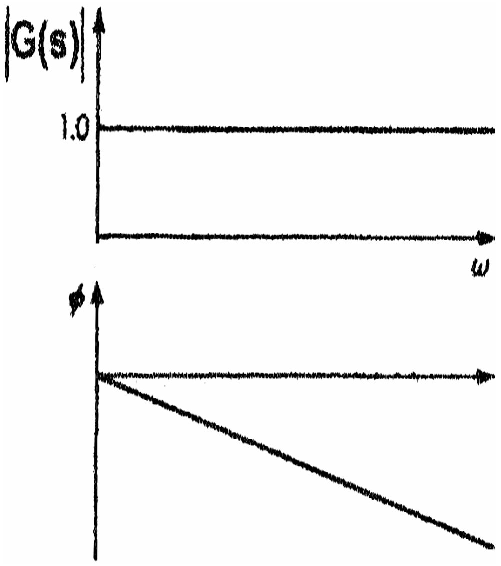
شکل (۳-۳) سمت راست خروجی سیستم و سمت چپ سیگنال ورودی

۳-۵-۳) عناصر با زمان تاخیر

سیستمهای طبیعی معمولاً ترکیب یک سیستم درجه یک (و یا دو) و یک تاخیر هستند. این تاخیر یا زمان مرده در شکل (۳-۴) که پاسخ یک سیستم را به یک ورودی پله نشان می‌دهد نشان داده شده است.



شکل (۳-۴) پاسخ پله یک سیستم متشکل از یک بلوک تاخیر و یک تابع تبدیل درجه یک



شکل (۳-۵) پاسخ فرکانسی یک سیستم با تاخیر خالص

۳-۶) مشخصه‌های دینامیک سیستم‌های درجه دوم

تابع تبدیل یک سیستم درجه دو در حوزه لاپلاس به صورت زیر است.

A_1 : گین استاتیک

ω_n: فرکانس طبیعی

ζ:ضریب میرایی

$$G(s)=\frac{V_0}{x}=\frac{A_1\omega_n^2}{S^2+2\zeta\omega_n+\omega_n^2} \qquad (۷-۳)$$

۳-۶-۱) پاسخ زمانی

با اعمال ورودی پله و تبدیل عکس لاپلاس و با فرض $A_1=1$ پاسخ به صورت تابعی از ζ بدست می‌آید.

اگر $\zeta=1$ باشد (حالت میرایی بحرانی)، سیستم دو قطب حقیقی یکسان دارد.

$$V_0(t)=1-e^{-\omega_n t}(1+\omega_n t) \qquad (۸-۳)$$

به ازای $1\rangle\zeta$ سیستم دو قطب مزدوج دارد (نوسانی).

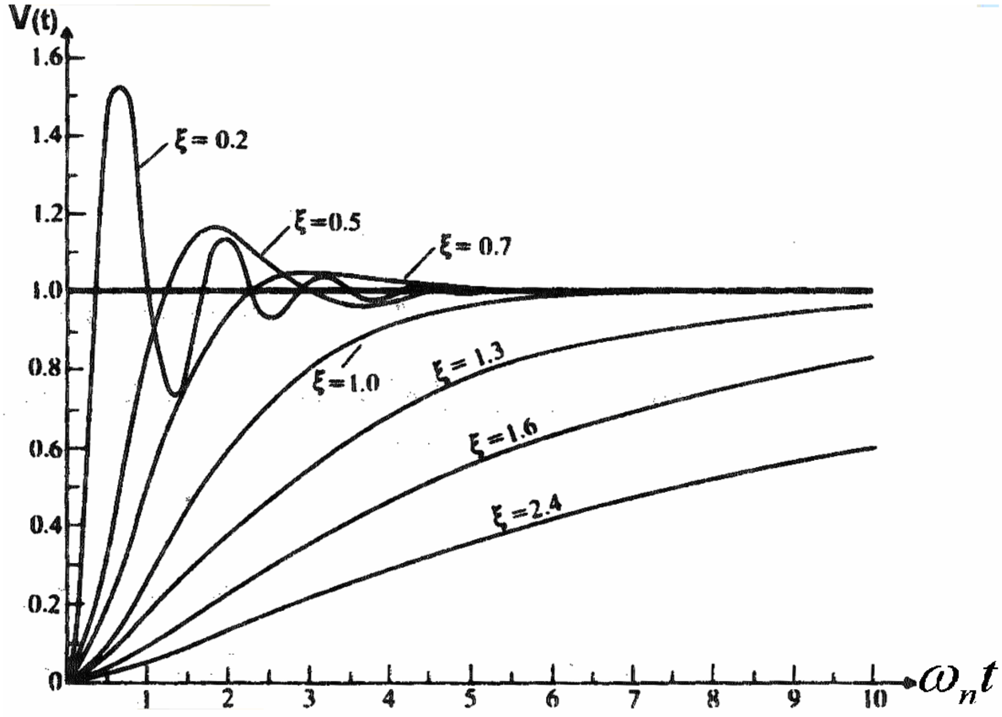
$$V_0(t)=1-\frac{e^{-\xi\omega_n^2}}{\sqrt{1-\xi^2}}sin\left[\omega_n\sqrt{1-\xi^2}\,t+\phi\right] \qquad (۳-۹)$$

$$\phi=cos^{-1}\xi \qquad (۳-۱۰)$$

به ازای $\xi\rangle 1$ سیستم با دو قطب حقیقی، فوق میرا است.

$$V_0(t)=1-\frac{\xi+\sqrt{\xi^2-1}}{2\sqrt{\xi^2-1}}e^{\left(-\xi+\sqrt{\xi^2-1}\right)\omega_n t}+\frac{\xi-\sqrt{\xi^2-1}}{2\sqrt{\xi^2-1}}e^{\left(-\xi-\sqrt{\xi^2-1}\right)\omega_n t} \qquad (۳-۱۱)$$

در شکل ۳-۶ پاسخهای نمونه‌ای یک سیستم درجه دو با ضرایب میرایی متفاوت نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود در هر حال با افزایش ω_n پاسخ سریعتر می‌شود.



شکل (۳-۶) پاسخ نمونه‌ای سیستم درجه دوم به ورودی پله

فراجهش (بالا خیز) اختلاف مقدار حداکثر با مقدار پایدار خروجی تابعی از ξ بوده و برابر است با:

$$OverShoot=V_{0_{max}}-1=exp\left\{\frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right\} \qquad (۳-۱۲)$$

همچنین می‌توان نشان داد فرکانس طبیعی ω_n از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\omega_n=\frac{\pi}{T_p\sqrt{1-\xi^2}} \qquad (۳-۱۳)$$

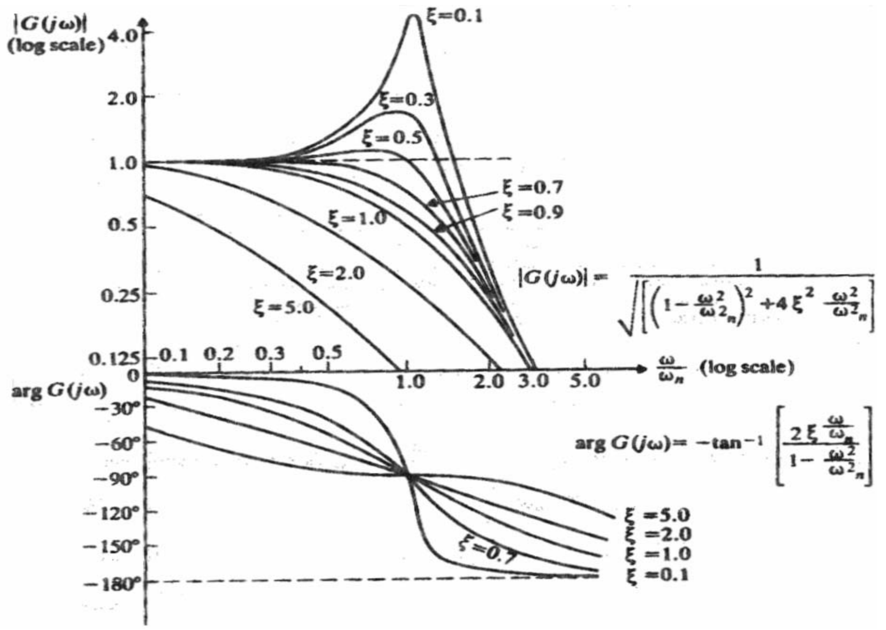
که در آن T_p زمانی است که خروجی به حداکثر می‌رسد.

فرکانس نوسانات میرا در یک سیستم درجه ۲ عبارت است از:

$$\omega_d=\omega_n\sqrt{1-\xi^2} \qquad (۳-۱۴)$$

۳-۶-۲) پاسخ فرکانسی

$$G(j\omega)=\frac{V_0}{x}=\frac{A_1\omega_n^2}{(j\omega)^2+2\xi\omega_n(j\omega)+\omega_n^2}=\left|G(j\omega)\right|\angle G(j\omega) \qquad (۳-۱۵)$$



شکل (۳-۷) پاسخ فرکانسی یک سیستم درجه دوم

۳-۷) سیستمهای با درجات بالاتر

روشهای ساده‌سازی به سیستمهای درجات پائین‌تر زیاد می‌باشد. از آن جمله :

۱- تبدیل سیستم به یک بلوک که نقش غالب را در تحلیل دینامیک خواهد داشت.

۲- خلاصه کردن سیستم به یک سیستم تاخیر به علاوه یک سیستم درجه ۱ یا ۲

۳-۸) کاهش خطای دینامیک

خطای دینامیک اساساً ناشی از لختی سیستم (و کندی آن) در رسیدن به وضعیت پایدار و نیز تعقیب تغییرات ورودی است. لذا با استفاده عناصر سریعتر (تغییر فیزیکی در ساختمان سیستم اندازه‌گیری) و یا جبران‌سازی خطای عناصر کند با روش حلقه باز یا حلقه بسته می‌توان خطا را کم کرد.

جهت حذف خطای دینامیک در یک سیستم و در محدوده فرکانسی سیگنال ورودی، لازم است دو شرط زیر در تابع تبدیل سیستم حتی‌الامکان محقق گردد:

$$|G(j\omega)|=1, \qquad \angle G(j\omega)=0 \qquad 0<\omega<\omega_{max} \qquad (۱۶-۳)$$

که البته تحقق شرایط فوق در عمل بسیار مشکل خواهد بود. مثلاً $0.98<|G(j\omega)|<1.02$

مثال – ثابت زمانی یک دماسنج $3.5s$ است. اگر دماسنج را به سرعت از دمای $0^\circ C$ به ظرف آبی به دمای $100^\circ C$ ببریم. پس از $1.5s$ چه دمایی را نشان می‌دهد؟

حل – از صورت مسئله معلوم است که دماسنج در معرض ورودی پله به ارتفاع $\theta_0=100^\circ C$ قرار گرفته است. پس خواهیم داشت.

$$\theta=\theta_0\left(1-e^{-t/\tau}\right)=100\left(1-e^{-1.5/3.5}\right)=34.85^\circ C$$

مثال – جرم قسمت متحرک یک دستگاه اندازه‌گیری ۵ گرم و سختی فنر آن $2\times10^3\ N/rad$ است.

فرکانس طبیعی و ثابت میرایی لازم برای جلوگیری از نوسان را حساب کنید. اگر ضریب میرایی ۶۰٪ شود. فرکانس نوسان میرا چقدر خواهد شد.

حل:

$K = 2\times10^{3}\ N/rad$ ثابت فنر، $M = 5gm = 0.005Kg$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} = \sqrt{\frac{2\times10^{3}}{0.005}} = 632.4\frac{rad}{s}$$

برای اینکه سیستم بدون نوسان باشد باید میرای بحرانی شود. بنابراین $\zeta = 1$ و بنابراین:

$$\xi = 1 \Rightarrow 1 = \frac{D}{2\sqrt{KM}} \Rightarrow D = 6.32\frac{N}{ms^{-1}}$$

اگر ضریب میرایی ۶۰٪ شود، یعنی $\zeta = 0.6$ بنابراین نوسان فرکانسهای میرا عبارت خواهد شد.

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\xi^2} = 632.4\sqrt{1-0.6^2} = 506\frac{rad}{S}$$

تبصره – معادله دیفرانسیل کلی سیستم مرتبه دوم به صورت معادله (۳-۷) است. یک نمونه مکانیکی سیستم در شکل دیده می‌شود:

شکل (۳-۸) یک نمونه مکانیکی سیستم درجه دوم

$$M\ddot{C}(t) + D\dot{C}(t) + KC(t) = R(t) \qquad (۱۷-۳)$$

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1/M}{S^2 + \frac{D}{M}S + K/M} \qquad (۱۸-۳)$$

و در مورد تابع تبدیل بدون بعد داریم:

$$G(s) = \frac{KC(s)}{R(s)} = \frac{K/M}{S^2 + \frac{D}{M}S + K/M} = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \qquad (۱۹-۳)$$

$$\omega_n = \sqrt{K/M} \text{ و } \xi = \frac{D}{2\sqrt{KM}} \qquad (۲۰-۳)$$

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\xi^2} \qquad (۲۱-۳)$$

فصل چهارم – خطاها و آنالیز خطا

۴-۱) خطای حدی

سازندگان برای مطمئن کردن خریدار از کیفیت دستگاه و یا قطعه، صحت معینی را تضمین می‌کنند. در بیشتر دستگاهها تضمین می‌شود که صحت، درصد معینی از خوانده تمام مقیاس باشد. همچنین تضمین می‌شود که قطعات با مقدار نامی خود بیش از چند درصد اختلاف نداشته باشند. حد این انحراف از مقدار مشخص شده خطای حدی، یا صحت تضمین شده نام دارد. اگر A_s مقدار نامی کمیت و δA خطای حدی آن باشد، داریم:

$$A_a = A_s \pm \delta A \qquad (۴-۱)$$

(که در آن A_a مقدار واقعی کمیت و یا به عبارت بهتر محدوده مقدار واقعی کمیت است)

خطای نسبی (کسری) به صورت نسبت خطا به مقدار مشخص شده (نامی) کمیت، تعریف می‌شود. بنابراین خطای حدی نسبی چنین است:

$$\varepsilon_r = \frac{\delta A}{A_s} = \frac{\varepsilon_0}{A_s} \qquad (۴-۲)$$

و داریم:

$$\varepsilon_0 = \delta A = \varepsilon_r A_s \qquad (۴-۳)$$

و بنابراین:

$$A_a = A_s(1 \pm \varepsilon_r) \qquad (۴-۴)$$

مثال – صحت تضمین شده یک ولت‌سنج ۰ تا ۱۵۰ ولت، برابر یک درصد خوانده تمام مقیاس است. ولتاژی که این ولت‌سنج اندازه گرفته ۷۵ ولت است. خطای حدی را به درصد بیان کنید.

خطای حدی $= \delta A = \varepsilon_r A_s = 0.01 \times 150^V = 1.5V$

در ولتاژ اندازه‌گیری شده ۷۵ ولت خطای نسبی برابر است با:

$$\varepsilon_{r(75)} = \frac{\delta A}{A_s} = \frac{1.5}{75} = 0.02$$

درصد خطای حدی $= 0.02 \times 100 = 2\%$

پس ولتاژ اندازه‌گیری شده بین حدود زیر است:

$$A_a = A_s(1 \pm \varepsilon_r) = A_s \pm \delta A = (75 \pm 1.5)V$$

۴-۲) ترکیب کمیتهای دارای خطای حدی

۴-۲-۱) جمع دو کمیت

اگر y، نتیجه نهایی دو کمیت u و v باشد، داریم:

$$y = u + v \Rightarrow dy = du + dv \Rightarrow \frac{dy}{y} = \frac{du}{y} + \frac{dv}{y}$$

و اگر خطای حدی مولفه‌ها $\pm \delta u$ و $\pm \delta v$ باشد، خطای حدی متناظر y یعنی δy چنین است:

$$\frac{\delta y}{y} = \pm\left(\frac{u}{y}\cdot\frac{\delta u}{u} + \frac{v}{y}\cdot\frac{\delta v}{v}\right) \qquad (۵-۴)$$

یعنی خطای نسبی کل برابر است با مجموع حاصلضرب‌های خطای نسبی هر مولفه در نسبت آن مولفه به تابع

۴-۲-۲) تفاضل دو کمیت

اگر به همان روش ۴-۲-۱ عمل کنیم باز هم داریم:

$$y = u - v \Rightarrow \frac{\delta y}{y} = \pm\left(\frac{u}{y}\cdot\frac{\delta u}{u} + \frac{v}{y}\cdot\frac{\delta v}{v}\right) \qquad (۶-۴)$$

این معادله همان معادله (۴-۶) است. اما باید توجه کرد که اگر u و v تقریباً برابر باشند و $y \langle\langle u$ و $y \langle\langle v$ باشد خطای نسبی خیلی بزرگ خواهد بود.

۴-۲-۳) جمع یا تفاضل بیش از دو کمیت

در این حالت نیز از y (تابعی با بیش از دو مولفه) دیفرانسیل می‌گیریم و پس از ساده‌سازیهای مشابه بند قبل خواهیم داشت:

$$y = u \pm v \pm w \Rightarrow \frac{\delta y}{y} = \pm\left(\frac{u}{y}\cdot\frac{\delta u}{u} + \frac{v}{y}\cdot\frac{\delta v}{v} + \frac{w}{y}\cdot\frac{\delta w}{w}\right) \qquad (۷-۴)$$

۴-۲-۴) ضرب دو کمیت

اگر فرض کنیم $y = u \cdot v$ ، با لگاریتم طبیعی گرفتن از دو طرف تساوی و سپس مشتق‌گیری داریم:

$$y = u \cdot v \Rightarrow \ln(y) = \ln(u) + \ln(v) \Rightarrow \frac{dy}{y} = \frac{du}{u} + \frac{dv}{v}$$

و اگر خطای u و v به ترتیب $\pm \delta u$ و $\pm \delta v$ باشد. خطای نسبی y چنین است:

$$\frac{\delta y}{y} = \pm\left(\frac{\delta u}{u} + \frac{\delta v}{v}\right) \qquad (۸-۴)$$

یعنی خطای نسبی حدی در ضرب کمیتها برابر است با مجموع خطاهای نسبی آن کمیات

۴-۲-۵) خارج قسمت

اگر $y = \frac{u}{v}$ باشد. با لگاریتم گرفتن و سپس مشتق‌گیری به رابطه زیر میرسیم:

$$\Rightarrow \frac{dy}{y} = \frac{du}{u} - \frac{dv}{v} \Rightarrow \frac{\delta y}{y} = \pm\left(\frac{\delta u}{u} + \frac{\delta v}{v}\right) \qquad (۹-۴)$$

۴-۲-۶) ضرب و تقسیم بیش از دو کمیت

اگر هر یک از حالات زیر را فرض کنیم:

$$y = \frac{1}{u \cdot v \cdot w} \quad \text{یا} \quad y = \frac{u}{v \cdot w} \quad \text{یا} \quad y = u \cdot v \cdot w$$

با انجام عملایت مشابه ۴-۲-۴ و ۴-۲-۵ داریم:

$$\frac{\delta y}{y} = \pm(\frac{\delta u}{u} + \frac{\delta v}{v} + \frac{\delta w}{w}) \qquad (۴-۱۰)$$

۴-۲-۷) توان یک کمیت

به فرض $y = u^n$ داریم: $\ln(y) = n \cdot \ln(u)$ و با مشتق‌گیری بدست خواهیم آورد:

$$\frac{dy}{y} = n \cdot \frac{du}{u} \Rightarrow \frac{\delta y}{y} = \pm n \cdot \frac{\delta u}{u} \qquad (۴-۱۱)$$

۴-۲-۸) ضرب توانها

به فرض $y = u^n \cdot v^m$ داریم $\ln(y) = n \cdot \ln(u) + m \cdot \ln(v)$ یا $\frac{1}{y} = \frac{n}{u} \cdot \frac{du}{dy} + \frac{m}{v} \cdot \frac{dv}{dy}$ و یا

$$\frac{dy}{y} = n \cdot \frac{du}{u} + m \cdot \frac{dv}{v}$$

و بنابراین:

$$\frac{\delta y}{y} = \pm(n \cdot \frac{\delta u}{u} + m \cdot \frac{\delta v}{v}) \qquad (۴-۱۲)$$

مثال – مقدار مقاومت مجهول در پل وتستون عبارتست از:

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}$$

اگر به فرض داشته باشیم:

$$R_1 = (100 \pm 0.5\%)\Omega$$
$$R_2 = (1000 \pm 0.5\%)\Omega$$
$$R_3 = (842 \pm 0.5\%)\Omega$$

اندازه R_x و خطای حدی آن را به درصد و اهم بیان کنید.

حل- $$R_x = \frac{1000 \times 842}{100} = 8420\Omega$$

خطای حدی نسبی مقاومت مجهول به درصد عبارتست از:

$$\frac{\delta R_x}{R_x} = \pm\left(\frac{\delta R_1}{R_1} + \frac{\delta R_2}{R_2} + \frac{\delta R_3}{R_3}\right) \Rightarrow \frac{\delta R_x}{R_x} = \pm(0.5\% + 0.5\% + 0.5\%) = \pm 1.5\%$$

خطای حدی به اهم:

$$\delta R_x = \frac{\delta Rx}{R_x} \times R_x \Rightarrow \delta R_x = ((1.5\%) \times 8420) = \pm 126.3\Omega$$

مثال – سه مقاومت با مقادیر نامی زیر داریم:

$$R_1 = (37 \pm 0.5\%)\Omega$$
$$R_2 = (75 \pm 0.5\%)\Omega$$
$$R_3 = (50 \pm 0.5\%)\Omega$$

اندازه و خطای حدی ترکیب متوالی این سه مقاومت به اهم و به درصد چقدر است؟

حل- خطای حدی به اهم عبارتست از:

$$\delta R = (\delta R_1 + \delta R_2 + \delta R_3)$$

$$\delta R_1 = \frac{5}{100} \times 37 = 1.85\Omega$$

$$\delta R_2 = \frac{5}{100} \times 75 = 3.75\Omega$$

$$\delta R_3 = \frac{5}{100} \times 50 = 2.5\Omega$$

$$\delta R = (1.85 + 3.75 + 2.5) = 8.1\Omega$$

$R = R_1 + R_2 + R_3$ و $\delta R = 8.1 \Rightarrow R = 162 \pm 8.1\Omega$

خطای حدی نسبی به درصد:

$$\pm \frac{8.1}{162} \times 100 = \%5 \Rightarrow R = 162 \pm \%5$$

۴-۳) انواع خطاها در اندازه‌گیری

اندازه‌گیری با صحت کامل امکان‌پذیر نیست ولی پی بردن به مقدار واقعی و چگونگی ورود خطاهای مختلف در اندازه‌گیری مهم است. مطالعه خطاها اولین قدم در جهت کاهش آنها است. خطاها منابع گوناگونی دارند. ولی معمولاً به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

۱- خطاهای آشکار ۲- خطاهای سیستمی ۳- خطاهای تصادفی

۴-۳-۱) خطاهای آشکار

این خطاها عمدتاً شامل خطاهای انسانی ناشی از قرائت، ثبت و محاسبه نتایج اندازه‌گیری است. این خطاها هر مقداری ممکن است به خود بگیرد و لذا تحلیل ریاضی آنها ممکن نیست. کاهش خطاهای آشکار با صرف دقت در قرائت و ثبت و محاسبه، تکرار چند باره اندازه‌گیری و حتی توسط افراد متفاوت، امکان‌پذیر می‌شود.

۴-۳-۲) خطاهای سیستمی

این خطاها خود به سه دسته تقسیم می‌شوند: الف- خطای دستگاه ب- خطای محیطی ج- خطای مشاهده‌ای

الف – خطا دستگاه: خطای اسباب یا دستگاه سه منشاء می‌تواند داشته باشد. یکی ضعف ذاتی دستگاه اندازه‌گیری است (کهنگی و فرسودگی یادفرمه شدن اجزای دستگاه را شامل می‌شود). دیگری به بکار بردن دستگاه (تنظیم نکردن صفر، استفاده از سیمهای با مقاومت بالا و ... و سوم اثر بارگذاری دستگاه است که قبلاً بحث آنرا کرده‌ایم.

ب- خطاهای محیطی: این خطاها ناشی از اثر عوامل خارجی بر دستگاه است. دما، فشار، رطوبت، غبار، ارتعاش، میدانهای مغناطیسی و الکترواستاتیکی از جمله این عوامل هستند که بر عملکرد دستگاه اثر می‌گذارند. برای کاهش این خطاها ثابت نگهداشتن شرایط، استفاده از لوازمی که در برابر آثار ایمن باشند، بکار بردن روشهایی که اثر اختلالات محیطی را حذف کند، و بالاخره انجام اصلاحات محاسباتی، از جمله روشهای معمول هستند.

ج- خطای مشاهده‌ای: این خطاها در دستگاههای آنالوگ با استفاده از آینه در زیر عقربه‌به طور نسبی و در دستگاههای دیجیتال با استفاده از نمایشگر رقمی به صورت تقریباً کلی، کاهش داده می‌شوند.

۴-۳-۳) خطاهای تصادفی

دیده شده است که نتایج تجربی از یک خواننده به خوانده دیگر، حتی پس از در نظر گرفتن همه خطاهای سیستمی تغییر می‌کنند. این تفاوتها ناشی از عوامل جزئی و متعددی هستند که از بسیاری از آنها بی اطلاع هستیم و از یک آزمایش به آزمایش دیگر تغییر می‌کنند. تمام اتفاقات و اختلالات ناشناخته را در هم ادغام کرده و آنها را تصادفی یا بازمانده می‌نامیم. خطاهای ناشی از این عوامل، خطاهای تصادفی یا بازمانده نامیده می‌شوند. از آنجا که خطاهای تصادفی ناشناخته‌اند، هیچ راه مطالعه‌ای به جز قوانین ریاضی احتمالات و مطالعه آماری برای تقریب بهینه مقدار حقیقی کمیت مورد نظر وجود ندارد.

۴-۴) بررسی آماری داده‌ها

۴-۴-۱) میانگین حسابی

محتمل‌ترین مقدار متغیر اندازه‌گیری شده، میانگین حسابی داده‌های خوانده شده است. در حالت نظری اگر تعداد خوانده‌ها بینهایت باشد بهترین نتیجه بدست می‌آید. گر چه در عمل تنها تعداد محدودی خوانده می‌توان داشت. میانگین حسابی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (۱۳-۴)$$

که x_i خوانده‌ها، متغیرها نمونه‌ها و n تعداد آنها است.

۴-۴-۲) پراکندگی

خاصیتی است که نشان دهنده میزان پراکندگی مقادیر در اطراف مقدار میانی است. میزان پراکندگی درجه سازگاری (دقت) و نظم داده‌ها را نشان می‌دهد. از نظر خطاهای تصادفی مجموعه‌های با پراکندگی کمتر، قابلیت اعتماد بیشتری دارند.

* ساده‌ترین معیار برای سنجش پراکندگی "گستره" است که تفاوت بین کوچکترین و بزرگترین مقدار داده‌ها است.
* معیار دیگر برای ارزیابی پراکندگی، انحراف میانگین است. برای هر داده، انحراف عبارتست از فاصله آن داده تا مقدار میانگین. حال اگر از این انحراف‌ها میانگین بگیریم (بدون در نظر گرفتن علامت آنها) طبق تعریف، انحراف میانگین بدست می‌آید:

$$D = \frac{|d_1| + |d_2| + \cdots + |d_n|}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|d_i| \qquad (۱۴-۴)$$

* یک کمیت مهم دیگر در تحلیل خطاهای تصادفی "انحراف معیار" است. این پارامتر جذر میانگین مربعات انحرافات است و با σ یا $S.D$ نمایش داده می‌شود.

$$S \cdot D = \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(d_i)^2}{n}} \qquad (۱۵-۴)$$

برای تعداد خوانده کمتر از ۲۰ این کمیت را با s نمایش می‌دهند:

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(d_i)^2}{n-1}} \qquad (۱۶-۴)$$

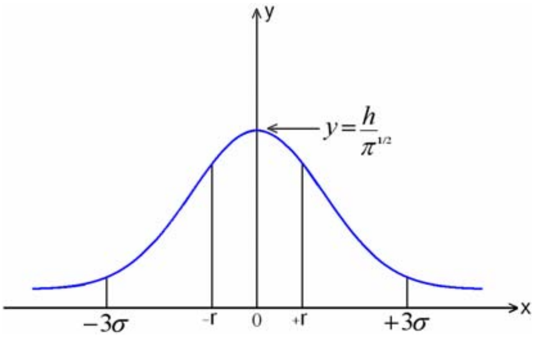
* واریانس به عنوان یک کمیت ارزیابی دیگر،مجذور σ است یعنی:

$$V=\sigma^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}di^2}{n} \qquad (۱۷-۴)$$

و برای تعداد مشاهده‌های کمتر از ۲۰:

$$V=S^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}di^2}{n-1} \qquad (۱۸-۴)$$

۴-۴-۳) منحنی نرمال (بهنجار) یا گوسی خطاها



قانون توزیع بهنجار خطاها پایه قسمت عمده مطالعات اثرهای تصادفی است. به این نوع توزیع در عمل بسیار بر می‌خوریم. قانون احتمالات می‌گوید که پیشامد بهنجار انحرافها از مقدار میانگین تعداد نا محدودی اندازه‌گیری یا مشاهده را می‌توان با عبارت زیر بیان کرد:

$$y=\frac{h}{\sqrt{\pi}}e^{-h^2x^2} \qquad (۱۹-۴)$$

x: اندازه انحراف

y: تعداد خوانده‌هایی که انحراف x دارند (احتمال وقوع انحراف x)

h: ثابتی به نام "ضریب دقت"

این منحنی حول مقدار میانگین حسابی متقارن است و سطح زیر آن برابر یک می‌باشد.

طبق معادله (۴-۱۹) با فرض $x=0$ داریم $y=\frac{h}{\sqrt{\pi}}$. بدیهی است با بزرگ بودن h منحنی تیزتر است یعنی مقادیر به هم نزدیک و حول نقطه $x=0$ قرار دارند. بنابراین منحنی‌های با h بزرگتر نشان‌دهنده داده‌های دقیقتری می‌باشند.

محدوده‌ای که زیر منحنی و در دو سوی $x=0$ واقع شده و نصف خطاهای محتمل را در بر گیرد با، +r و -r نمایش داده می‌شود. یعنی اگر در یک آزمایش پس از n بار اندازه‌گیری x معین شود، در اندازه‌گیریهای بعدی احتمال اینکه مقدار جدید بین -r و +r باشد ۵۰٪ است. با استفاده از معادله (۴-۱۹) نقطه r را می‌توان بدست آورد.

$$\int_{x_1}^{x_2} ydx=\frac{h}{\sqrt{\pi}}\int_{x_1}^{x_2} e^{-h^2x^2}dx \Rightarrow \frac{h}{\sqrt{\pi}}\int_{-r}^{+r} e^{-h^2x^2}dx=\frac{1}{2}\Rightarrow r=\frac{0.4764}{h} \qquad (۲۰-۴)$$

* در منحنی گوسی، انحراف میانگین چنین بدست می‌آید:

$$\overline{D}=\int_{-\infty}^{\infty}|x|\cdot ydx=\frac{1}{\sqrt{\pi}h} \qquad (۲۱-۴)$$

در واقع هرگاه برای یک انحراف مفروض، بیش از یک مورد دیتا داشته باشیم. هر انحراف را در تعداد آنها ضرب می‌کنیم و حاصلها با هم جمع می‌شوند و بر کل داده‌ها تقسیم می‌شود. در مورد منحنی گوسی رابطه به صورت (۴-۲۱) در می‌آید.

$$h=\frac{0.4764}{r}\Rightarrow \overline{D}=\frac{r}{0.8453} \qquad (۲۲-۴)$$

* انحراف معیار در این منحنی نیز با استفاده از (۴-۱۹) محاسبه می‌شود.

$$\sigma^2=\frac{\sum d^2}{n}=\frac{2h}{\sqrt{\pi}}\int_0^\infty e^{-h^2x^2}\cdot x^2\cdot dx=\frac{1}{2h^2} \qquad (۲۳-۴)$$

$$\sigma=\frac{1}{\sqrt{2}h}=\frac{r}{0.6745} \qquad (۲۴-۴)$$

۴-۴-۴) انحراف معیار میانگین

- اگر چند نمونه داده داشته باشیم، میانگین مجموعه‌های مختلف با روشهای آماری تحلیل می‌شوند. انحراف معیار میانگین عبارت است از:

$$\sigma_m=\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \qquad (۲۵-۴)$$

که σ انحراف معیار عناصر هر مجموعه است.

به عبارت دیگر اگر از عناصر یک مجموعه با توزیع نرمال و انحراف معیار σ به تعداد n بار متوسط بگیریم مجموعه دیگری با توزیع نرمال جدید و انحراف $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ بدست می‌آید و این مطلوب است.

فصل پنجم – اسیلوسکوپ (نوسان نما) اشعه کاتدی

۵-۱) معرفی اسیلوسکوپ

اسیلوسکوپ از مهمترین و مفیدترین دستگاههای اندازه‌گیری الکتریکی است که برای اندازه‌گیری، نمایش دادن و تحلیل شکل موجها و دیگر پدیده‌های مدارهای الکتریکی و الکترونیکی بکار می‌رود. اسیلوسکوپها در واقع رسامهای $X-Y$ بسیار سریع‌اند که سیگنال ورودی را بر محور زمان یا بر حسب سیگنال ورودی دیگر نمایش می‌دهند. قلم این رسام یک لکه نورانی است که در اثر اعمال ولتاژ ورودی بر سطح صفحه نمایش حرکت می‌کند. این لکه نورانی در اثر تابش یک پرتو الکترونی به صفحه فلوئورسان بوجود می‌آید. در اسیلوسکوپ به دلیل لختی (اینرسی) بسیار کم الکترون می‌توان تغییرات ورودی را در زمانهای کمتر از نانو ثانیه نمایش داد.

از نظر اندازه‌گیری کمیتهای الکتریکی، اسیلوسکوپ در واقع یک ولت‌سنج است و برای اندازه‌گیری کمیات دیگر (از جمله جریان) لازم است که ابتدا سیگنال مورد نظر را به سیگنال ولتاژ تبدیل نمود و سپس آنرا به اسیلوسکوپ اعمال کرد. از سوی دیگر، با استفاده از مبدلها می‌توان کمیتهای غیر الکتریکی را نیز به ولتاژ تبدیل نمود و سپس بوسیله اسیلوسکوپ اندازه‌گیری کرد.

برخی از کمیتهای دیگری که توسط اسیلوسکوپ قابل اندازه‌گیری هستند عبارتند از:

فرکانس، اختلاف فاز، تلف هیسترزیس، پارامترهای مربوط به شکل موج از قبیل زمان خیز (rise time)، زمان افت (fall time)، فراجهش (overshoot).

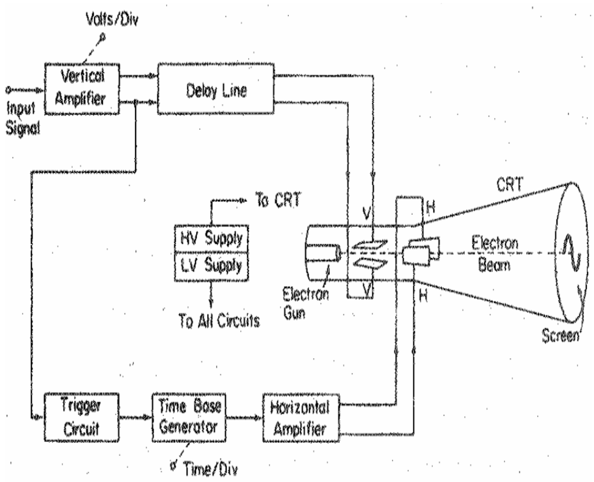
۵-۲) اجزا و بلوک دیاگرام اسیلوسکوپ

اجزاء عمده اسیلوسکوپ عبارتند از:

* لامپ (لوله) پرتو کاتدی
* تقویت کننده عمودی
* تقویت کننده افقی
* مولد جاروب و مولد پایه زمانی
* مدار تریگر(ماشه)
* منابع تغذیه

مهمترین قسمت اسیلوسکوپ لامپ اشعه کاتدی می‌باشد. در این لامپ الکترونها تولید شده و شتاب می‌گیرند. انحراف اشعه برای ایجاد یک تصویر دو بعدی اعمال می‌گردد. برخورد اشعه با صفحه فسفری برای رؤیت شکل موج انجام می‌شود. برای انجام چنین اعمالی نیاز به سیگنالها و ولتاژهای مختلفی می‌باشد که بقیه قسمتهای اسیلوسکوپ وظیفه ساخت آنها را بر عهده دارند.

شکل (۵-۱) بلوک دیاگرام یک اسیلوسکوپ ساده را نشان می‌دهد.

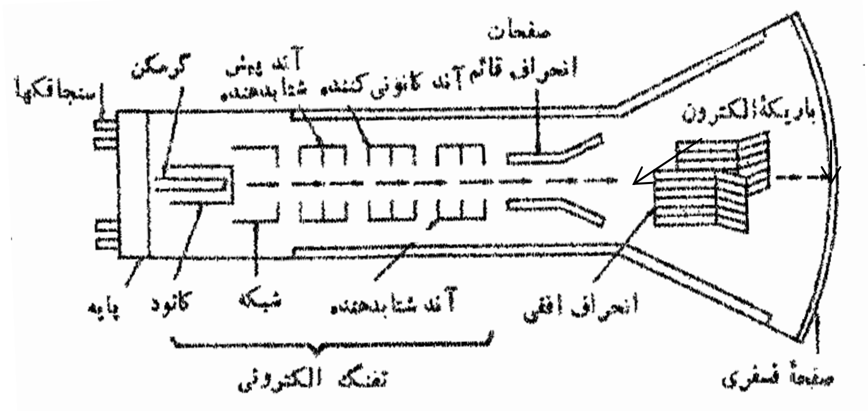


شکل (۵-۱) بلوک دیاگرام یک اسیلوسکوپ ساده

منابع تغذیه، ولتاژ لازم برای لامپ اشعه کاتدی جهت ایجاد پرتوی الکترونی و شتاب دادن آنرا تولید می‌کنند. علاوه بر این ولتاژ مورد نیاز برای سایر مدارات اسکوپ نیز توسط منبع تغذیه تولید می‌گردد. برای شتاب الکترون نیاز به ولتاژ زیادی در حد چند هزار ولت می‌باشد. در حالیکه المنت گرم کننده کاتد با ولتاژ چند ولت کار می‌کند. ولتاژ بقیه قسمتهای مدار نیز از حد چند صد ولت تجاوز نمی‌کند. برای انحراف اشعه در راستای افقی باید بین جوشنهای H اختلاف پتانسیلی اعمال گردد. این موج توسط مولد پایه زمانی ایجاد شده و پس از تقویت به جوشنها اعمال می‌گردد. معمولاً سیگنالی که قرار است نمایش داده شود به صفحات V (عمودی) وصل می‌شود. البته برای اینکه دامنه سیگنال به حدی برسد که بتواند انحراف قابل رویت پرتوی الکترونی را ایجاد کند. باید آنرا ابتدا توسط تقویت کننده عمودی تقویت کرد. بلوک مدار تریگر که بعداً درباره آن مفصلتر صحبت خواهیم کرد، جهت سنکرون کردن سیگنال ورودی با انحراف افقی و نمایش یک شکل ثابت روی صفحه اسیلوسکوپ بکار رفته است. مدار تاخیر که تاخیری در حد نانو ثانیه را روی سیگنال عمودی وارد می‌کند. جهت همزمانی با تاخیر زمانی ناشی از عملکرد مدار افقی اضافه شده است.

۵-۳) لامپ اشعه کاتدی

شکل ۵-۲ اجزاء یک لامپ اشعه کاتدی ساده را که در اسیلوسکوپهای فرکانس پائین مورد استفاده دارد، نشان می‌دهد.



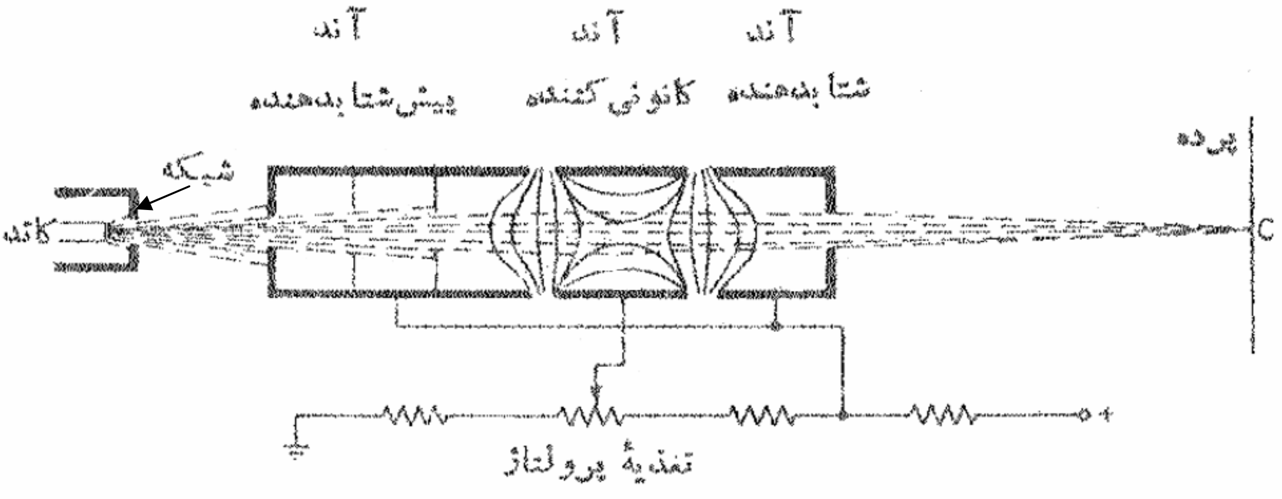
شکل (۵-۲) لامپ اشعه کاتدی

لامپ اشعه کاتدی در اندازه‌های مختلف موجود است (بر حسب قطر صفحه از 1Inch تا 25Inch).
قسمتهای اصلی CRT عبارتند از: ۱- تفنگ الکترونی ۲- صفحات انحراف دهنده ۳- صفحه فلوئورسان
۴- حباب شیشه‌ای تخلیه شده ۵- پایه که از طریق آن اتصالات برقرار می‌گردد

در این لامپ اشعه الکترونی متمرکز که توسط تفنگ الکترونی تولید شده است، تحت تاثیر ولتاژهای موجود بین جوشهای افقی و بین جوشهای عمودی دچار انحراف در راستای افقی و عمودی شده و پس از برخورد با صفحه فلوئورسان، شکل نورانی حرکت اشعه به صورت یک شکل موج پیوسته نمایش داده می‌شود. کلیه اتصالات الکتریکی از طریق پایه برقرار می‌شوند بجز ولتاژ بالای شتاب دهنده که از طریق بدنه حباب اعمال می‌گردد..

۵-۳-۱) تفنگ الکترونی

کار تفنگ الکترونی تهیه پرتو باریک و متمرکز شده الکترون و شتاب دادن به آن پرتو است. قسمتهای مختلف این بخش در شکل ۵-۳ نشان داده شده است.



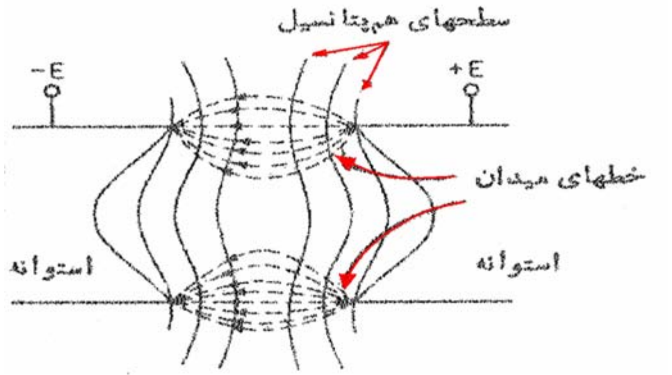
شکل (۵-۳) نمودار شماتیک تفنگ الکترونی

در اثر حرارت حاصل از گرم کننده که در پشت کاتد قرارداد کاتد شروع به صدور الکترون می‌کند. این الکترونها به سمت پتانسیل مثبت (حدود چند صد ولت) آند حرکت کرده و شتاب می‌گیرند و در مسیر حرکت از روزنه کوچکی که در "شبکه کنترل" وجود دارد می‌گذرند. این شبکه معمولاً یک استوانه نیکلی هم محور با CRT و دارای منفذی در مرکز خویش است. شدت پرتو به الکترونهای گسیل شده از کاتد بستگی دارد و شبکه کنترل با بایاس منفی نسبت به کاتد تعداد الکترونهای گسیل شده و در نتیجه شدت پرتو را کنترل می‌کند. این کنترل هم از طریق پتانسیومتر تنظیم روشنایی که در قسمت جلوی دستگاه قرار دارد و هم توسط ولتاژی که به ورودی Z اسیلوسکوپ واقع در پشت دستگاه می‌توان اعمال نمود، امکان‌پذیر است.

پرتو عبوری از شبکه کنترل باید متمرکز شود در غیر این صورت نقطه نورانی که روی صفحه تشکیل می‌شود در اثر واگرائی پرتو الکترونی غیر واضح خواهد بود. برای متمرکز کردن (کانونی کردن) پرتو دو روش وجود دارد: ۱- کانونی کردن الکترواستاتیکی ۲- کانونی کردن الکترومغناطیسی. در CRT کانونی کردن الکترواستاتیکی بکار می‌رود. (در لامپ تصویر تلویزیون کانونی کردن الکترومغناطیسی انجام می‌شود). آندهای پیش شتابدهنده، متمرکز کننده و

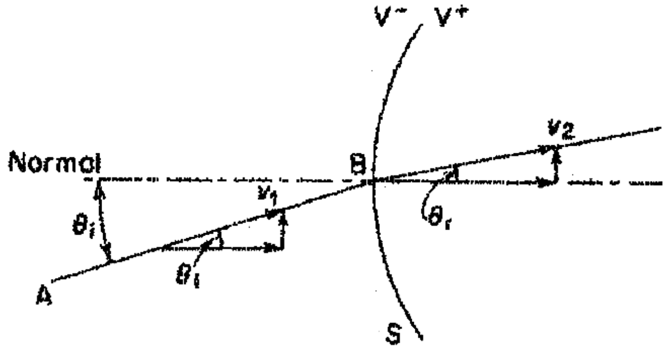
شتاب‌دهنده که همگی استوانه‌ای شکل و هم محور با لامپ هستند، در مجموع نقش یک عدسی الکترواستاتیکی را جهت تمرکز پرتوی الکترونی ایفا می‌کنند. آند وسطی دارای پتانسیل کمتری نسبت به دو آند دیگر است.

برای روشن شدن عملکرد عدسی الکترواستاتیکی به شکل ۵-۴ توجه کنید. سطوح هم پتانسیل عمود بر خطوط میدان و در وسط استوانه به صورت کوژ می باشند. الکترونهائی که در جهت عمود بر صفحه هم پتانسیل حرکت می‌کنند بدون تغییر جهت (و البته با تغییر سرعت) به مسیر خود ادامه می‌دهد. اما الکترونهای که به این سطوح عمود نیستند با تغییر مولفه سرعت عمود بر صفحه هم پتانسیل مواجه شده و جهت مسیرشان تغییر می‌کند.



شکل (۵-۴) – سطوح هم پتانسیل برای دو استوانه که نسبت به هم اختلاف پتانسیل دارند

در شکل ۵-۵ این مطلب نشان داده شده است. سطح S یک سطح هم پتانسیل است که طرف چپ دارای پتانسیل -V و طرف راست دارای پتانسیل +V است. باریکه AB با زاویه θ_i به سطح برخورد می‌کند. در هنگام خروج نیرویی در جهت نرمال S به آن وارد شده، باعث می‌شود زاویه θ_r را پیدا کند. از سوی دیگر هیچ نیرویی در راستای مماس بر S به آن وارد نمی‌شود(چرا؟).



شکل (۵-۵)- شکست اشعه هنگام عبور از سطح هم پتانسیل

بنابراین :

$$V_1 \sin(\theta_i) = V_2 \sin(\theta_r) \qquad (۵-۱)$$

$$\sin(\theta_i) / \sin(\theta_r) = V_2 / V_1 \qquad (۵-۲)$$

V_1: سرعت پرتو قبل از برخورد با سطح هم پتانسیل

V_2: سرعت پرتو بعد از برخورد با سطح هم پتانسیل

این رابطه نظیر رابطه شکست نور در هنگام عبور از مرز میان دو محیط با ضریب شکستهای متفاوت است. بنابراین سطوح هم پتانسیل می‌توانند نظیر یک عدسی عمل کرده، مسیر الکترونها را همگرا کنند. شعاع الکترونی هنگام عبور از سطوح هم پتانسیل بین دو آند اول در مسیر محور آنها قرار می‌گیرد و با عبور از سطوح هم پتانسیل دوم

روی صفحه فسفری متمرکز می‌شود بر خلاف عدسیهای نوری در اینجا می‌توان با تغییر اختلاف پتانسیل بین آندها، فاصله کانونی عدسی الکترواستاتیکی را تنظیم و اشعه را دقیقاً روی صفحه فسفری متمرکز ساخت.

۵-۳-۲) انحراف الکترواستاتیکی

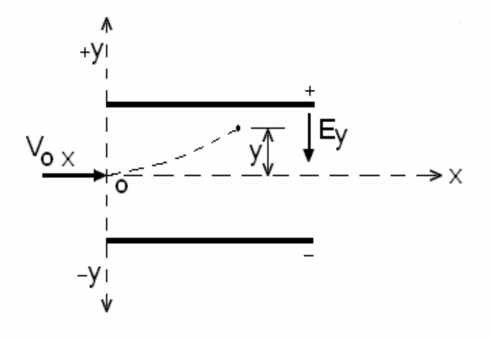
هنگامی که الکترون در یک میدان الکتریکی یکنواخت قرار می‌گیرید نیروی $F_e = -e\varepsilon$ به آن وارد می‌شود که ε

شدت میدان و e بار الکترون است. در اثر این نیرو الکترون به سمت قطب مثبت شتاب می‌گیرد. میزان شتاب با استفاده از قانون دوم نیوتن بدست می‌آید.

$$a = F/m_e = \frac{-eE}{m_e}(m/s^2) \qquad (۳-۵)$$

در یک لامپ اشعه کاتدی میدان الکتریکی که برای انحراف پرتو به کار می‌رود عمود بر مسیر حرکت آن می‌باشد. با توجه به شکل ۵-۶ هنگامی که الکترون وارد ناحیه بین دو صفحه انحراف دهنده می‌شود دارای سرعت V_{ox} بوده، حال آنکه میدان الکتریکی فقط دارای مولفه E_y می‌باشد. الکترون در راستای این میدان نیز سرعتی در جهت y پیدا خواهد کرد. مطابق با رابطه ۵-۳ شتاب حرکت الکترون در راستای y برابر است با:

$$a_y = \frac{-eE_y}{m_e} \qquad (۴-۵) \qquad \Rightarrow V_y = a_y.t = \frac{-eE_y.t}{m_e}(m/s) \qquad (۵-۵)$$



شکل (۵-۶)

لذا، جابجایی الکترون در جهت y بدست می‌آید:

$$y = \tfrac{1}{2}a_y t^2 = \frac{-eE_y t^2}{2m_e} \qquad (۶-۵) \qquad x = V_{ox}t \qquad (۷-۵)$$

با حذف t از بین دو رابطه بدست خواهدآمد:

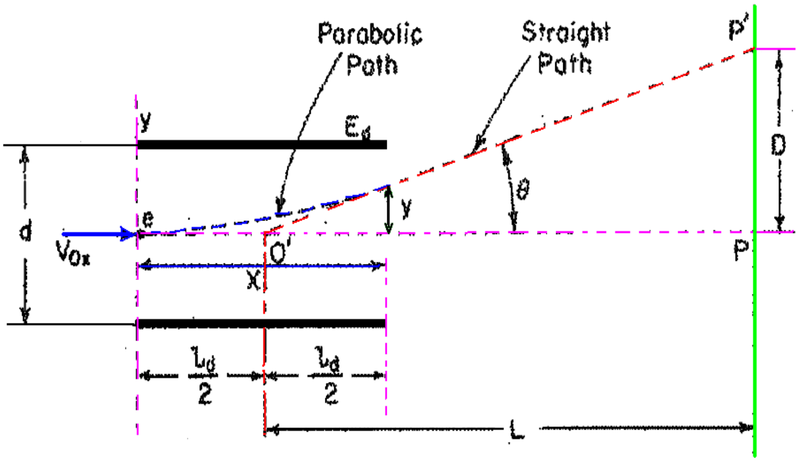
$$y = (\frac{-eE_y}{2m_e V_{ox}^2})x^2 \qquad (۸-۵)$$

لذا مسیر حرکت الکترون بین دو صفحه انحراف دهنده سهمی است. اما باید توجه داشت به محض خروج الکترون از فضای بین دو صفحه دیگر نیرویی به آن وارد نمی‌شود و در مسیر مستقیم به حرکت خود تا رسیدن به صفحه فسفری ادامه می‌دهد.

برای محاسبه D (میزان انحراف اشعه روی صفحه فلوئورسان) مطابق شکل ۵-۷ می‌توان (با استفاده از رابطه ۵-۸) چنین نوشت:

$$tan(\theta) = dy/dx\Big|_{x=l_d} = \frac{-eE_y l_d}{m_e V_{ox}^2} \qquad (۹-۵)$$

تمرین: نشان دهید امتداد این شیب در نقطه O' که در وسط صفحات انحراف دهنده است محور x را قطع می‌کند.



شکل (۵-۷) انحراف اشعه الکترونی در CRT

اگر فاصله صفحه فسفری تا نقطه O' را L بنامیم. خواهیم داشت:

$$tan(\theta)=D/L \Rightarrow D=-L\frac{eE_y l_d}{m_e . V_{ox}^2}(m) \qquad (۵-۱۰)$$

از طرفی می‌دانیم:

$$E_y=\frac{E_d}{d} \qquad (۵-۱۱)$$

که E_a اختلاف پتانسیلی است که به الکترون شتاب داده است.

$$\frac{1}{2}mV_{0x}^2=-eE_a \qquad (۵-۱۲)$$

با جایگذاری روابط (۵-۱۱) و (۵-۱۲) در (۵-۱۰) به نتیجه نهایی می‌رسیم.

$$D=\frac{L\cdot l_d\cdot E_d}{2\cdot d\cdot E_a} \qquad (13-5)$$

که پارامترهای موجود به ترتیب عبارتند از:

D: میزان جابجایی پرتو (از نقطه تعادل) روی صفحه فسفری

L: فاصله مرکز صفحات از صفحه فسفری

l_d: طول موثر صفحات انحراف دهنده

d: فاصله بین جوشهای انحراف دهنده

E_d: ولتاژ انحراف دهنده

E_a: ولتاژ شتاب دهنده

از رابطه (۵-۱۳) می‌توان نتیجه گرفت که به ازای مقادیر معین E_a و ابعاد CRT، انحراف اشعه روی صفحه فسفری به طور خطی با ولتاژ انحراف دهنده E_d متناسب است. در عمل E_d یک ولتاژ متغیر است ودر نتیجه انحراف اشعه، باعث ایجاد تصویر روی صفحه می‌شود.

* حساسیت انحراف – یکی از مشخصه‌های CRT مقدار انحراف اشعه به ازای ولتاژ یک ولت است. که همان حساسیت دستگاه می‌باشد.

$$S=\frac{D}{V_d}=\frac{L\cdot l_d}{2\cdot d\cdot E_a} \qquad (m/V) \qquad (۵-۱۴)$$

* ضریب انحراف – به صورت عکس حساسیت تعریف می‌شود و عبارت است از:

$$G=\frac{1}{S}=\frac{2\cdot d\cdot E_a}{L\cdot l_d} \qquad (V/m) \qquad (۱۵-۵)$$

پس می‌توان نوشت:

میزان جابجایی اشعه × ضریب انحراف= ولتاژ ورودی (مجهول)

$$\text{ولتاژ ورودی} = \frac{\text{میزان جابجایی اشعه}}{\text{حساسیت دستگاه}}$$

و چون ضرب معمولاً آسانتر از تقسیم است، معمولاً از ضریب انحراف به جای حساسیت استفاده می‌شود. ملاحظه می‌شود که میزان حساسیت با افزایش ولتاژ شتاب دهنده E_a کاهش می‌یابد. یعنی برای انحراف مشخص پرتو، نیاز به ولتاژ زیادتری بر روی صفحات انحراف دهنده داریم. البته E_a را نمی‌توان به هر مقدار دلخواه کوچک کرد. چون شدت روشنائی نقطه روی صفحه نورانی کم می‌شود. مقادیر نوعی (typical) حساسیت در محدوده $0.1\frac{mm}{V}$ تا $1.0\frac{mm}{V}$ می‌باشد که با ضریب انحراف $10\frac{V}{mm}$ و $1\frac{V}{mm}$ متناظرند. کلاً برای ازدیاد حساسیت دو راه وجود دارد:

۱- بزرگ کردن L و کاهش E_a

۲- بزرگ کردن l_d و کاهش d

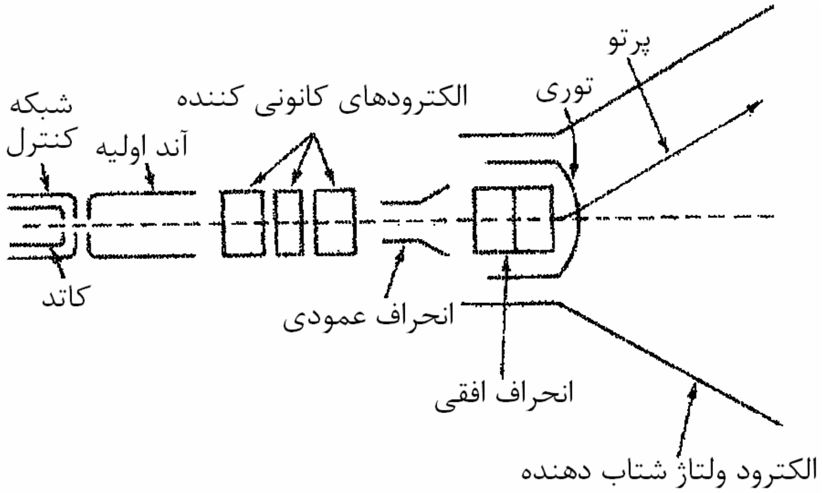
بزرگ کردن L و کاهش E_a باعث تضعیف پاسخ فرکانسی لامپ پرتوی کاتدی می‌شود.

بزرگ کردن l_d و کاهش d باعث شود که باریکه الکترون به لبه خروجی صفحات انحراف دهنده بخورد و منعکس شود. باید توجه داشت اگر تمام مشخصات صفحات افقی و عمودی انحراف دهنده یکسان باشند، به دلیل تفاوت فاصله مرکز آنها با صفحه فسفری، میزان حساسیت افقی و عمودی متفاوت خواهد بود. یعنی به جای L باید L_H و L_V تعریف شود. در آن صورت خواهیم داشت:

$$S_v=\frac{L_v\cdot l_d}{2\cdot d\cdot E_a} \quad \text{و} \quad S_H=\frac{L_H\cdot l_d}{2\cdot d\cdot E_a} \qquad (۱۶-۵)$$

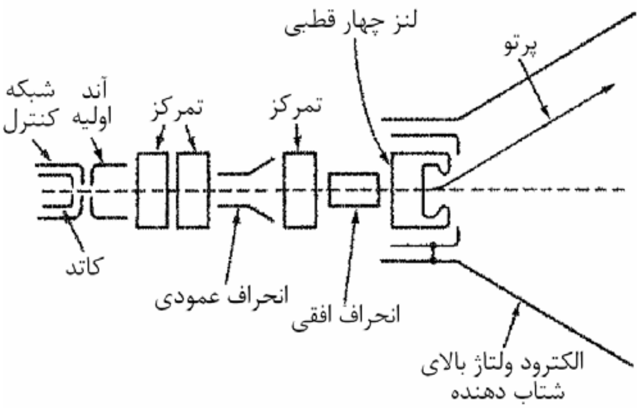
۵-۳-۳) محدودیت فرکانس

هنگامی که سرعت جابجایی پرتو برای دیدن تغییرات سریع ولتاژ ورودی بسیار زیاد است (که در فرکانسهای بالا اتفاق می‌افتد) میران روشنایی تصویر ایجاد شده روی صفحه بسیار کم خواهد بود. در اسکوپهای سریع سعی بر افزایش ولتاژ شتاب دهنده و در نتیجه افزایش انرژی (یا سرعت) پرتوی الکترونی است. طبیعی است هر چه سرعت الکترون بیشتر شود، انحراف آن توسط صفحات افقی و عمودی نیز مشکلتر خواهد شد. لذا لامپهای معمولی تا حد ۱۰۰ مگاهرتز کار می‌کنند. در لامپهای مدرن برای رفع این مشکل، شتاب دادن به الکترونها در دو مرحله صورت می‌گیرد. در این روش ابتدا الکترونها با ولتاژی در حد چند هزار ولت شتاب گرفته، وارد فضای بین صفحات انحراف دهنده می‌شوند. سپس با آند شتاب دهنده دیگری سرعت الکترونها به حد کافی افزایش می‌یابد. در این جا ولتاژ شتابدهنده ثانویه هیچ تاثیری بر حساسیت لامپ نخواهد داشت. به این لامپها اصطلاحاً لامپ با شتاب پس از انحراف می‌گویند: (Post deflection accelenation tabe). در شکل ۵-۸ نمونه‌ای از ساختمان این لامپها ارائه شده است. در اینجا از یک شبکه توری با ولتاژ بیش از ۱۰۰۰۰ ولت به عنوان آند ثانویه استفاده شده است.



شکل (۵-۸)

یکی از معایب این لامپ از بین رفتن تمرکز و حذف تعدادی از الکترونها توسط توری است. شتاب دهنده‌های ثانویه بدون استفاده از توری این مشکل را ندارند. (شکل ۵-۹) ویژگی مهم لامپ اخیر این است که پس از خروج پرتو از صفحات انحراف عمودی، عمل تمرکز مجدداً صورت می‌گیرد و پرتو به صفحات انحراف افقی میرسد. پس از آن شتاب دهنده ثانویه که یک لنز چهار قطبی است قرار دارد. این لنز علاوه بر افزایش زاویه پرتو، عدم تمرکز نیز ایجاد نمی‌کند.



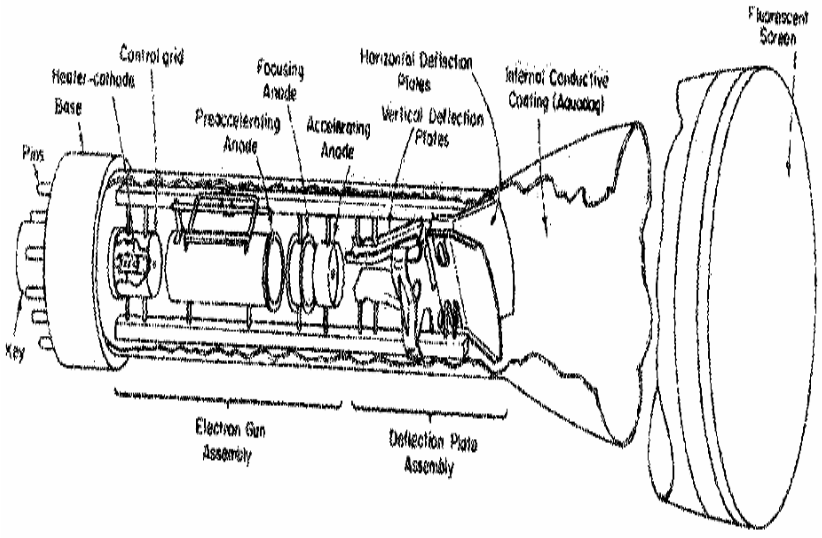
شکل (۵-۹)

۵-۳-۴) انحراف دهنده الکترومغناطیسی

انحراف دادن به اشعه توسط میدان مغناطیسی نیز امکان دارد. برای انحراف اشعه توسط میدان مغناطیسی لازم است جهت میدان عمود بر راستای حرکت پرتو باشد. این کار توسط سیم‌پیچ یوک (یوغ) عملی است. با انجام محاسبات لازم می‌توان دید که میزان حساسیت با $1/\sqrt{E_a}$ متناسب است و به همین دلیل افزایش E_a در انحراف دهنده مغناطیسی حساسیت را کمتر کاهش می‌دهد. همچنین زاویه انحراف اشعه که در روش مغناطیسی قابل حصول است بیش از روش الکتریکی است. این دو ویژگی باعث شده است که در تلویزیون از انحراف دهنده مغناطیسی استفاده شود. چرا که در این مورد تصویر بزرگ و روشن مورد علاقه است.

سئوال: ویژگیهای فوق الذکر هر کدام چه تاثیری بر تصویر دارند؟

یکی از محدودیتهای مهم انحراف دهنده مغناطیسی، محدودیت آن در پاسخ به فرکانسهای بالا است. این مشکل مربوط به طراحی تقویت کننده سیگنال است. (توضیح: L (اندوکتانس) بزرگ در مقایسه با خاصیت خازنی جوشنها که کوچک است)



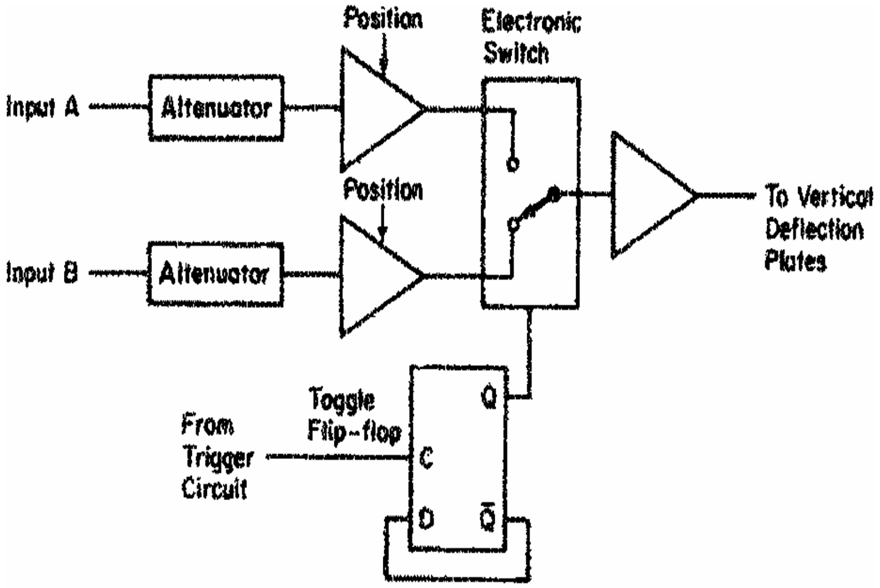
شکل (۵-۱۰)

۵-۴) اسیلوسکوپ چند کاناله

در اغلب مدارات دیدن دو یا چند سیگنال بطور همزمان مطلوب و مورد نیاز است. به همین منظور برخی از CRT ها دارای دو تفنگ الکترونی هستند. هر یک از تفنگها دارای انحراف دهنده عمودی مختص به خود بوده، در حالی که صفحات انحراف افقی برای هر دو مشترک است. این نوع CRT، لامپ اشعه کاتدی با دو پرتو نامیده می‌شود. (Dual Beam CRT) از این روش در برخی حالتهای خاصی که نیاز به دو کانال کاملاً مجزا و ایزوله از هم باشند استفاده می‌شود. یک روش متداول‌تر و ارزان‌تر روش دو کاناله می‌باشد (Dual Trace). در این روش تنها یک تفنگ الکترونی وجود دارد.

برای نمایش سیگنال در اسکوپ دو کاناله دو راه وجود دارد.

الف - یک سیگنال بطور کامل روی صفحه نمایش داده شود و سپس سیگنال دوم: در عمل به دلیل خاصیت فسفرسانس (ادامه نورانی بودن) به نظر میرسد که دو سیگنال هم زمان روی صفحه اسکوپ وجود دارند. شکل ۵-۱۱ بلوک دیاگرام لازم برای این روش را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۱)

هر بار که موج دندانه اره‌ای شروع می‌شود، سوئیچ تغییر وضعیت می‌دهد. بنابراین در یک بار انحراف افقی سیگنال اعمالی به صفحات انحراف عمودی از ورودی A بوده و در انحراف بعدی این ورودی سیگنال B است. عیب این روش این است که اگر ورودی غیرپریودیک باشد تصویر صحیحی از آن ایجاد نمی‌شود. همچنین در سرعتهای کم ، هنگامی که سرعت جاروب کند است عمل نشان دادن دو سیگنال به صورت یک در میان کاملاً مشهود است. در اسکوپهای دو کاناله این نوع نمایش سیگنالها با زدن کلید ALT (مخفف Alternative) امکان‌پذیر است. (مناسب برای فرکانس بالا)

ب - روش دوم شبیه به روش ALT است به جز اینکه در این حالت سوئیچ شکل (۵-۱۱) با سرعت خیلی زیادی بین دو حالت تغییر وضعیت می‌دهد بنابراین روی صفحه نمایش قسمتهایی از سیگنال A را به همراه قسمتهایی از سیگنال B که یک در میان پشت سر هم قرار گرفته‌اند، می‌توان دید. البته جهت محو اشعه هنگام عبور از یک کانال به کانال دیگر از شبکه کنترل استفاده می‌کنند. این روش به نام CHOP نامیده شده و در اسکوپهای دو کاناله کلیدی با همین نام قابل انتخاب می‌باشد. به خاطر محدودیت سرعت سوئیچ این روش در نمایش سیگنالهای فرکانس بالا ضعف داشته و سیگنال را به صورت منقطع نمایش می‌دهد. در واقع ALT و CHOP مکمل یکدیگرند. (مناسب برای فرکانس پائین)

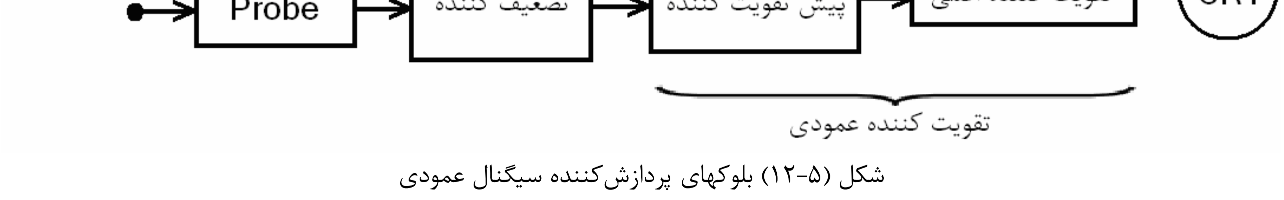
۵-۵) پردازش سیگنال عمودی

۵-۵-۱) تقویت عمودی

فرض کنید لامپ اشعه کاتدی دارای حساسیت (ضریب انحراف) $10 V/cm$ باشد. یعنی هر 10V روی جوشن عمودی باعث 1cm انحراف روی صفحه در جهت عمودی بشود. در این صورت یک سینوسی با دامنه فرضاً 10mV را نمی‌توان دید. چون باعث 10.01mm انحراف می‌شود. پس ورودی را نمی‌توان مستقیماً به جوشن اعمال کرد و باید آنرا تقویت نمود. اگر بخواهیم همان 10mV باعث 1cm انحراف شود، ابتدا باید آنرا با ضریب 1000 تقویت کنیم. حال اگر با همین ضریب تقویت، ورودی دارای دامنه 1V باشد. در آن صورت 100cm، یعنی یک متر انحراف خواهیم داشت و بنابراین باید ورودی را تضعیف کنیم.

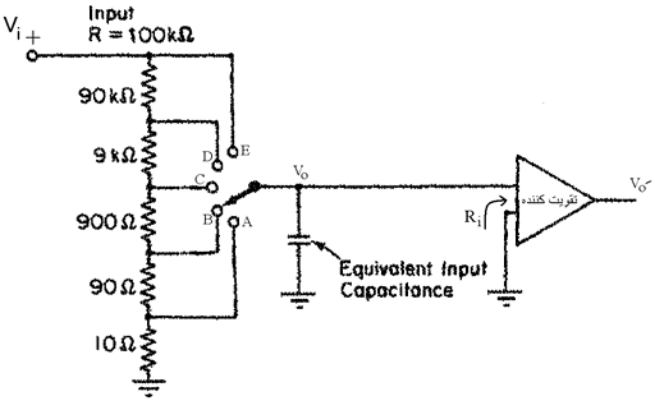
۵-۵-۲) تضعیف کننده‌ها

تضعیف کننده بین ورودی عمودی و تقویت کننده قرار می گیرد. و عملکرد آن بر اساس تقسیم ولتاژ است. میزان تضعیف توسط سلکتور $Volt/Div$ انتخاب می‌شود.



شکل (۵-۱۲) بلوکهای پردازش‌کننده سیگنال عمودی

در شکل زیر یک نمونه ساده از تضعیف کننده نشان داده شده است. امپدانس ورودی همواره ثابت است و به وضعیت سوئیچ بستگی ندارد. اما تغییر وضعیت سوئیچ امپدانس دیده شده از طرف تقویت کننده را تغییر می‌دهد.



شکل (۵-۱۳)

تقویت کننده دارای امپدانس ورودی زیاد است تا باعث بارگذاری تضعیف کننده نشود. (البته تضعیف کننده نیز مدار را بارگذاری خواهد کرد مگر اینکه R بزرگ باشد) به عنوان مثال در وضعیت D با فرض $R_i=\infty$ داریم:

$$\frac{V_o}{V_i}=\frac{10}{100}=0.1$$

و اگر $R_i=100K\Omega$ باشد در همان وضعیت داریم:

$$\frac{V_o}{V_i}=\frac{10\|100}{100}=0.09$$

- **حساسیت –** اگر حساسیت از ورودی تقویت کننده تا صفحه نمایش همان $10\, {}^{mV}\!/_{cm}$ باشد. آنگاه حساسیت از ورودی تضعیف کننده به صفحه اسکوپ چنین خواهد شد:

$$E:10\frac{mv}{cm}\qquad D:0.1\frac{v}{cm}\qquad C:1\frac{v}{cm}\qquad B:10\frac{v}{cm}\qquad A:100\frac{v}{cm}$$

(همه با فرض $R_i=\infty$)

این اعداد همان اعدادی است که در صفحه کنترل اسکوپ (صفحه جلویی اسکوپ) در اطراف سلکتور ${}^{Volt}\!/_{Div}$ نوشته می‌شود.

مثال – تقویت کننده عمودی دارای حساسیت $50\, {}^{mV}\!/_{cm}$ است. تضعیف کننده را طوری طراحی کنید که ضریب تضعیف‌های ۴۰۰، ۱۰۰، ۴۰، ۱۰، ۴ بدست آید و مقاومت ورودی اسکوپ $8M\Omega$ باشد.

$$R=R_A+R_B+R_C+R_D+R_E+R_F=8000k\Omega$$

$$\frac{R_A}{R}=\frac{1}{400}\quad و \quad \frac{R_A+R_B}{R}=\frac{1}{100}\quad و \quad \frac{R_A+R_B+R_C}{R}=\frac{1}{40}$$

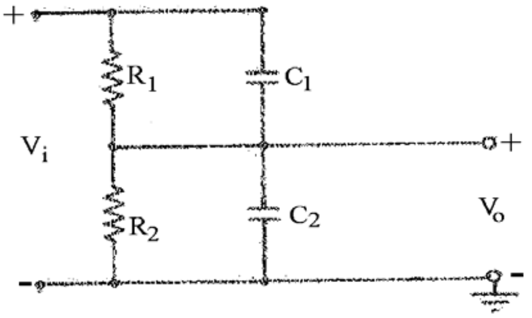
$$\frac{R_A+R_B+R_C+R_D}{R}=\frac{1}{10}\qquad \frac{R-R_F}{R}=\frac{1}{4}$$

$$R_A=20k\Omega, R_B=60k\Omega, R_C=120k\Omega, R_D=600k\Omega, R_E=1.2M\Omega, R_F=6M\Omega$$

حساسیتها : $20\ ,5\ ,2\ ,0.5\ ,0.2\ ,0.05\ \frac{v}{cm}$

- **اثر امپدانس خازنهای موازی** – با تمامی مقاومتهای تضعیف کننده، خازنهای سرگردان به صورت موازی قرار دارند که باعث می‌شود ورودی تضعیف کننده از دید یک سیگنال سینوسی دارای امپدانس وابسته به فرکانس باشد و این مسئله خطای اندازه‌گیری در فرکانسهای متفاوت را پیش می‌آورد (چرا؟).

برای حل این مشکل، اثر این خازنها را جبرانسازی می‌کنند. روش جبرانسازی این است که خازنهای واقعی با هر طبقه مقاومتی موازی شوند. ظرفیت این خازنها بسیار بالاتر از ظرفیت خازنهای سرگردان است و بنابراین در اتصال موازی با خازنهای سرگردان، ظرفیت آنها تغییری نمی‌کند و در واقع اثر خازن سرگردان را حذف می‌کنند. حال برای اینکه میزان تضعیف به فرکانس بستگی نداشته باشد، باید این خازنها دارای مقدار معینی باشند. مدار ساده شکل (۵-۱۴) را در نظر بگیرید. اگر ورودی سینوسی با فرکانس ω باشد:



شکل (۵-۱۴)

$$\frac{V_o}{V_i}=\frac{\dfrac{R_2}{1+jR_2C_2\omega}}{\dfrac{R_1}{1+jR_1C_1\omega}+\dfrac{R_2}{1+jR_2C_2\omega}} \qquad (۵-۱۹)$$

می‌بینیم برای اینکه $\frac{V_o}{V_i}$ به فرکانس وابسته نباشد باید داشته باشیم

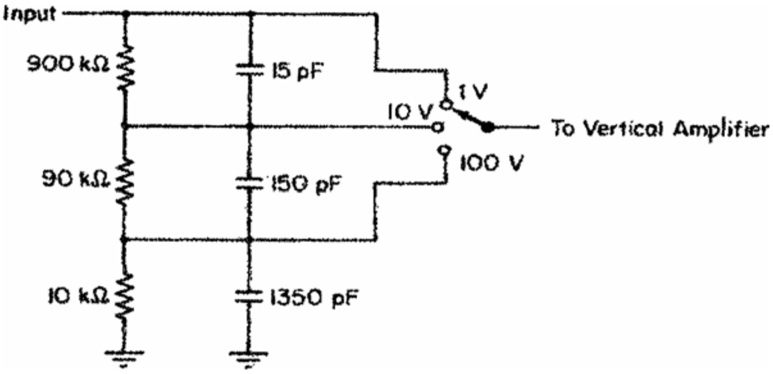
$$R_1C_1=R_2C_2 \qquad (۵-۲۰)$$

و در آن صورت در تمام فرکانسها داریم:

$$\frac{V_o}{V_i}=\frac{R_2}{R_1+R_2} \qquad (۵-۲۱)$$

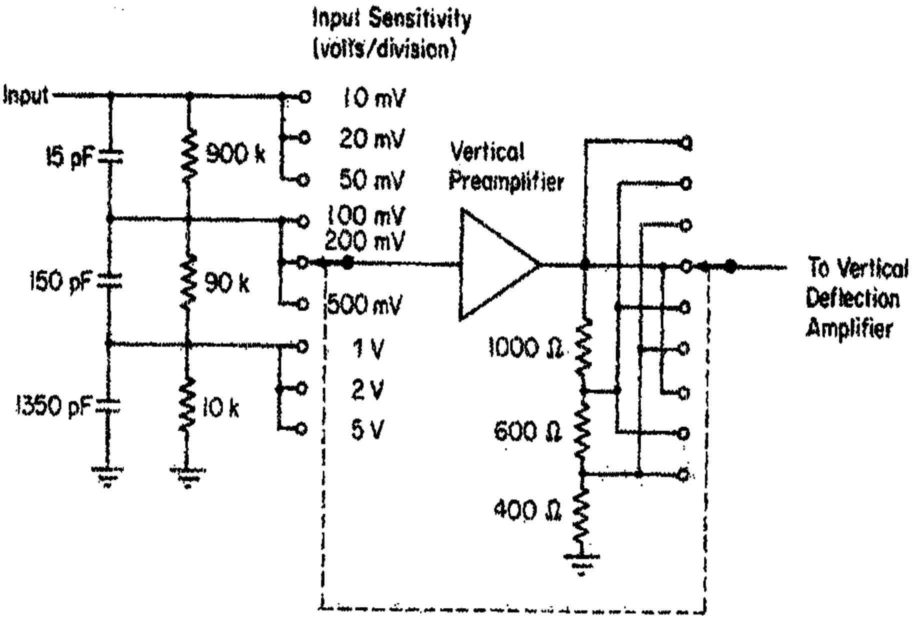
به همین ترتیب می‌توان ثابت کرد، در یک تضعیف کننده با تعداد طبقات زیادتر نیز شرط لازم و کافی این است که $R_1C_1=R_2C_2=\cdots=R_nC_n$ باشد.

یک تضعیف کننده جبران شده با خازنهای مقسم در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است. امپدانس ورودی اغلب اسکوپها را می‌توان به صورت حاصل موازی یک مقاومت $1M\Omega$ و یک خازن ۱۰ الی ۳۰ پیکو فاراد مجسم کرد.



شکل (۵-۱۵)

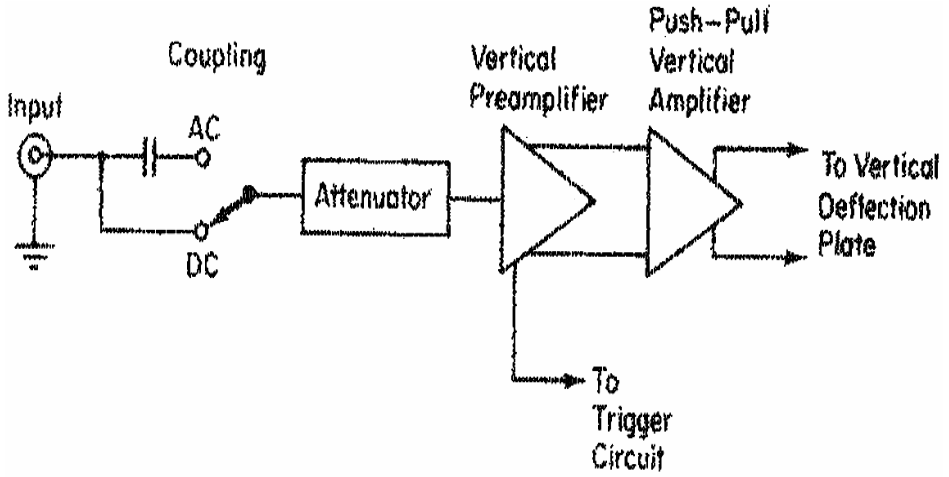
در اسیلوسکوپهای فرکانس بالا معمولاً از تضعیف کننده‌های دو طبقه استفاده می‌شود. در مرحله اول تضعیف در ورودی تقویت کننده و با نسبتهای ۱:۱۰:۱۰۰ و در مرحله دوم، تضعیف بعد از تقویت کننده و با ضرایب ۱:۲:۵ انجام می‌شود (شکل ۵-۱۶).



شکل (۵-۱۶)

۵-۵-۳) تزویج ac و dc

هنگامی که کلید در وضعیت تزویج ac است سیگنال عمودی از یک فیلتر خازنی عبور کرده و جزء dc آن حذف می‌شود ولی در تزویج dc این فیلتر حضور ندارد (شکل۵-۱۷). در صورتیکه سیگنال دارای مولفه dc بزرگی باشد و هدف دیدن تغییرات کوچک روی آن باشد، انتخاب تزویج ac این امکان را می‌دهد که مقدار dc حذف شده و با انتخاب مناسب سلکتور $Volt/Div$ این تغییرات کوچک به خوبی مشاهده شوند.

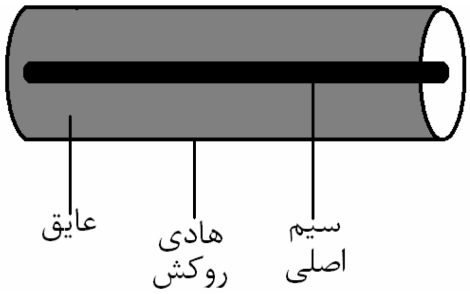


شکل (۵-۱۷) مدار پردازش سیگنال عمودی به همراه سلکتور AC/DC

باید توجه داشت در حالت کوپلاژ AC فرکانس قطع حدود چند ده هرتز بوده و لذا، اگر فرکانس سیگنال خیلی کوچک باشد، قرائت سیگنال روی اسکوپ صحیح نخواهد بود. در این موارد و باید از کوپلاژ DC استفاده شود.

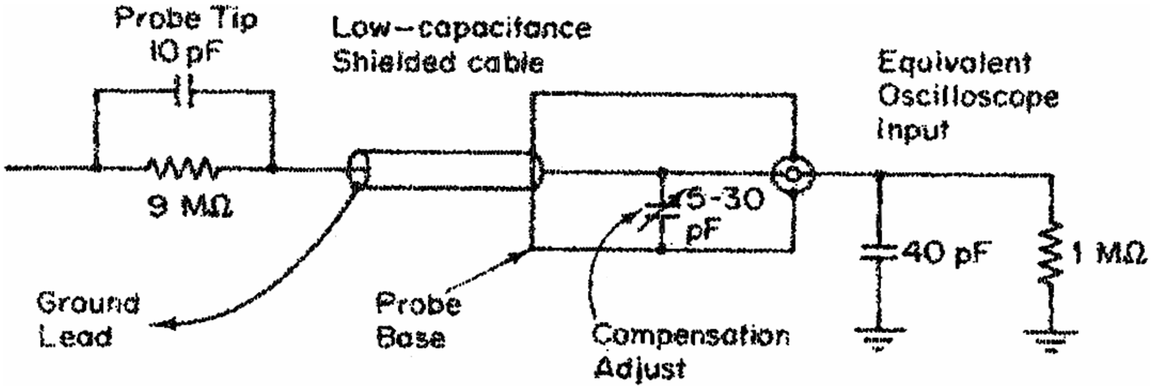
۵-۶) پروب

پروب یک کابل هم محور است که سیگنال به هادی مرکزی و زمین به هادی روکش وصل می‌شود.



شکل (۵-۱۸)

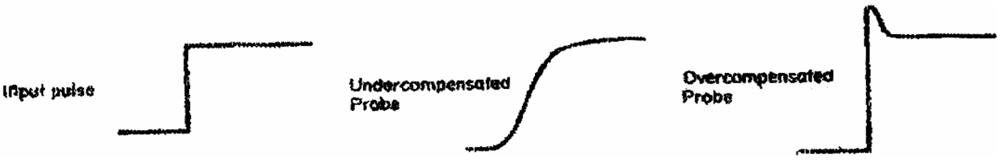
در اسیلوسکوپهای فرکانس بالا از پروبهای جبران شده و تضعیف کننده استفاده می‌شود. شکل (۵-۱۹) یک نمونه پروب ۱۰ به ۱ را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۹)

در ابتدای این پروب مقاومت $9M\Omega$ بطور موازی با خازن $10PF$ قرار دارد. در انتهای پروب نیز یک خازن $30PF$ قابل تنظیم وجود دارد. که با تنظیم آن می‌توان جبرانسازی بهینه انجام داد.

اگر خازن به درستی تنظیم شود، پاسخ اسکوپ عیناً نظیر سیگنال ورودی خواهد بود. در حالتی که ظرفیت خازن کمتر از حد باشد، به آن فوق جبرانسازی شده می‌گویند و اگر بیش از حد لازم مطلوب باشد، زیر جبرانسازی خواهد بود (شکل ۵-۲۰).

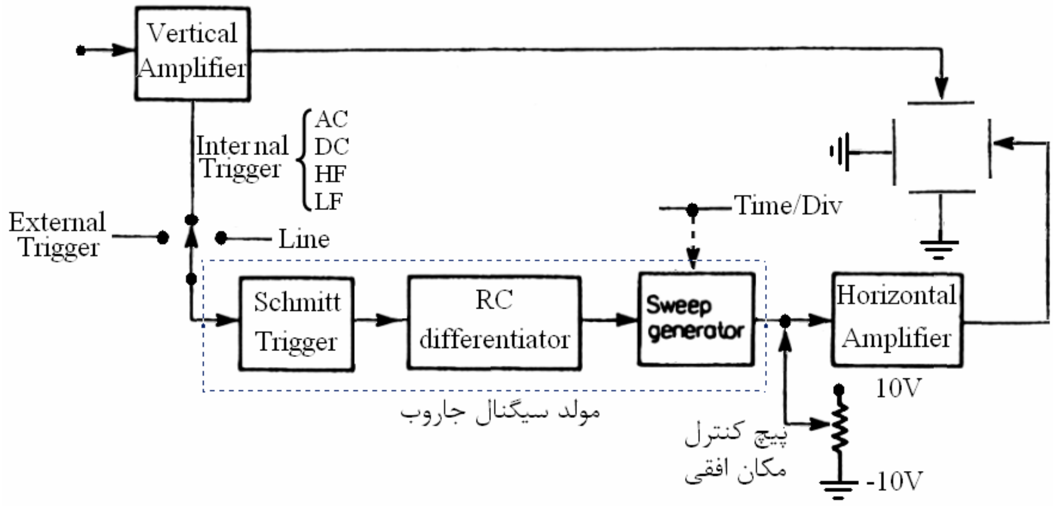


شکل (۵-۲۰)

۵-۷) سیگنال افقی و مدار جاروب (سیستم انحراف افقی)

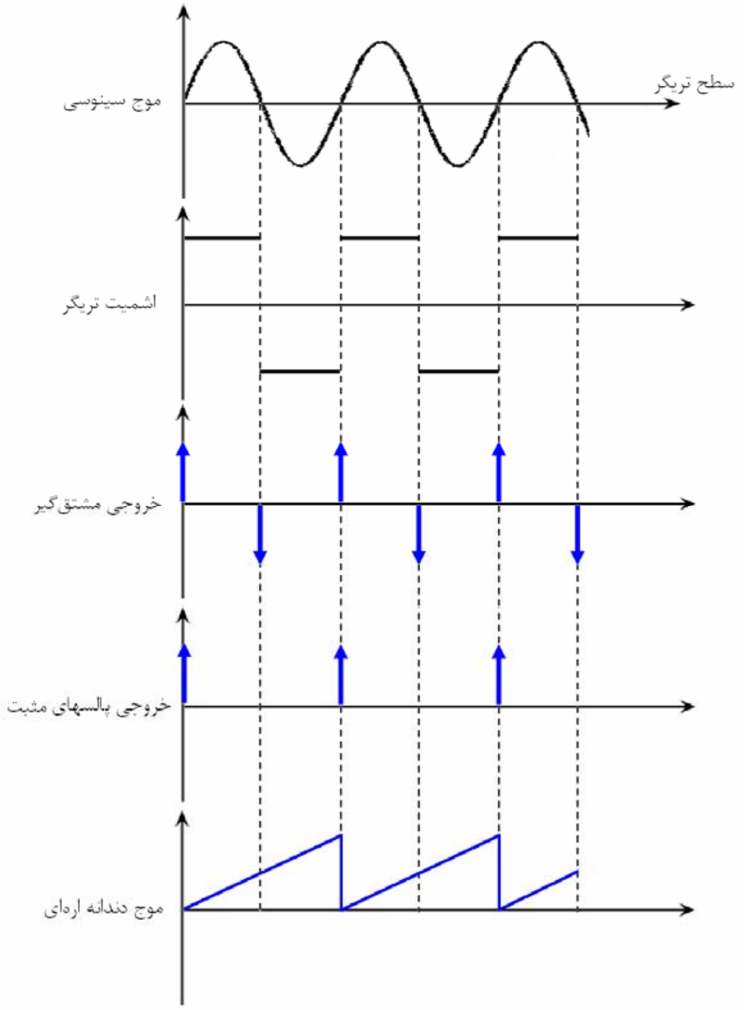
۵-۷-۱) تولید سیگنال افقی

بخشهای مختلف مدار تولید سیگنال افقی و ارتباط آن با بخشهای دیگر مدار اسکوپ در شکل (۵-۲۱) نشان داده شده است.



شکل (۵-۲۱)

همانطور که دیده می‌شود، ابتدا از سیگنال عمودی نمونه‌برداری شده و به اشمیت تریگر وارد می‌شود. در اینجا موج سینوسی به موج مربعی تبدیل می‌گردد. در مدار مشتقگیر از سیگنال مربعی مشتق گرفته می‌شود و پالسهای مثبت آن جدا می‌گردد. خروجی این مدار به مولد موج دندانه اره‌ای داده شده و سیگنال تولیدی پس از یک تقویت کننده به جوشنهای انحراف افقی می‌رسد (شکل ۵-۲۲).



شکل (۵-۲۲)

۲-۷-۵) موج دندانه اره‌ای

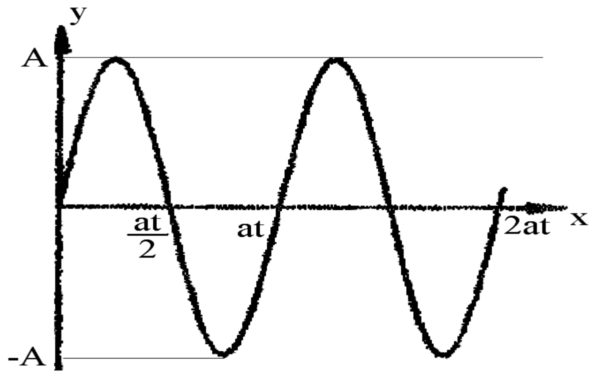
فرض کنیم می‌خواهیم سیگنال $y(t)=A\sin\dfrac{2\pi t}{T}$ را روی صفحه اسکوپ ببینیم. اگر هیچگونه ورودی به صفحات انحراف افقی ندهیم چه خواهیم دید؟ (در وسط صفحه یک خط عمودی روشن که طول آن به اندازه V_{p-p} موج سینوسی است.) اگر انحراف افقی با ولتاژ ثابت تغذیه شود چه؟ (خط جابجا می‌شود.) راه حل چیست؟

برای اینکه شکل موج ولتاژی که به صورت یک تابع سینوسی از زمان بیان می‌شود، روی صفحه اسکوپ دیده شود. باید ترتیبی اتخاذ کنیم که انحراف افقی نقش زمان را ایفا کند. به عبارت دیگر انحراف افقی باید تابعی خطی از زمان باشد. یعنی $x=at$ و این هنگامی عملی خواهد بود که دامنه ولتاژ اعمال شده به صفحات انحراف افقی به صورت خطی با زمان افزایش یابد.

حال ببینیم در این حالت چه اتفاق می‌افتد:

$$y(t)=A\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\Rightarrow y(t)=A\sin\left[\frac{2\pi}{T}\cdot\frac{x(t)}{a}\right]\Rightarrow y(t)=A\sin\left[\frac{\omega\cdot x}{a}\right] \qquad (۲۲-۵)$$

یا $$y(t)=A\sin\left[\frac{2\pi}{Ta}\cdot x(t)\right]\Rightarrow y=A\sin\left[\frac{2\pi\cdot x}{Ta}\right] \qquad (۲۳-۵)$$



شکل (۵-۲۳)

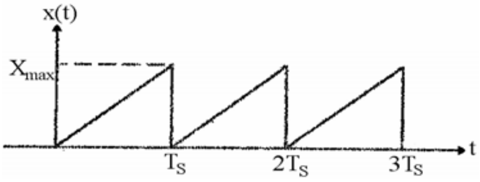
همانطور که در شکل دیده می‌شود، دوره تناوب شکلی که روی صفحه دیده خواهد شد برابر aT است. یعنی در واحد طول (مثلاً سانتی‌متر) روی صفحه تعداد $\frac{1}{aT}$ سیکل دیده می‌شود. اگر بخواهیم تعداد سیکلهای رویت شده زیاد باشد، باید a را کوچک کنیم و بالعکس. تغییر a با تغییر ضریب تقویت یا تضعیف تقویت کننده افقی امکان‌پذیر است. αدر واقع سرعت افقی نقطه نورانی روی صفحه اسکوپ بوده و مثلاً با سانتی‌متر بر ثانیه بیان می‌شود. مقیاس زمان روی محور xها در اسکوپ با واحد ثانیه بر سانتی‌متر ($Time/Div$) تعریف می‌شود و از $x(t)=at$ نتیجه می‌شود که این مقیاس با $\frac{1}{a}$ همساز است.

مثال - اگر $a=1\frac{cm}{S}$ و $T=1S$ باشد، آنگاه هر سیکل موج یک سانتی‌متر را اشغال خواهد کرد و مقیاس زمان $1\frac{S}{cm}$ است. اگر aرا نصف کنیم $a_2=\frac{a}{2}=\frac{1}{2}cm/s$ آنگاه مقیاس زمان $2\frac{S}{cm}$ خواهد شد و هر سیکل موج نیم‌سانتی‌متر را اشغال می‌کند.

حال فرض کنید در همان مثال فوق $a=1\frac{cm}{S}$ و عرض صفحه اسکوپ $10cm$ باشد. نتیجه این است که لکه نورانی در مدت $10s$ عرض صفحه را پیموده و از آن خارج خواهد شد و در واقع شکل موج عمودی را نیز با خود به

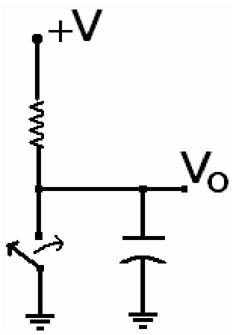
خارج از صفحه خواهد برد. برای حل این مشکل هر بار که نقطه نورانی از سمت راست صفحه خارج می‌شود، باید دوباره به چپ برگردانده شود. یعنی به جای $x = at$ که یک خط با شیب ثابت است، باید شکل موج دندانه اره‌ای داشته باشیم.

$X_{\max}$ انحراف ماکزیمم اشعه در هر بار حرکت از سمت چپ



شکل (۵-۲۴)

حال مسئله این است که فرکانس این موج (فرکانس قطع و وصل کلید شکل ۵-۲۴) چقدر باید باشد. برای روشن شدن موضوع چند توضیح لازم است:



شکل (۵-۲۵) مدار ساده مولد موج دندانه اره‌ای

میزان انحراف کل پرتو در راستای افقی مقداری است ثابت (البته نقطه شروع و نقطه انتهای انحراف یا هر یک از آنها ممکن است در محدوده دید واقع نشوند.) یعنی محدوده حرکت نقطه نورانی از چپ و راست ثابت است. مقدار مینیمم (و در نتیجه ماکزیمم) موج دندانه اره‌ای توسط پیچ position تعیین و تنظیم می‌گردد (به ازای یک وضعیت معین از این پیچ، ماکزیمم و مینیموم موج دارای مقادیر ثابت و معین خواهد بود.).

- اگر نقاط ابتدائی و انتهایی حرکت پرتو در راستای افقی، نسبت به موج سیگنال ورودی در وضعیت ثابتی نباشد. شکل ثابتی روی پرده ایجاد نخواهد شد. به عبارت دیگر عمل جاروب باید همواره در نقطه معینی از سیگنال عمودی شروع و در نقطه معین دیگری خاتمه یابد.
- پریود موج دندانه‌ای لزوماً مساوی پریود قسمت جاروب نیست و در واقع همواره پریود موج بزرگتر از زمان جاروب است. چون زمان برگشت به هر حال وجود دارد.
- با افزایش a زمان رسیدن پرتوی افقی به ماکزیمم انحراف کوچکتر می‌شود و در نتیجه زمان جاروب سریعتر پایان می‌پذیرد.

با دانسته‌های فوق نتیجه می‌شود که پریود موج دندانه اره‌ای باید به گونه‌ای باشد که صرفنظر از مقدار a مضرب صحیحی از موج ورودی را داشته باشد. شکل ۵-۲۶ یک نمونه واقعی از موج تریگر را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که برگشت موج دندانه اره‌ای لزوماً در لحظه ورود پالس تریگر بعدی رخ نمی‌دهد و بلکه تابع x_m است. اما موج جاروب برای شروع مجدد منتظر پالس تریگر بعدی می‌شود. از آنجا که پالسهای تریگر با سیگنال ورودی عمودی سنکرون هستند. پس عمل جاروب همواره از یک نقطه معین روی منحنی شروع و در یک نقطه معین خاتمه می‌یابد و شکل موج ثابتی روی پرده دیده می‌شود. در فاصله زمانی t_2 تا t_4 با فرستادن پالس بقدر کافی منفی (-) به شبکه

کنترل، باریکه الکترون قطع می‌شود. نکته دیگر اینکه پالسهای تریگر فقط هنگامی تولید جاروب می‌کنند که سیگنال دندانه اره‌ای در وضعیت توقف باشد و پالسهایی که در زمان t_1 تا t_3 میرسند بی اثر خواهد بود. پس:

الف – زمان جاروب لزوماً مضرب صحیحی از دوره تناوب موج اصلی نیست (چرا؟)

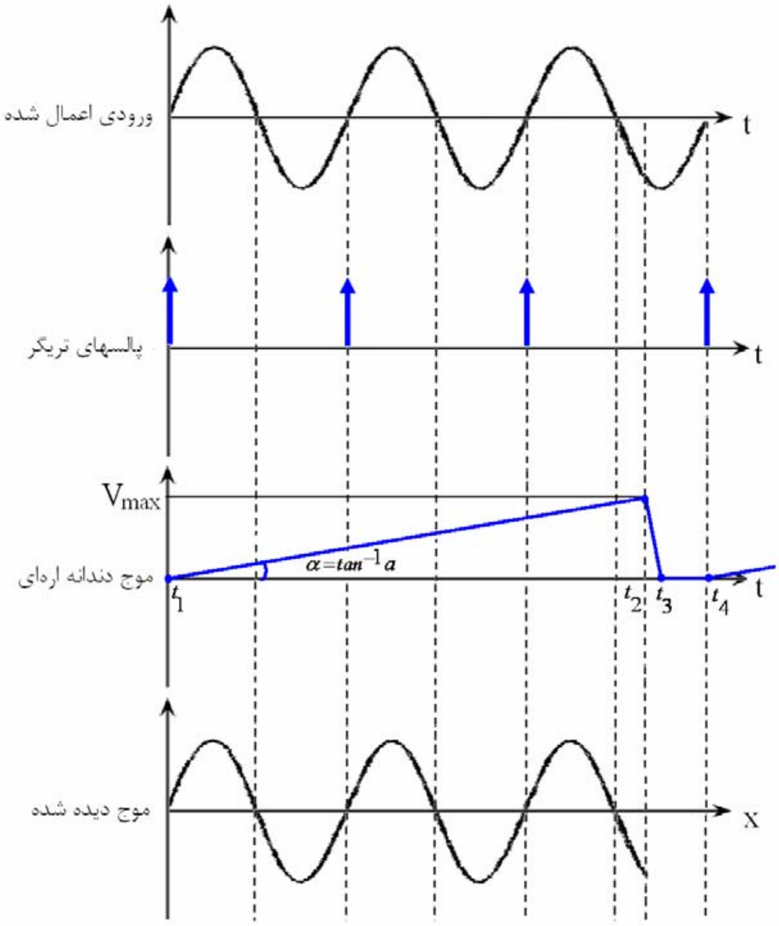
ب – موج دندانه اره‌ای دارای دوره تناوبی است که مضرب صحیح از دوره تناوب موج اصلی است.

$t_2 - t_1$: زمان جاروب $\quad$ $t_3 - t_2$: زمان برگشت

$t_4 - t_3$: زمان قطع $\quad$ $T = T_4 - t_1$ = پریود موج دندانه اره‌ای

ج – زمان توقف از یک دوره تناوب موج اصلی بیشتر نمی‌شود. (چرا؟)

د – زمان جاروب بستگی به وضعیت کلید $Time/_{Div}$ دارد. (چرا؟)



شکل (۵-۲۶)

۵-۷-۳) انواع تریگر

۱- تریگر و جاروب وضع عادی (Normal Mode): اساس کار وجود یک سیگنال متناوب است که تراز تریگر را مرتباً قطع می‌کند و پالسهای تریگر ایجاد می‌شود. البته با انتخاب کلیدی که به صورت -/+ در اسکوپ مشخص شده است می‌توان تعیین نمود که پالسهای تریگر در جبهه صعودی سیگنال متناوب ایجاد شود یا در جبهه نزولی آن و بنابراین شکل موج دیده شده متفاوت خواهد بود.

در حالت نرمال امکان اینکه از تمامی سیگنال ورودی و یا فقط از مولفه AC آن جهت ایجاد تریگر استفاده شود، وجود دارد. دو حالت فوق با قرار دادن مجموعه کلید Source در وضعیت‌های DC و AC (به ترتیب) قابل

گزینش می‌باشند. همچنین این امکان وجود دارد که مولفه‌های فرکانس بالا از سیگنال ورودی حذف شده و سپس سیگنال به مدار تریگر اعمال شود. در این حالت کلید مربوطه باید روی HF Rej قرار گیرد و بالعکس اگر لازم باشد مولفه‌های فرکانس پایین ورودی قبل از اعمال به تریگر حذف شوند از حالت LF Rej استفاده می‌شود. در اغلب اسکوپها دو انتخاب دیگر به نام TV-H و TV-V وجود دارد که به ترتیب برای سنکرون شدن با پالسهای افقی و عمودی در تلویزیون مناسب است. در اسکوپهای دو کاناله این آزادی وجود دارد که سیگنال تریگر از هر یک از کانالها انتخاب شود. در عمل بایستی کانالی را که دارای ورودی با فرکانس کمتر است ، انتخاب نمود تا عمل تریگر به درستی انجام شده و هر دو کانال بطور صحیح نمایش داده شوند.

۲- تریگر و جاروب وضع خودکار (Automatic Mode): اگر سیگنال ورودی dc باشد یا اصلاً ورودی اعمال نشود، در وضع عادی (نرمال) پالسهای تریگر ایجاد نخواهد شد و عمل جاروب صورت نمی‌گیرد. در وضع خودکار موج جاروب، صرفنظر از ورودی، مرتباً ایجاد می‌شود. حال اگر ورودی صفر یا دارای مقدارdc باشد، یک خط افقی ثابت نمایش داده خواهد شد و در صورتیکه موج ورودی متناوب به اسکوپ اعمال گردد. موج جاروب با آن سنکرون می‌شود. در شکل موجهای پیچیده همراه با نویز بهتر است از وضع عادی استفاده شود (چرا؟).

۳- تریگر و جاروب خارجی (External Trigger): اگر موج ورودی ضعیف و یا دارای مقدار dc زیاد باشد و نخواهیم آنرا حذف کنیم، یا شکل موج پیچیده باشد، انتخاب تراز تریگر مناسب قدری مشکل خواهد بود. در این حالت موج دیگری که با موج اصلی هم زمان باشد به ورودی اشمیت تریگر اعمال نموده و از آن برای تولید پالسهای تریگر استفاده می‌کنیم (مثال موج پیچیده: موج مربعی که دارای مدولاسیون PWM است).

۴- تریگر و جاروب با ولتاژ خط (شبکه): برای دیدن سیگنالهایی با فرکانسهای 50Hz، 100Hz و کلاً مضارب صحیحی از 50Hz بکار می‌رود.

۵-۷-۴) اثر سنکرون نبودن پالسهای تریگر با شکل موج ورودی عمودی

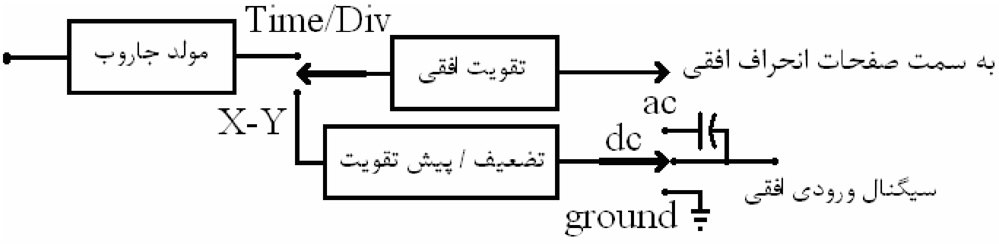
اگر فرکانس موج اصلی از فرکانس موج تریگر کمتر باشد، دوره تناوب پالسهای تریگر از دوره تناوب موج اصلی کمتر بوده و هر بار عمل تریگر قدری زودتر از دفعه قبل انجام می‌شود و شکل روی صفحه به سمت راست حرکت می‌کند.

اگر فرکانس موج اصلی از فرکانس پالسهای تریگر بیشتر باشد، دوره تناوب پالسهای تریگر از دوره تناوب موج اصلی بیشتر بوده و هر بار عمل تریگر قدری دیرتر از دفعه قبل صورت می‌گیرد و شکل موج روی صفحه به سمت چپ حرکت می‌کند.

در هر دو حالت فوق‌الذکر تصویر ثابت و پایداری روی صفحه بدست نخواهد آمد.

۵-۷-۵) ورودی افقی برای دیدن یک سیگنال برحسب سیگنال دیگر

در این حالت یک سیگنال مستقل، جدای از ورودی مورد نظر، به ورودی محور افقی وصل می‌شود و همانند محور عمودی امکان گزینش حالتهای تزویج ac یا dc و یا ground وجود دارد. همچنین تقویت کننده، تضعیف کننده و پروب جهت پردازش و انتقال سیگنال به جوشنهای افقی در مسیر قرار می‌گیرند. در واقع در این حالت تفاوتی بین جوشنهای افقی و عمودی نخواهد بود و هر یک از دو سیگنال به یک جفت از آنها اعمال می‌گردد.این عملکرد با انتخاب وضعیت "$X-y$" توسط سلکتور $Time/_{Div}$ بروز می‌نماید.



شکل (۵-۲۷)

۵-۸) اندازه‌گیری فاز و فرکانس (منحنیهای لیساژو)

هنگامی که کلید $Time/Div$ در وضعیت "$X-y$" است، اگر به ورودیهای اسکوپ دو موج ولتاژ سینوسی اعمال کنیم حالتهای مختلفی پیش می‌آید که ذیلاً به بررسی آنها می‌پردازیم:

الف – دو موج "هم فرکانس" هستند. در این صورت داریم:

$$x = A_1 \sin \omega t \quad \text{و} \quad y = A_2 \sin(\omega t + \varphi) \qquad (۲۴-۵)$$

با حذف t از دو رابطه فوق، معادله شکل موج حاصل، بدست می‌آید:

$$y = A_2 \sin\left[\sin^{-1}\left(\frac{x}{A_1}\right) + \varphi\right] \qquad (۲۵-۵)$$

حال اگر $\varphi = 0$ باشد یعنی دو موج علاوه بر هم فرکانس بودن، همفاز هم باشند داریم:

$$y = \frac{A_2}{A_1} \cdot x \qquad (۲۶-۵)$$

یعنی منحنی بصورت یک خط راست با شیب $\frac{A_2}{A_1}$ ظاهر می‌شود و اگر A_1 با A_2 نیز مساوی باشد خط حاصل نیمساز ربع اول و سوم خواهد شد.

اگر $\varphi = \frac{\pi}{2}$ باشد در آن صورت معادله یک بیضی حاصل می‌گردد: (بدست آوردن رابطه ساده است)

$$\frac{y^2}{A_2^2} + \frac{x^2}{A_1^2} = 1 \qquad (۲۷-۵)$$

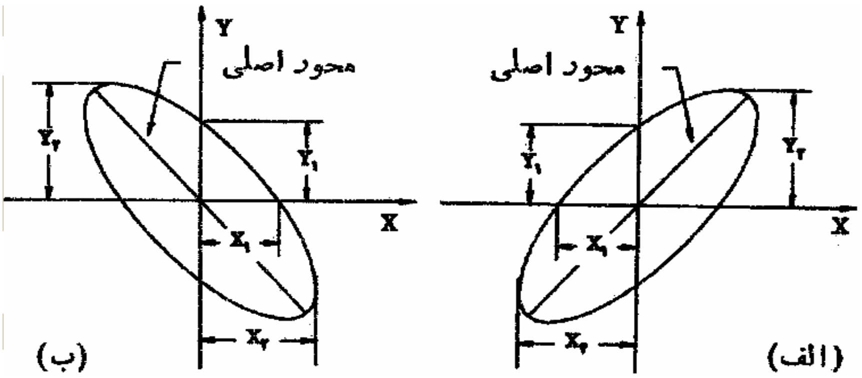
در این صورت اگر A_1 بزرگتر از A_2 باشد، قطر اصلی در جهت افقی خواهد بود و بالعکس. همچنین در صورتیکه $A_1 = A_2$ باشد، یعنی دو سیگنال هم دامنه هم باشند معادله دایره بدست می‌آید:

$$y^2 + x^2 = A^2 \qquad (۲۸-۵)$$

می‌توان ثابت کرد که برای موجهای هم فرکانس در حالت کلی (دامنه‌ها نا برابر و یا اختلاف فاز بجز صفر یا نود درجه) شکل حاصل بیضی است و در حالتهای خاص، دایره (دامنه برابر و اختلاف فاز ۹۰ درجه) و خط راست (اختلاف فاز صفر یا ۱۸۰ درجه) بدست می‌آید.

بدون توجه به دامنه ولتاژهای اعمال شده، از بیضی حاصل به راحتی می‌توان اختلاف فاز بین دو ولتاژ را بدست آورد (شکل ۵-۲۸):

$$\sin\phi = \frac{y_1}{y_2} = \frac{x_1}{x_2} \qquad (۲۹-۵)$$



شکل (۵-۲۸)

اگر قطر اصلی بیضی مانند شکل (۵-۲۸-الف) در ربع اول و سوم باشد. اختلاف فاز از صفر درجه تا ۹۰ درجه و یا از ۲۷۰ درجه تا ۳۶۰ درجه است در حالیکه این قطر در ربع دوم و چهارم قرارگیرد، اختلاف فاز از ۹۰درجه تا ۱۸۰ درجه و یا از ۱۸۰ درجه تا ۲۷۰ درجه است.

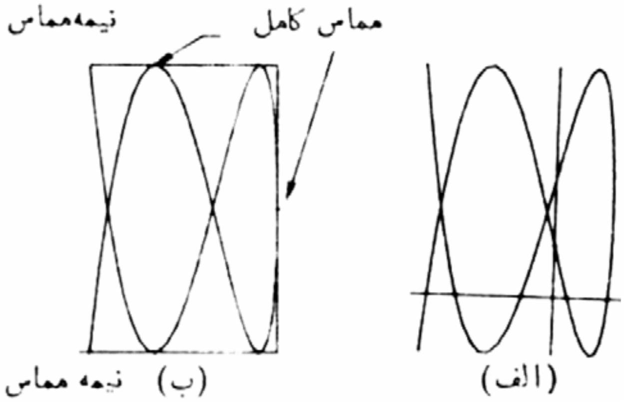
ب- دو موج دارای فرکانسهای متفاوت هستند. در این حالت اگر فرکانس یکی از دو موج شناخته شده باشد، فرکانس موج دیگر با استفاده از شکل موج حاصل و رابطه زیر بدست خواهد آمد.

$$\frac{f_y}{f_x}=\frac{\text{تعداد ماکزیمم‌های افقی شکل موج}}{\text{تعداد ماکزیمم‌های عمودی شکل موج}} \qquad (۵-۳۰)$$

که در این رابطه f_x فرکانس سیگنال اعمال شده به صفحه‌های x و f_y فرکانس سیگنال اعمال شده به صفحه‌های y است. برای منحنیهای لیساژویی که سرهای آزاد دارند، باید دو خط یکی افقی و دیگری قائم به گونه‌ای رسم شوند که از نقاط برخورد (گره‌های) منحنی نگذرند. تعداد برخوردهای این خطها با منحنی در فرمول قرار داده می‌شود:

$$\frac{f_y}{f_x}=\frac{\text{تعداد برخورد های خط عمودی با شکل}}{\text{تعداد برخوردهای خط افقی با شکل موج}} \qquad (۵-۳۱)$$

البته رابطه (۵-۲۸) را نیز می‌توان برای منحنیهای لیساژو با سرهای باز بکار برد. مشروط بر اینکه نقاط تماس نقاط باز منحنی برابر (۰,۵) تماس در نظر گرفته شود.



شکل (۵-۲۹) منحنیهای لیساژو با سرهای باز

فصل ششم – دستگاههای اندازه‌گیری الکتریکی آنالوگ (قیاسی)

۶-۱) معرفی

دستگاه قیاسی، به دستگاهی گفته می‌شود که خروجی آن به صورت تابع پیوسته‌ای است که با ورودی رابطه ثابتی دارد. تقسیم‌بندی این دستگاهها از جنبه‌های متعددی صورت می‌گیرد.

* تقسیم‌بندی برحسب کمیتی که اندازه‌گیری می‌شود:

آمپرسنج، ولت‌سنج، وات‌سنج، فرکانس‌سنج،ضریب توان‌سنج و ...

* تقسیم‌بندی بر اساس اثر حاصل از جریان و ولتاژ:

اثر مغناطیسی	آمپرسنج‌ها، ولت‌سنج‌ها، وات‌سنج‌ها، انرژی‌سنج‌ها
اثر گرمایی	آمپرسنج‌ها، ولت‌سنج‌ها
اثر الکتروستاتیکی	ولت‌سنج‌ها
اثر القایی	آمپرسنج‌ها، ولت‌سنج‌ها، وات‌سنج‌ها، انرژی‌سنج‌های ac
اثر هال	شارسنج‌ها، آمپرسنج‌ها

* تقسیم‌بندی بر اساس روش بکار رفته:

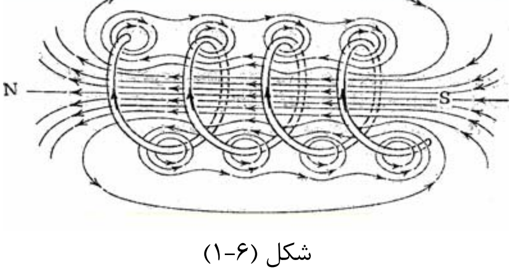
دستگاه اندازه‌گیری مستقیم: (آمپرسنج‌ها، ولت‌سنج‌ها، وات‌سنج‌ها، انرژی‌سنج‌ها)

دستگاه مقایسه‌ای: پلهای dc، ac و ....

۶-۲) اصول عملکرد

۶-۲-۱) اثر مغناطیسی:

می‌دانیم که سیم راست حامل جریان در اطراف خود میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند. در یک سیم‌پیچ، میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط حلقه‌های پیچک با هم جمع می‌شوند و پیچک به صورت آهنربای الکتریکی عمل می‌کند (شکل ۶-۱)

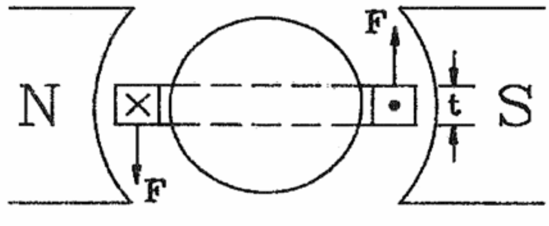


شکل (۶-۱)

* نیروی جاذبه و دافعه: آهنربای مجازی حاصل از پیچک در شکل ۶-۱ را در نظر بگیرید. هنگامیکه یک قطعه آهن نرم را نزدیک یک سر پیچک بیاوریم، جذب آن می‌شود. بنابراین اگر میزان حرکت آهن را

توسط عقربه‌ای مدرج کنیم یک دستگاه اندازه‌گیری برای جریان عبوری از پیچک ساخته‌ایم. از این اثر در نوع جذبی دستگاه اندازه‌گیری با آهن گردان استفاده می‌شود. اگر دو تکه آهن نرم نزدیک پیچک قرار دهیم. هر دو آهن به یک صورت مغناطیس می‌شوند و بین آنها نیروی دافعه بوجود می‌آید. از این اثر در نوع دفعی دستگاههای اندازه‌گیری آهن نرم (آهن گردان) استفاده می‌شود.

* نیروی بین پیچک حامل جریان و آهنربای دائم: اگر پیچک شکل ۶-۱ را به یک آهنربای دائم نزدیک کنیم. بین آنها نیروی جاذبه یا دافعه‌ای پیش می‌آید. حال اگر آهنربای دائم ثابت باشد و پیچک روی محوری بین دو تکیه‌گاه قرار گیرد. در اثر این نیرو حرکت خواهد کرد. این اثر در اسبابهای با قاب گردان و آهنربای دائم بکار می‌رود(شکل ۶-۲).



شکل (۶-۲)

* نیروی بین دو پیچک حامل جریان: بدیهی است بین دو پیچک حامل جریان نیز که بصورت دو آهنربای الکتریکی عمل می‌کنند، نیروی جاذبه یا دافعه ایجاد می‌گردد. اگر یکی از پیچکها ثابت و دیگری متحرک باشد، پیچک دوم حرکت می‌کند. از این اثر در اسبابهای از نوع "دینامومتری" استفاده می‌شود.

۶-۲-۲) اثر گرمایی

جریان اندازه‌گیری شونده از عنصر کوچکی می‌گذرد و آنرا گرم می‌کند. افزایش دما را یک ترموکوپل (زوج گرمایی) متصل به عنصر تبدیل به ولتاژ می‌کند. ترموکوپل از دو رسانای مختلف که از دو سر به هم وصلند تشکیل شده است. اگر محل پیوند این دو فلز گرما داده شود. از حلقه بسته جریان می‌گذرد. می‌توان این جریان را اندازه گرفت. که در واقع مقدار موثر جریان گذرنده از عنصر گرم‌کننده است (به تعریف مقدار موثر جریان توجه شود).

انبساط و انقباض در اثر گرما هم معیاری برای اندازه‌گیری است.

۶-۲-۳) اثر الکترواستاتیکی

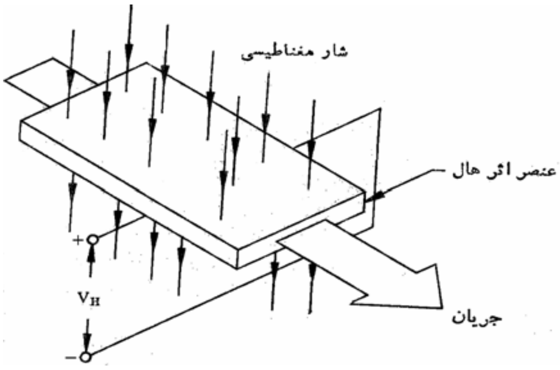
وقتی دو صفحه هادی دارای بار الکتریکی با فاصله از هم قرار گیرند، به یکدیگر نیروی کولنی وارد می‌کنند. از این نیرو برای حرکت دادن یکی از صفحه‌ها استفاده می‌شود. اسبابهای الکترواستاتیکی معمولاً ولت‌سنج هستند.

۶-۲-۴) اثر القایی

وقتی یک صفحه یا استوانه گردان که هادی ولی غیر مغناطیسی است، در میدان مغناطیسی متغیری که از آهنربای الکتریکی تغذیه شده با جریان متناوب ایجاد شده قرار گیرد، نیروی محرکه الکتریکی در آن ایجاد می‌شود که اگر مسیر بسته‌ای برای آن فراهم گردد این نیرو جریانی را از صفحه یا استوانه می‌گذراند. نیروی ایجاد شده از بر هم کنش میدان مغناطیسی متناوب و جریان القایی صفحه را به حرکت در می‌آورد. اثر القایی بیشتر در انرژی‌سنجهای ac بکار می‌رود.

۶-۲-۵) اثر هال

اگر نواری از ماده رسانای حامل جریان عمود بر میدان مغناطیسی مطابق شکل ۶-۳ قرار گیرد، بین دو لبه رسانا نیروی محرکه الکتریکی (ولتاژ) ایجاد می‌شود. اندازه این ولتاژ به جریان، چگالی شار مغناطیسی و خاصیتی از رسانا بنام "ضریب اثر هال" بستگی دارد. می‌توان این نیروی محرکه الکتریکی را پس از تقویت اندازه گرفت. عنصرهای اثر هال در اندازه‌گیری میدان و شار مغناطیسی کاربرد فراوان دارند. همچنین از آنها می‌توان به عنوان عناصر حساس به جریان نیز استفاده کرد.



شکل (۶-۳)

۶-۳) نیروهای عامل

برای عملکرد رضایت‌بخش دستگاههای اندازه‌گیری قیاسی سه نوع نیرو لازم است. این نیروها عبارتند از:

۱- نیروی انحراف دهنده ۲- نیروی کنترل کننده ۳- نیروی میرا کننده

۶-۳-۱) نیروی انحراف دهنده

عامل اصلی انحراف عقربه است و براساس یکی از اثرهای گفته شده قبل ایجاد می‌شود. در واقع سیستم انحراف دهنده دستگاه، جریان یا پتانسیل الکتریکی را به نیروی مکانیکی به نام نیروی انحراف دهنده تبدیل می‌کند.

۶-۳-۲) نیروی کنترل کننده

لزوم وجود این نیرو ایجاد تناسب بین انحراف عقربه و اندازه جریان یا ولتاژ است. وظایف سیستم کنترل عبارتند از:

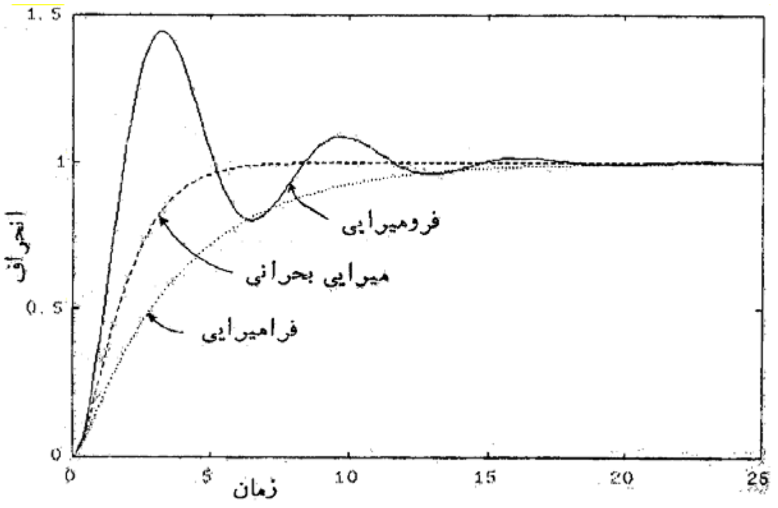
* ایجاد نیرویی مساوی و متقابل با نیروی انحراف دهنده (در موضع نهایی عقربه)
* برگرداندن سیستم متحرک به صفر پس از حذف نیرویی که باعث انحراف شده است.

نیروی کنترل در اسباب‌های عقربه‌ای معمولاً توسط فنر تامین می‌شود. کنترل گرانشی (وزنی) نیز در برخی از سیستمها کاربرد دارد. که به دلیل حساسیت آن امروزه از رواج افتاده است.

۶-۳-۳) نیروی میرا کننده

وقتی نیروی انحراف دهنده به سیستم اعمال می‌شود. این سیستم انحراف می‌یابد و نهایتاً در موضعی می‌ایستد که نیروی انحراف دهنده با نیروی کنترل کننده به تعادل می‌رسند. نیروهای انحراف دهنده و کنترل کننده را

سیستمهایی ایجادمی‌کنند که دارای لختی (اینرسی) هستند و بنابراین سیستم متحرک نمی‌تواند بدون نوسان یا بالاخیز در موضع نهایی قرار گیرد. اگر برای میرا کردن این نوسانها نیروی اضافی تامین نشود، زمان زیادی طول می‌کشد تا سیستم متحرک در موضع نهایی استقرار یابد و زمانی که باید به انتظار قرائت ماند، بسیار زیاد خواهد بود. پس برای اینکه سیستم متحرک به سرعت، بی‌لرزش و بی‌نوسان به موضع تعادل خود برسد، نیروهای میراکننده لازم است. بهترین عملکرد سیستم میرا کننده آن است که سیستم متحرک را در وضعیت میرای بحرانی قرار دهد (شکل ۶-۴).

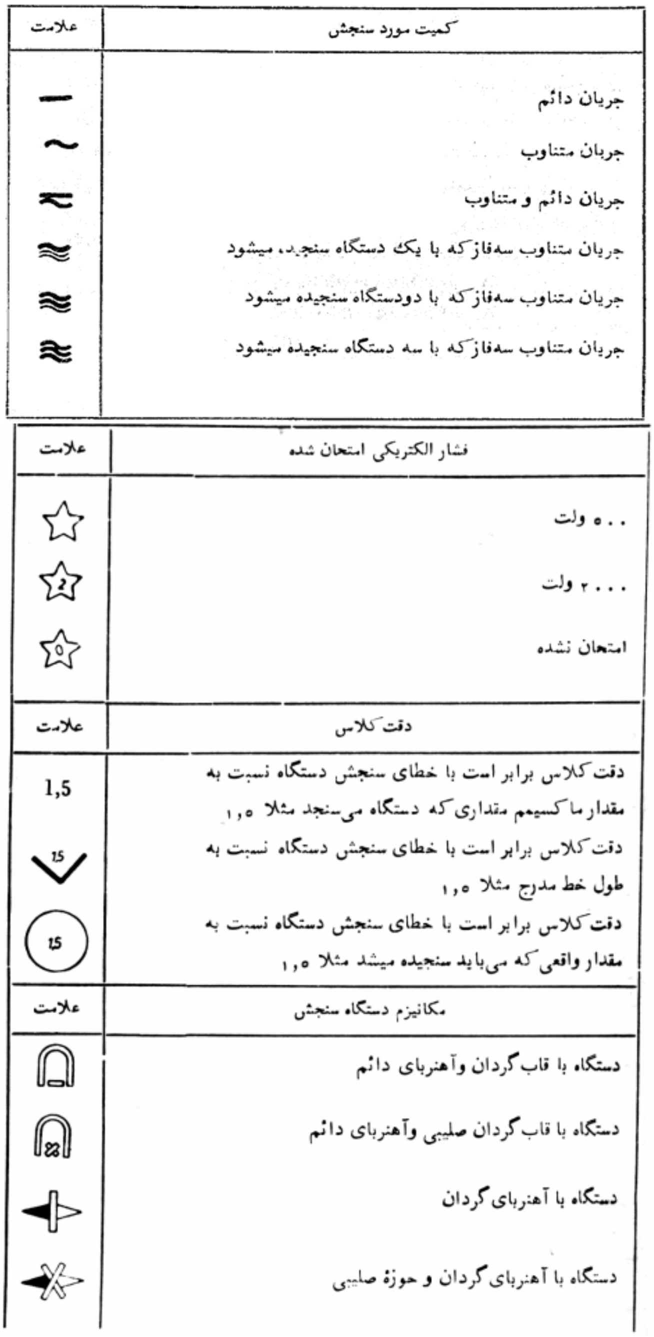


شکل (۶-۴)

* میرایی با اصطکاک هوا: پره‌هایی به انتهای عقربه متصل می‌شوند که در اتاقک هوا حرکت می کنند و با فشرده شدن هوای پشت پره با حرکت پره و درنتیجه با حرکت عقربه یا سیستم متحرک مخالفت می‌شود. از این روش دردستگاه سیم داغ و آهن گردان استفاده می‌شود.
* میرایی با اصطکاک سیال: همانند میرایی با هوا است ولی به جای هوا از روغن استفاده شده و دستگاه محدودیت کاربردی بیشتری دارد. از این روش در دستگاههای الکترواستاتیک استفاده می‌شود.
* میرایی با جریان گردابی (یا الکترومغناطیسی): وقتی رسانایی در میدان مغناطیسی حرکت می‌کند، در آن ولتاژ القا می‌شود. اگر برای این ولتاژ مسیر بسته‌ای فراهم گردد، جریان (بنام جریان گردابی) پدید می‌آید. در اثر بر هم‌کنش بین این جریان و میدان مغناطیسی، گشتاوری الکترومغناطیسی بوجود می‌آید که با حرکت مخالفت می‌کند. این گشتاور با شدت میدان مغناطیسی و جریان ایجاد شده متناسب است. جریان نیز با نیروی محرک ایجاد شده و این نیز به نوبه خود با سرعت رسانا متناسب است. بنابراین اگر شدت میدان مغناطیسی ثابت (مثلاً ناشی از یک آهنربای دائم) باشد، گشتاور با سرعت رسانا متناسب است. این نوع میرایی موثرترین نوع میرایی است و از آن در دستگاههای قاب گردان، سیم داغ و القایی استفاده می‌شود. وسایل میراکننده از این نوع دو صورت متداول دارند:
  ۱- قاب فلزی که پیچک اسباب را در خود دارد.
  ۲- صفحه آلومینیومی نازکی که به سیستم متحرک دستگاه متصل است و در میدان یک آهنربای دائم حرکت می‌کند.
* میرایی الکترومغناطیسی: حرکت یک پیچک در میدان مغناطیسی جریانی در پیچک پدید می‌آورد که تعامل بین آن و میدان مغناطیسی گشتاور ایجاد می‌کند. این گشتاور با حرکت پیچک مخالفت و پاسخ را

کند می‌کند. اندازه جریان و بنابراین گشتاور میراکننده به مقاومت مداری که دستگاه به آن وصل است، بستگی دارد. میرایی الکترومغناطیسی در گالوانومترها کاربرد دارد.

۶-۴) علائم روی دستگاههای اندازه‌گیری آنالوگ و مفهوم آنها



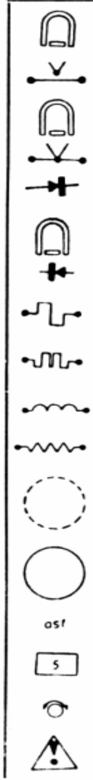
کمیت مورد سنجش	علامت
جریان دائم	—
جریان متناوب	~
جریان دائم و متناوب	≂
جریان متناوب سه‌فاز که با یک دستگاه سنجیده میشود	≋
جریان متناوب سه‌فاز که با دودستگاه سنجیده میشود	≋
جریان متناوب سه‌فاز که با سه دستگاه سنجیده میشود	≋

فشار الکتریکی امتحان شده	علامت
۵۰۰ ولت	☆
۲۰۰۰ ولت	☆ 2
امتحان نشده	☆ 0

دقت کلاس	علامت
دقت کلاس برابر است با خطای سنجش دستگاه نسبت به مقدار ماکسیمم مقداری که دستگاه می‌سنجد مثلا ۱٫۵	1,5
دقت کلاس برابر است با خطای سنجش دستگاه نسبت به طول خط مدرج مثلا ۱٫۵	15
دقت کلاس برابر است با خطای سنجش دستگاه نسبت به مقدار واقعی که می‌باید سنجیده میشد مثلا ۱٫۵	15

مکانیزم دستگاه سنجش	علامت
دستگاه با قاب گردان وآهنربای دائم	
دستگاه با قاب گردان صلیبی وآهنربای دائم	
دستگاه با آهنربای گردان	
دستگاه با آهنربای گردان و حوزهٔ صلیبی	

- دستگاه با آهن نرم گردان
- دستگاه با آهن نرم گردان صلیبی
- دستگاه الکترودینامیکی (بدون هسته)
- دستگاه الکترودینامیکی (با هستهٔ آهن مسدود)
- دستگاه الکترودینامیکی با قاب صلیبی (بدون هسته)
- دستگاه الکترودینامیکی با قاب‌صلیبی (با هستهٔ‌آهن‌مسدود)
- دستگاه اندوکسیونی
- دستگاه اندوکسیونی نسبت سنج
- دستگاه با سیم حرارتی
- دستگاه بیمتال
- دستگاه الکترواستاتیکی
- دستگاه ویبراسیونی (نوسانی)
- مبدل حرارتی (اتومبدل حرارتی)
- مبدل حرارتی (مبدل ایزوله)



- دستگاه با قاب گردان مجهز به مبدل حرارتی ایزوله
- دستگاه باقاب گردان مجهز به (اتو مبدل حرارتی)
- یکسوکننده
- دستگاه با قاب گردان مجهز به یکسوکنندهٔ خشک
- مقاومت شنت
- مقاومت سری
- مقاومت اندوکتیو
- مقاومت ظاهری
- پردهٔ الکترواستاتیکی (حفاظ الکترواستاتیکی)
- پردهٔ مغناطیسی (حفاظ مغناطیسی)
- دستگاه آستاتیکی
- ماکسیموم حوزهٔ خارجی مجاز مثلا ۵ میلی تسلا
- صفرکن عقربه
- توجه : طبق مقررات رفتار شود

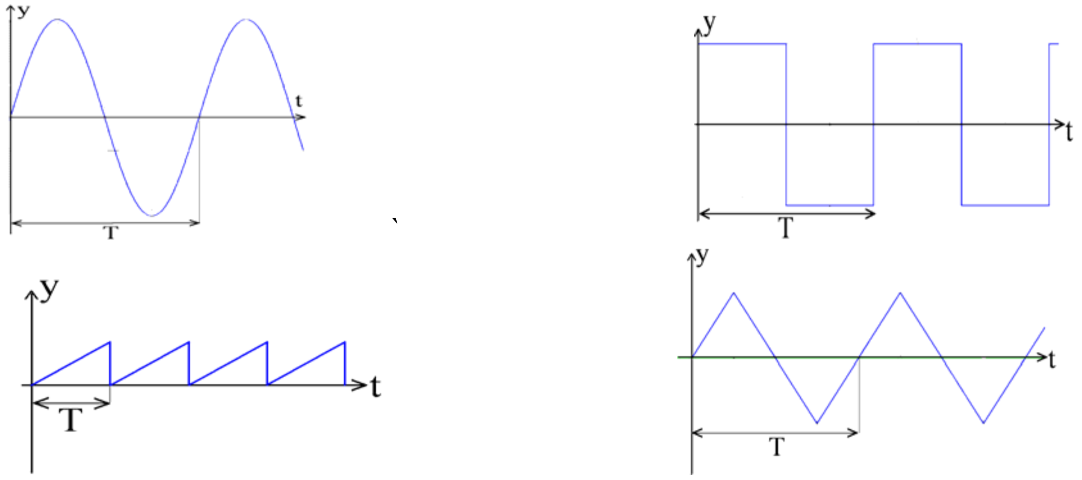
⚡	امتحان دستگاه طبق جدول III نیست
⏚	محل اتصال سیم حفاظت
FeX	دستگاه مخصوص نصب درتابلوی فلزی بضخامت ×
Fe	دستگاه مخصوص نصب در تابلوی فلزی به هرضخامتی
NFe	دستگاه مخصوص نصب در تابلوی غیر فلزی‌به هرضخامتی
Vib	دستگاهی که اثر تکان و ارتعاش در آن سنجیده شده است
m...nHz	ومقدار آن برحسب Hz مشخص شده است
علامت	**طرز قرارگرفتن**
⊥	عمودی
⊥ ±1°	عمودی باتلرانس ±1°
⊓	افقی
⊓ ±15°	افقی باتلرانس ±15°
∠60°	قرارگرفتن بطور مایل مثلا با تمایل ۶۰ درجه

شکل (۶-۵)

۶-۵) یادآوری مفاهیم مقادیر متوسط، موثر، روابط فازوری در جریان و ولتاژ متناوب

۱- مقادیر متوسط و موثر توابع پریودیک

نمونه‌هایی از امواج پریودیک (با کاربرد در الکترونیک و اندازه‌گیری)



طبق تعریف:

$$\begin{cases} y_{av} = \dfrac{1}{T}\int_0^T y(t)dt \\ y_{rms} = \left(\dfrac{1}{T}\int_0^T y^2(t)dt\right)^{1/2} \end{cases}$$

$$y(t) = a_0 + a_1 \cos\omega t + a_2 \cos 2\omega t + a_3 \cos 3\omega t + \cdots + b_1 \sin\omega t + b_2 \sin 2\omega t + \cdots$$

$$\Rightarrow y_{rms} = \left(\frac{1}{T}\int_0^T \left[a_0^2 + a_1^2 \cos^2 \omega t + a_2^2 \cos^2 2\omega t + \cdots + b_1^2 \sin^2 \omega t + b_2^2 \sin^2 2\omega t + \cdots + 2a_0 a_1 \cos\omega t \right.\right.$$

$$\left.\left. + 2a_0 a_2 \cos 2\omega t + \cdots + 2a_1 a_2 \cos\omega t \cos 2\omega t + \cdots + 2a_1 b_1 \cos\omega t \sin\omega t + \cdots \right] dt\right)^{1/2}$$

مقدارمتوسط توابعی که سینوسی و کسینوسی مرتبه اول هستند صفر است و همچنین توابع sin و cos توابع متعامد هستند، لذا فقط جملات a_0^2 ، $a_1^2 \cos^2 \omega t$ و ... را داریم.

$$\frac{1}{T}\int_0^T a_1^2 \cos^2 \omega t dt = \frac{1}{T}\int_0^T a_1^2 \frac{1+\cos 2\omega t}{2} dt = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{a_1^2}{2} + \frac{a_1^2}{2}\int_0^T \frac{\cos 2\omega t}{2} dt$$

$$\Rightarrow y_{rms} = \left(a_0^2 + \frac{a_1^2}{2} + \frac{a_2^2}{2} + \cdots + \frac{b_1^2}{2} + \frac{b_2^2}{2} + \cdots\right)^{1/2}$$

ضریب شکل طبق تعریف= $\dfrac{\text{مقدار تابع‌موثر}}{\text{مقدارمتوسط}}$ و اگر مقدار متوسط صفر باشد: ضریب شکل= $\dfrac{\text{مقدار تابع‌موثر}}{\text{مقدارمتوسط نصف شکل}}$

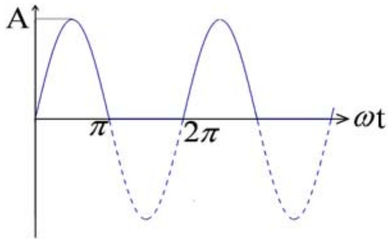
مثال – محاسبه مقدار متوسط و موثر تابع $Y(t) = A\sin\omega t$

$$y_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T A\sin\omega t dt = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} A\sin\omega t d(\omega t) = \frac{-A}{2\pi}\left[-\cos\omega t\right]_0^{2\pi} = 0$$

$$y_{rms} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} A^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) = \frac{A^2}{2\pi}\int_0^{2\pi} \frac{1-\cos 2\omega t}{2} d(\omega t) = \frac{A^2}{2\pi}\int_0^{2\pi} \frac{1}{2} d(\omega t) = \frac{A^2}{2\pi}\left(\frac{\omega t}{2}\right]_0^{2\pi} = \frac{A^2}{2\pi}\cdot\pi = \left(\frac{A^2}{2}\right)$$

$$\Rightarrow y_{rms} = \frac{A}{\sqrt{2}}$$

تمرین –۱- مقدار موثر و متوسط و ضریب شکل موج برای شکل موج سینوسی یکسوشده نیم موج را محاسبه کنید:



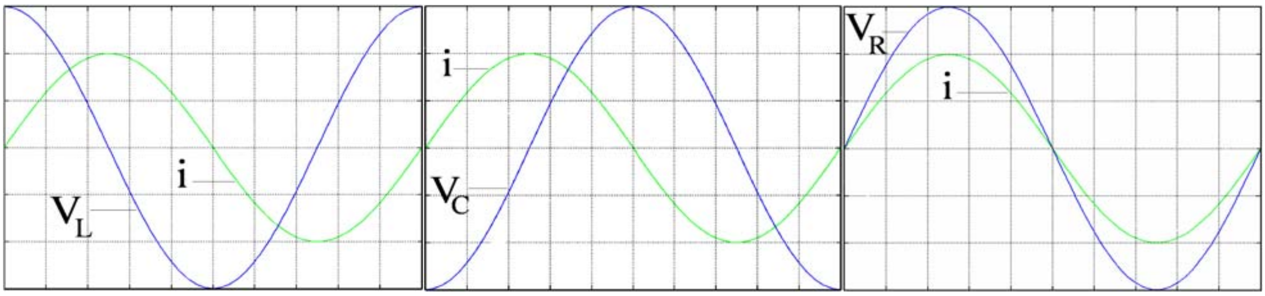
$$y_{av} = \frac{A}{\pi} \qquad y_{rms} = \frac{A}{2}$$

ضریب شکل موج $= \dfrac{A/2}{A/\pi} = \dfrac{\pi}{2}$

۲- موج سینوسی یکسو شده تمام موج در 0.707 برابر مقدار ماکزیمم دامنه بریده شده است. مقادیر متوسط و موثر تابع را بدست آورید. ($y_{av} = 0.54A$ ، $y_{rms} = 0.584A$)

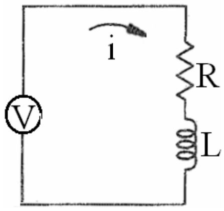
۲- جریان و توان در مدارهای جریان متناوب سینوسی

امپدانس شاخه	جریان: $i(t) = I_m \sin\omega t$	ولتاژ شاخه (کلی)	نوع عنصر
R	$Ri == RI_m \sin\omega t$	$V_R = R\cdot i$	R
$j\omega L$	$V_L = L\cdot di/dt = LI_m \omega \cos\omega t$	$V_L = L\cdot\frac{di}{dt}$	L
$\frac{1}{j\omega L}$	$V_C = \frac{1}{C}\int i(t)dt = -\frac{1}{\omega C} I_m \cos\omega t$	$V_C = \frac{1}{C}\int i\cdot dt$	C



خازن ایده‌آل $\varphi=\pi/2$ پیشفاز   سلف ایده‌آل $\varphi=\pi/2$ پسفاز   مقامت ایده‌آل $\phi=0$

مثال – مدار شکل روبرو شامل سلف و مقاومت متصل به منبع ولتاژ سینوسی است. امپدانس مدار را بدست آورید:



$$V=V_m \sin \omega t$$

$$V_m \sin \omega t = Ri + L\,{di}/{dt} \quad \text{و} \quad i(0)=0$$

پس از حل این معامله دیفرانسیل داریم:

$$i(t)=\frac{V_m}{\sqrt{RL+\omega^2 L^2}}\left[\sin(\omega t-\phi)+\sin\phi\cdot e^{-t/\tau}\right]$$

$$\begin{cases}\tau=\dfrac{L}{R}\\ \phi=\tan^{-1}\dfrac{\omega L}{R}\end{cases}$$

جمله دوم در عبارت بالا با گذشت زمان کاهش می‌یابد. قسمت گذرای جریان است مورد توجه نیست. جمله اول قسمت دائمی است که شکل سینوسی دارد. دامنه جریان برابر است با:

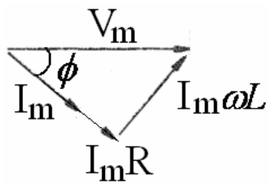
$$I_m=\frac{V_m}{\sqrt{R^2+\omega^2 L^2}}=\frac{V_m}{|Z|}$$

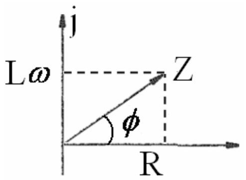
و همانطور که دیده می‌شود ϕ زاویه تاخیر جریان مدار نسبت به ولتاژ است که تانژانت آن $\frac{\omega L}{R}$ می‌باشد.

چنانچه $L=0$ باشد $Z=R$ شده و $\phi=0$ می‌شود و در حالتی که $R=0$ باشد $|Z|=\omega L$ و $\phi=\frac{\pi}{2}$ است و در حالت کلی ϕ بین 0 و $\frac{\pi}{2}$ است. رابطه بین ولتاژ و جریان را می‌توان بصورت تصویری (برحسب فیزورها) نشان داد (تفاوت فیزور و بردار چیست؟)

طول فیزور مبین دامنه موج و زاویه آن مبین اختلاف فاز موج سینوسی مورد نظر است.

همچنین Z را می‌توان بصورت یک بردار در صفحه مختلط نمایش داد.





$$Z=R+j\omega L \Rightarrow |Z|=\left(R^2+\omega^2 L^2\right)^{1/2} \qquad \angle Z=\tan^{-1}\frac{\omega L}{R}$$

تمرین – روابط را برای حالتی که مدار شامل مقاومت و خازن است بدست آورید.

برای محاسبه توان لحظه‌ای مدار، ولتاژ را در جریان ضرب می‌کنیم.

$$W(t)=\frac{V_m^2}{Z}\sin\omega t\cdot\sin(\omega t-\phi)=\frac{V_m^2}{2Z}\left[\cos\phi+\cos(2\omega t-\phi)\right]$$

دیده می‌شود توان دارای یک جمله ثابت و یک جمله متغیر با زمان است. "پس توان لحظه‌ای در سیستم تکفاز ضربه‌ای است."

$$W_{av}=\frac{1}{T}\int_0^T W(t)=\frac{V_m^2}{2Z}\cos\phi=\frac{V_m I_m}{2}\cos\phi=V_e I_e\cos\phi$$

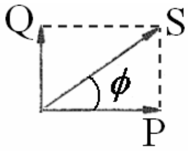
که V_e، I_e یا مقدار موثر همان rms ولتاژ و جریان هستند.

$\cos\varphi$ ضریب توان مدار نامیده می‌شود و در صورتیکه بار مقاومتی خالص باشد $\cos\varphi=1$ و در حالت سلفی خالص $\cos\varphi=0$ و بنابراین $W_{av}=0$ است. یعنی مدار سلفی خالص (و طبعاً خازنی خالص) توانی مصرف نمی‌کنند. بلکه در نیم سیکل انرژی را دریافت و در نیم سیکل بعدی آنرا به شبکه بر می‌گردانند.

از همین جا مفهوم توان ظاهری، توان اکتیو (حقیقی - واته) و توان راکتیو (غیر حقیقی – دواته) تعریف می‌شود.

$S=VI^*$ $\qquad P=VI\cos\phi$ $\qquad Q=VI\sin\phi$ $\qquad |S|=\sqrt{P^2+Q^2}$

دیده می‌شود که:



(تمام روابط توان در اینجا برحسب مقادیر موثر سیگنالهای سینوسی هستند)

توان کمپلکس$=V\cdot I^*$

$P=V\cdot I\cdot\cos\varphi=\mathcal{R}e\,V\cdot I^*$

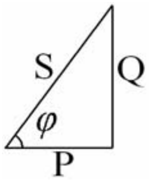
$Q=V\cdot I\cdot\sin\varphi=Im\,V\cdot I^*$

$|V\cdot I^*|=|S|$

$\cos\varphi=\frac{P}{S}\Rightarrow\phi=\cos^{-1}\frac{P}{S}$ $\qquad$ قبلاً دانستیم: $\phi=\cos^{-1}\frac{R}{Z}$

تصحیح ضریب توان مدار بوسیله خازن

بارها معمولاً سلفی هستند و جهت اصلاح ضریب توان مدار با خازن موازی مشکل را حل می‌کنیم.



مثال – فرض کنیم در مداری $\cos\varphi=0.6$ و توان واته 1200W است. خازن لازم برای تصحیح ضریب توان تا 0.9 را محاسبه کنید

$\cos\varphi_1=0.6 \quad \cos\varphi_2=0.9$ $\qquad P_l=1200W$ $\qquad Q_l=1600VAR$

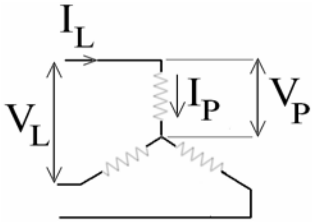
$$S_2 = \frac{P}{\cos\varphi_2} = \frac{1200}{0.9} = 1333VA \qquad Q_2 = S_2 \sin\varphi_2 = 585VAR$$

توان خازن $Q_c = Q_1 - Q_2 = 1600 - 585 = 1015VAR$

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} \Rightarrow X_c = \frac{220^2}{1015} = 47.68\Omega \qquad X_c = \frac{1}{C\omega} \Rightarrow C = \frac{1}{\omega X_c} = 0.000066F = 66\mu F$$

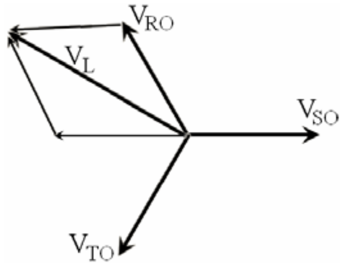
توان در مدارهای سه‌فاز

بیشتر بارهای صنعتی سه‌فاز هستند و اتصال آنها به دو صورت ستاره یا مثلث انجام می‌شود. ولتاژ بین دو خط شبکه را ولتاژ خط (V_L) و جریان خط را I_L می‌نامیم. ولتاژ پس فاز بار را با V_P و جریان پس‌فاز را با I_P نمایش می‌دهیم.



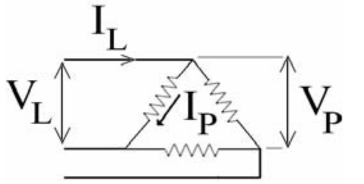
در اتصال ستاره $I_P = I_L$

$V_L = \sqrt{3} V_P$



$V_L = V_{RS} = V_{RO} - V_{So} = \sqrt{3} V_P$

همچنین در اتصال مثلث



$$I_L = \sqrt{3} I_p \qquad V_L = V_p$$

پس توان متوسط سه‌فاز را اگر جمع توانهای متوسط هر فاز بگیریم:

$W = 3V_P I_P \cos\varphi = \sqrt{3} V_L I_L \cos\varphi$

که این دو رابطه مستقل از نحوه اتصال مثلث یا ستاره است. (سه فاز متقارن)

توان لحظه‌ای سه‌فاز

اگر دامنه هر فاز V_m و امپدانس هر فاز Z با زاویه ϕ باشد، توان لحظه‌ای سه فاز جمع توان لحظه‌ای فازها است.

$$W_{3\phi}(t)=\frac{V_m^2}{Z}\sin\omega t\sin(\omega t-\phi)+\frac{V_m^2}{Z}\sin\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}\right)\cdot\sin\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}-\phi\right)+\frac{V_m^2}{Z}\sin\left(\omega t-\frac{4\pi}{3}\right)\cdot\sin\left(\omega t-\frac{4\pi}{3}-\phi\right)$$

با بسط جملات نتیجه می‌گیریم که:

$$W_{3\phi}(t)=\frac{V_m^2}{2Z}\left[\cos\phi+\cos(2\omega t-\phi)+\cos\phi+\cos\left(2\omega t-\frac{4\pi}{3}-\phi\right)+\cos\phi+\cos\left(2\omega t-\frac{8\pi}{3}-\phi\right)\right]$$

مجموع هر سه جمله سینوسی که با هم $2\pi/3$ با اختلاف فاز دارند صفر است. لذا:

$$W_{3\phi}(t)=\frac{V_m^2}{2Z}(3\cos\phi)=3V_eI_e\cos\phi$$

بنابراین توان لحظه‌ای در یک مصرف‌کننده سه فاز مقدار ثابتی دارد و ضربه‌ای نیست.

فصل هفتم – گالوانومتر و کاربردهای آن در اندازه‌گیری

۷-۱) معرفی

گالوانومتر دستگاهی است که برای اندازه‌گیری مقادیر کوچک جریان بکار می‌رود و حداکثر جریان عبوری از آن به ۵۰ میلی‌آمپر محدود می‌شود. کاربرد اصلی گالوانومتر در پلهای اندازه‌گیری است. علت آن، ویژگیهای گالوانومتر از جمله حساسیت مناسب، پایداری در نقطه صفر، دوره تناوب کوچک و میرایی بحرانی می‌باشد.

همچنین در دستگاههای اندازه‌گیری قاب‌گردان (ولتمتر، آمپرمتر و اهم‌متر قاب‌گردان) قسمت اصلی دستگاه از یک گالوانومتر تشکیل می‌شود. البته کاربرد گالوانومتر در این اندازه‌گیری‌ها مستلزم افزودن عناصری به آن است که در بخشهای بعدی این فصل به آن خواهیم پرداخت.

در گالوانومتر از نیروی محرکه الکترومغناطیسی برای انحراف عقربه و همچنین میرایی استفاده می‌شود و نیروی مقاوم توسط فنر پیچشی تامین می‌گردد. در واقع،گالوانومتر یک مبدل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی است که با واسطه میدان مغناطیسی این تبدیل را انجام می‌دهد.

اجزای تشکیل دهنده گالوانومتر عبارتند از:

۱- پیچک گردان: قاب مستطیلی از چند دور سیم نازک – قابل دوران حول محور قائم

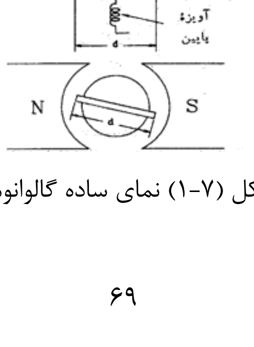
۲- هسته آهنی: این هسته استوانه‌ای است و قاب روی آن قرار می‌گیرد و جریانهای گردابی داخل این هسته میرایی سیستم را افزایش می‌دهد.

۳- آهنربای دایم: از دو تکه تشکیل شده و یک فاصله هوایی یکنواخت بین قطبهای آن و هسته آهنی ایجاد می‌شود.

۴-آویزه: نوار تخت هادی که رساندن جریان به پیچک را نیز بر عهده دارد. آویزه پائین برای خروج جریان تعبیه شده و اثر گشتاور ناچیزی دارد.

۵- آینه کوچکی روی آویزه نصب شده که باریکه نوری به روی آن می‌تابد.

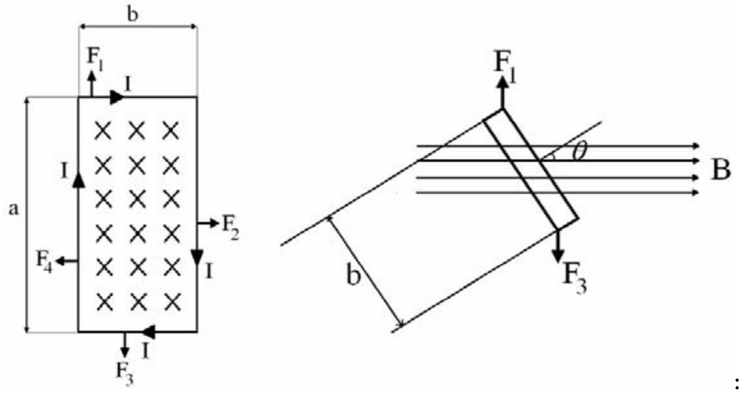
نمای ساده‌ای از یک دستگاه گالوانومتر قاب گردان دیده می‌شود:



شکل (۷-۱) نمای ساده گالوانومتر

۷-۲) معادله گشتاور در گالوانومتر (حالت استاتیک)

گشتاور انحراف دهنده وارد بر قاب، حول محور چرخش با استفاده از شکل ۷-۲ قابل محاسبه است.



:

شکل (۷-۲)

گشتاور از دو نیروی مساوی و مختلف الجهته که بر دو ضلع جانبی قاب وارد می‌شود، ایجاد می‌گردد:

$$T_d = 2|F| \cdot \frac{b}{2} \cdot sin\theta_d \qquad (۱-۷)$$

$b/2$ فاصله نیروهای وارده تا مرکز قاب (محور چرخش) می‌باشد.

$$= 2I \cdot a \cdot B \cdot \frac{b}{2} \sin\theta_d = I \cdot a \cdot b \cdot B \cdot \sin\theta_d = I \cdot A \cdot B \cdot \sin\theta_d \qquad (۲-۷)$$

در رابطه (۷-۲)، I جریان قاب و A سطح آن می‌باشد. B میدان مغناطیسی حاصل از آهنربـای دسـتگاه و θ_d نیز زاویه بین B و بردار عمود بر صفحه قاب است.

و اگر قاب N حلقه داشته باشد:

$$T_d = N \cdot I \cdot A \cdot B \cdot \sin\theta_d \qquad (۳-۷)$$

در مقابل گشتاور فوق، گشتاور مقاوم حاصل از پیچیده شدن فنر قراردارد که مقدار آن برابر است با:

$$T_c = K_c \theta_c \qquad (۴-۷)$$

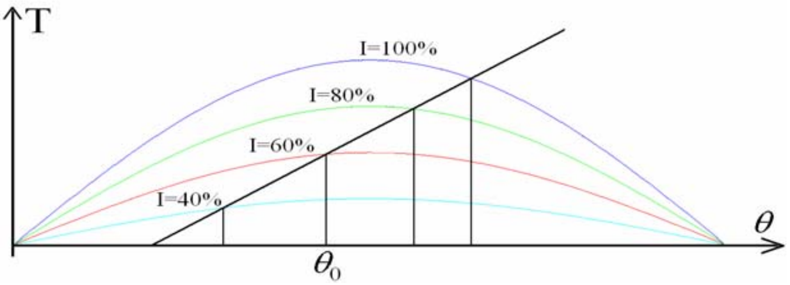
که در این رابطه K_c ثابت فنر و θ_c میزان پیچش فنر از حالت تعـادل ($\theta_c = 0$) مـی‌باشـد. در حالـت پایـدار گشتاور مقاوم و گشتاور انحراف دهنده برابرند:

$$N \cdot A \cdot B \cdot I \cdot \sin\theta_d = K_c \theta_c \qquad (۵-۷)$$

به بیان ترسیمی، حالت تعادل هنگامی اتفاق می‌افتد که منحنی غیرخطی گـشتاور انحـراف دهنـده (کـه یـک منحنی سینوسی است) با معادله گشتاور مقاوم (که یک خط راست را نشان می‌دهد) برای یـک θ معـین تلاقـی پیـدا کند:

$$\theta = \theta_c = \theta_d \qquad (۶-۷)$$

رابطه نیروی انحراف دهنده به دامنه I بستگی دارد. در حالیکه گشتاور مقاوم مـستقل از I و فقـط تـابعی از θ است. شکل (۷-۳) رابطه (۷-۵) را بصورت ترسیمی نشان می‌دهد. در این شکل مشخصه فنر بـا خـط $T = K(\theta - \theta_0)$ نشان داده شده است و به این معناست که نیروی بازگرداننده فنر تا قبل از پیچش فنر به اندازه θ_0 ایجاد نمی‌شود.



شکل (۷-۳)

دیده می‌شود که گشتاور محرک به ازای جریانهای مختلف ورودی تغییر کرده و نقاط تلاقی آن با خط ثابت $T = K(\theta - \theta_0)$ نقاط متفاوتی است که نشان دهنده وضعیت تعادل دستگاه در جریانهای ورودی مختلف می‌باشد. حال، با کمی دقت می‌توان دریافت که مقیاس دستگاه خطی نیست. یعنی رابطه بین θ در حالت تعادل (حالت انحراف ماندگار) با جریان ورودی، به ازای جریانهای مختلف، یک نسبت ثابت نمی‌باشد. در واقع:

$$\theta = f(I) \qquad (۷-۷)$$

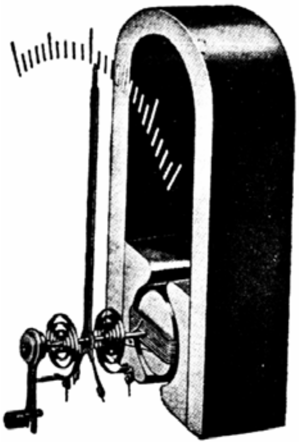
که f یک تابع غیرخطی است

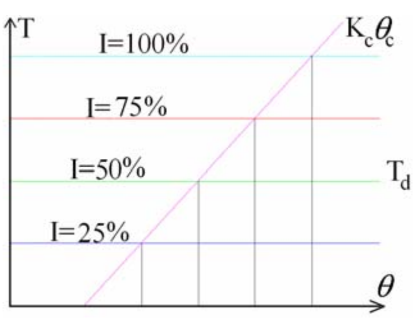
* **خطی کردن مقیاس دستگاه**

برای اینکه مقیاس (و عملکرد) دستگاه خطی باشد بایستی گشتاور انحراف دهنده نیز صرفاً تابعی از جریان ورودی بوده و به وضعیت قاب نسبت به میدان ربطی نداشته باشد.با توجه به رابطه (۷-۳) می‌توان گفت اگر θ_d همواره ثابت و برابر $\pi/2$ باشد، در آنصورت گشتاور محرک ثابت بوده و علاوه بر این، در مقدار ماکزیمم خود قرار خواهد داشت:

$$\theta_d = \pi/2 \Rightarrow T_d = T_{d_{max}} = NABI \qquad (۸-۷)$$

برای اینکه θ_d، علیرغم چرخش قاب، ثابت بماند باید میدان $\vec{B}$ به جای شکل خطی دارای شکل شعاعی باشد. یعنی همواره جهت میدان با جهت صفحه قاب یکسان باشد. در عمل این حالت با قرار دادن قاب روی یک استوانه فلزی و دایره‌ای کردن قطبهای آهنربای دستگاه انجام می‌شود. در شکل (۷-۴) نمودار این دستگاه و مقیاس‌بندی خطی آن دیده می‌شود.





شکل (۷-۴) دستگاه قاب گردان با مقیاس خطی شده

الف – ساختار ب – نمودار ترسیمی انحراف پایدار به ازای جریانهای مختلف

$$T = NABI = K_c\theta_c \qquad (۹-۷)$$

$$\Rightarrow \theta = \theta_c \frac{NAB}{K_c} \cdot I \qquad (۷-۱۰)$$

$$\Rightarrow \theta = K \cdot I \qquad (۷-۱۱)$$

که در آن K ثابتی است که به ساختار دستگاه مربوط می‌شود و مستقل از جریان ورودی است:

$$K = \frac{NAB}{K_c} \qquad (۷-۱۲)$$

مثال - یک دستگاه اندازه‌گیری قاب گردان به ابعاد 15mm×12mm با شار فاصله هوایی $B = 1.8 \times 10^{-3} \frac{wb}{m^2} = 18G$ و ثابت فنر $K_l = 0.14 \times 10^{-6} \frac{N.m}{rad}$ داریم. تعداد حلقه‌های قاب را برای اینکه انحراف ۹۰° در جریان I=5mA بوجود آید، بدست آورید.

در حالت پایدار:

$$K_l \theta = N \cdot I \cdot ab \cdot B \Rightarrow N = \frac{K_l \theta}{I \cdot ab \cdot B}$$

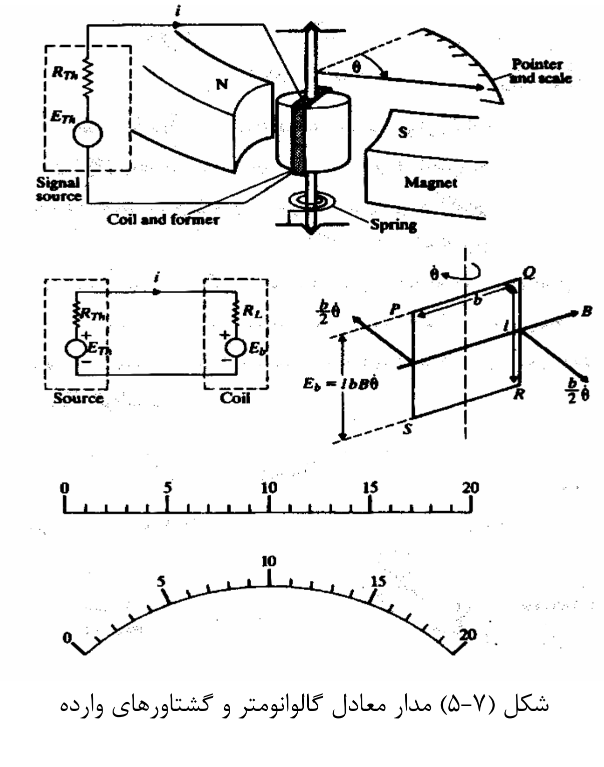
$$\theta = 90^\circ = \pi/2 \qquad N = 136$$

توجه – اعداد داده شده در مسئله تقریباً واقعی هستند.

۷-۳) رفتار دینامیک گالوانومتر

برای بررسی رفتار دینامیک گالوانومتر جریان ورودی را با i نمایش داده و گشتاور مانند جسم متحرک را J می‌نامیم. با صرفنظر از گشتاور اصطکاک هوا، دو گشتاور اصلی بر دستگاه اثر می‌گذارند. یکی از آنها گشتاور محرک و دیگری گشتاور مقاوم است (فعلاً از گشتاور میرایی صرفنظر می‌کنیم). در این حالت تفاوت این دو گشتاور باعث شتاب زاویه‌ای قاب گردان خواهد شد:

$$N \cdot A \cdot B \cdot i - K\theta = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \qquad (۷-۱۳)$$



شکل (۷-۵) مدار معادل گالوانومتر و گشتاورهای وارده

از سوی دیگر با توجه به مدار معادل شکل (۷-۵) جریان i برابر است با:

$$i = \frac{E_{th} - E_b}{R_{th} + R_l} \qquad (۱۴-۷)$$

که در آن R_L مقاومت سیم‌پیچ و E_b ولتاژ القایی در سیم‌پیچ به هنگام حرکت قاب در میدان مغناطیسی می‌باشد. با استفاده از قانون فاراده مقدار E_b برابر است با:

$$E_b = N \cdot A \cdot B \cdot \frac{d\theta}{dt} \qquad (۱۵-۷)$$

با جایگزین کردن جریان i از روابط (۷-۱۴) و (۷-۱۵) در معادله دیفرانسیل (۷-۱۳) و پس از مرتب کردن آن داریم:

$$\frac{J}{K}\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{(N \cdot A \cdot B)^2}{K(R_{th} + R_L)}\frac{d\theta}{dt} + \theta = \frac{N \cdot A \cdot B}{K(R_{th} + R_L)}E_{th} \qquad (۱۶-۷)$$

با تبدیل لاپلاس رابطه فوق تابع تبدیل گالوانومتر قاب گردان به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\frac{\theta}{E_{th}}(s) = \frac{k\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} \qquad (۱۷-۷)$$

که در آن:

گین استاتیک (۷-۱۸) $k = \frac{NAB}{K(R_{th} + R_L)}$ $\quad rad/V$

فرکانس طبیعی (۷-۱۹) $\omega_n = (K/J)^{1/2}$ $\quad rad/S$

ضریب میرائی (۷-۲۰) $\zeta = \frac{(NAB)^2}{2(KJ)^{1/2}(R_{th} + R_L)}$

در این مدل مشاهده می‌شود که گین استاتیک k و ضریب میرایی ζ تابعی از مقاومت R_{th} می‌باشند. یعنی با سری کردن یک مقاومت به R_{th} ضرایب ζ و k کاهش یافته و همچنین با موازی کردن یک مقاومت با گالوانومتر می‌توان ζ را افزایش داد.

توجه کنید که در بدست آوردن روابط فوق به جهت ساده کردن مطلب اثر گشتاور میرایی را در نظر نگرفتیم. در حالت کلی گشتاور میرایی به صورت زیر داده می‌شود.

$$T_D = D\frac{d\theta}{dt} \qquad (۲۱-۷)$$

که در آن D ثابت میرایی بر حسب $Nm/rad \cdot s^{-1}$ است و معادله کلی گشتاور برای هر انحراف θ در لحظه t برابر است با:

$$T_i + T_D + T_c = T_d \qquad (۲۲-۷)$$

و یا:

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} + D\frac{d\theta}{dt} + k\theta = NBAi = Gi \qquad (۲۳-۷)$$

بهرحال، برای رفتار دینامیکی سیستم می‌توان سه حالت زیر را در نظر گرفت.

* دو ریشه معادله مشخصه مختلط‌اند موهومی‌اند، بنابراین حرکت نوسانی است و گالوانومتر قبل از رسیدن به حالت مانای نهایی حول حالت مانای نهایی با دامنه کاهشی نوسان می‌کند.

* دو ریشه حقیقی و برابرند و حرکت میرایی بحرانی است، یعنی در اینحالت گالوانومتر بدون بالا خیز در کوتاهترین زمان به حالت مانای نهایی می‌رسد.

* هر دو ریشه حقیقی و متفاوتند، بنابراین حرکت فوق میرا است، یعنی گالوانومتر نوسان نمی‌کند. اما زمان رسیدن به حالت مانای نهایی بسیار طولانی است.

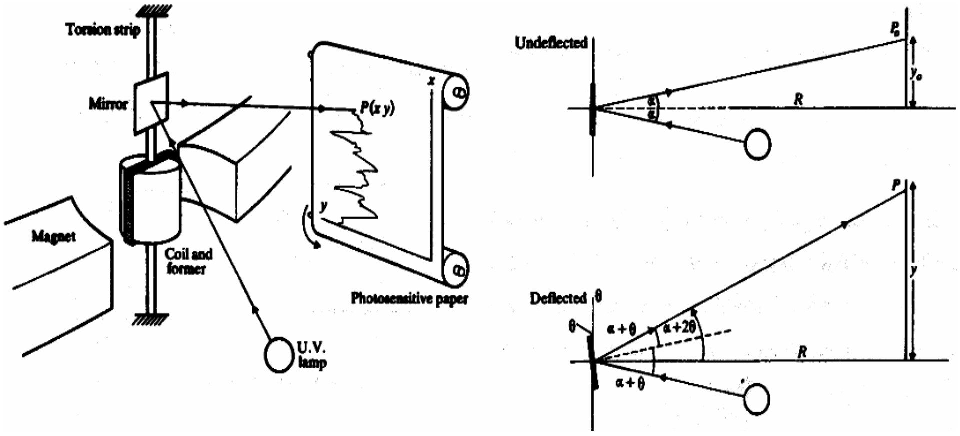
بدیهی که G در رابطه (۷-۲۳) به جریان ورودی ربطی نداشته و فقط معرف مشخصات ساختاری دستگاه است. بهرحال پاسخ کامل مقاله دیفرانسیل فوق عبارت خواهد بود از: (۷-۲۴) $\theta = K_1 e^{m_1 t} + K_2 e^{m_2 t} + \theta_F$

θ_F را انحراف پایدار نهایی نامیده (چرا؟) و با رابطه زیر نشان می‌دهیم: (۷-۲۵) $\theta_F = \dfrac{NABi}{K}$

پاسخ گذرای سیستم بطور بدیهی عبارت خواهد بود از: (۷-۲۶) $K_1 e^{m_1 t} + K_2 e^{m_2 t}$

۷-۴) استفاده از گالوانومتر به عنوان ثبات:

در صورتیکه از گالوانومتر به عنوان ثبات استفاده شود از اتصال هرگونه جرم اضافی به قاب خودداری می‌شود. با پیشرفت تکنولوژی، امروزه ثباتهایی با فرکانس طبیعی چندین کیلو هرتز برای ثبت پدیدهایی همچون زلزله، یا نوسانات مکانیکی ساخته می‌شوند. یک نمونه ثبات با استفاده از قاب گردان در شکل ۷-۶ نشان داده شده است. نور ماوراء بنفش پس از برخورد به آینه روی یک صفحه متحرک حساس به این نور تابیده می‌شود. موقعیت اشعه روی صفحه در هر لحظه بستگی به زاویه انحراف آینه یا قاب گردان دارد.



شکل (۷-۶)

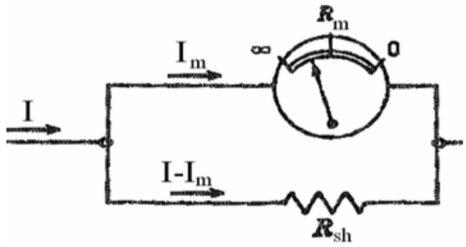
۷-۵) آمپرسنج DC به کمک گالوانومتر قاب گردان

با استفاده از رابطه (۷-۱۳) یا (۷-۲۳) می‌توان دید که در حالت پایدار نهایی انحراف عقربه با جریان متناسب است.

$$(G = NAB) \Rightarrow \theta = \frac{G}{K_l} I \qquad (۲۷-۷)$$

بنابراین می‌توان یک مقیاس خطی بر اساس جریان ورودی به دستگاه ساخت و این دستگاه یک آمپرمتر خواهد بود. مسئله عمده این است که در جریان عبوری از گالوانومتر محدودیت وجود دارد (معمولاً حداکثر جریان کار ۵۰ میلی آمپر است). بطور کلی برای افزایش محدوده اندازه‌گیری جریان توسط گالوانومتر از مقاومت شنت استفاده می‌شود. فرض کنیم جریان مورد نیاز برای انحراف کامل عقربه در حالتیکه فقط سیم پیچ قاب گردان در مدل باشد،

I_m است و می‌خواهیم جریان نهایی قابل اندازه‌گیری توسط دستگاه I باشد در این صورت مقاومت شنت با استفاده از مدار شکل (۷-۳) محاسبه می‌گردد.

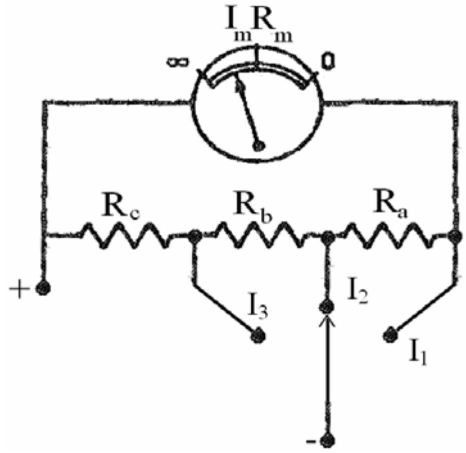


شکل (۷-۷) استفاده از مقاومت موازی (شنت) برای افزایش محدوده جریان گالوانومتر

$$KVL: I_m R_m = (I - I_m) R_{sh} \qquad \Rightarrow R_{sh} = \frac{I_m}{I - I_m} R_m \qquad (۲۸-۷)$$

برای ساخت آمپرمتر با چند محدوده از **شنت عام** استفاده می‌شود. در شکل ۷-۸ یک آمپر سه محدوده‌ای دیده می‌شود. در این مدار حالت داریم:

$$R_{sh}(I - I_m) = I_m (R_m + R_{se}) \qquad (۲۹-۷)$$



شکل (۷-۸)

برای محدوده I_1:

$$R_a + R_b + R_c = \frac{I_m}{I_1 - I_m} R_m \qquad (۳۰-۷)$$

برای محدوده I_2:

$$R_b + R_c = \frac{I_m}{I_2 - I_m}(R_m + R_a) \qquad (۳۱-۷)$$

و برای محدوده I_3:

$$R_c = \frac{I_m}{I_3 - I_m}(R_m + R_a + R_b) \qquad (۳۲-۷)$$

که سه معادله خطی با سه مجهول (R_c, R_b, R_a) را می‌توان حل کرد.

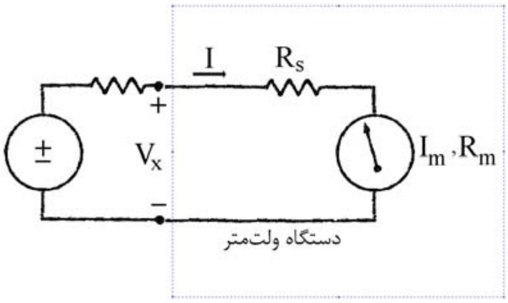
نکات عملی در کاربرد آمپرسنج:

* آمپرسنج نباید به دو سر منبع وصل شود. (همواره بصورت سری در مدار قرار می‌گیرد.)
* قطبیت آمپرسنج باید رعایت گردد.
* برای اندازه‌گیری یک جریان مجهول از محدوده بالا به پایین حرکت شود.

تمرین – دلایل کافی برای هر یک از ۳ مورد فوق را بیان کنید.

۷-۶) ولت‌سنج DC به کمک گالوانومتر دارسونال

برای اینکه دستگاه دارای مقاومت ورودی زیادی باشد (تا به عنوان ولت‌متر عمل کند) یک مقاومت بزرگ باید با آن سری شود. فرض کنیم در مدار شکل (۷-۹) اندازه‌گیری ولتاژ V_{th} مطلوب است.



شکل (۷-۹) استفاده از گالوانومتر جهت سنجش ولتاژ مجهول

دستگاه ولتمتر اهمیت پیدا کند:

$$\frac{V_{th}}{R_{th}+R_s+R_m}=\frac{V_x}{R_s+R_m}\Rightarrow V_x=\frac{R_s+R_m}{R_{th}+R_s+R_m}V_{th} \qquad (۷-۳۳)$$

یعنی ولتاژی که توسط دستگاه سنجیده شده با V_{th} تفاوت دارد.

حال اگر داشته باشیم: $R_{th} \ll R_s+R_m$ (۷-۳۴)

آنگاه خواهیم داشت: $V_x \approx V_{th}$ (۷-۳۵)

یعنی خطای اثر بارگذاری قابل صرفنظر می‌شود.

البته از آنجائیکه R_m معمولاً کوچک است، لازم است که مقدار R_s به نسبت بزرگ انتخاب شود. حال اگر انحراف عقربه را متناسب با جریان I بدانیم، خواهیم داشت:

$$\theta=kI=k\frac{V_x}{R_s+R_m}\Rightarrow \theta=k_vV_x \qquad (۷-۳۶)$$

که در اینجا

$$k_v=\frac{k}{R_s+R_m} \qquad (۷-۳۷)$$

برای تعیین محدوده ولتاژ قابل سنجش توسط دستگاه شکل می‌توانیم بنویسیم:

$$V_{max}=I_{max}(R_s+R_m) \qquad (۷-۳۸)$$

و بنابراین برای هر محدوده معین V می‌توان R_s را محاسبه نمود.

$$R_s=\frac{V}{I_{max}}-R_m \qquad (۷-۳۹)$$

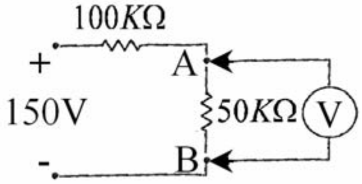
معمولاً $\frac{1}{I_m}$ را حساسیت ولت‌سنج نامیده و با S نمایش می‌دهند. بنابراین:

$$R_s+R_m=R_v=S\cdot V \qquad (۷-۴۰)$$

واحد حساسیت ولت‌سنج را با "اهم بر ولت" بیان می‌کنند.

تمرین – نشان دهید که این تعریف با تعریفی که در فصل ۲ بیان شد مغایرتی ندارد.

مثال - می‌خواهیم ولتاژ بین دو سر مقاومت 50KΩ را در مدار شکل زیر اندازه بگیریم. برای این کار دو ولت‌متر در دسترس است. ولت‌متر اول حساسیت ۱۰۰۰ Ω/v و دستگاه دوم ۲۰۰۰۰ Ω/v را دارد و هر دو گستره ۰-۵۰ v را در بر می‌گیرند.



مطلوب است تعیین

الف - خوانده هر یک از دو ولت‌متر

ب – خطای هر قرائت بر حسب درصد مقدار صحیح

حل – الف

مقاومت داخلی ولت‌سنج اول با توجه به حساسیت دستگاه و محدوده اندازه‌گیری تعیین می‌شود:

$$R_{V_1} = S_{V_1} \times V = 1000 \times 50 = 50K\Omega$$

با اتصال این دستگاه به مقاومت ۵۰K در مدار، یک مقاومت ۲۵K حاصل می‌شود.

$$\Rightarrow V_{AB} = \frac{25}{25+100} \times 150 = 30V$$

یعنی خوانده دستگاه اول ۳۰V است. (اثر بارگذاری دستگاه موازی)

مقاومت داخلی ولت‌سنج دوم به همان ترتیب محاسبه می‌شود:

$$R_{V_2} = S_{V_2} \cdot V = (20000 \times 50) = 1000K\Omega$$

مقاومت ترکیب موازی:

$$R_{AB} = \frac{1000 \times 50}{1050} = 47.6K\Omega$$

ولتاژ خوانده دستگاه دوم:

$$V_{AB} = \frac{47.6}{47.6+100} \times 150 = 48.36V$$

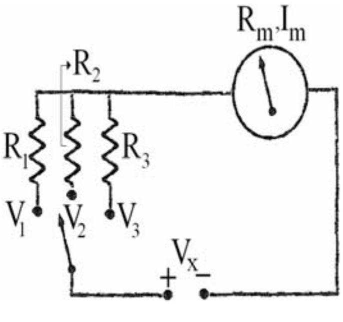
ب- خطای ولت‌متر اول:

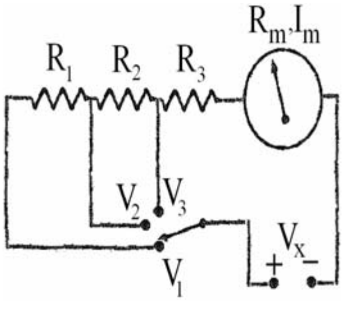
$$\Delta V\% = \frac{30-50}{50} \times 100 = -40\%$$

خطای ولت‌متر دوم:

$$\Delta V\% = \frac{48.36-50}{50} \times 100 = -3.3\%$$

ولت‌متر چند محدوده‌ای:





شکل (۷-۱۰)

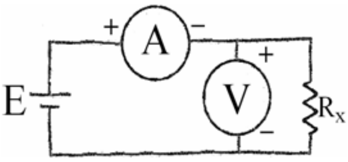
تمرین: روابط تعیین (R_3, R_2, R_1) را برای هر یک از دو ترکیب شکل (۷-۱۰) بدست آورید.

نکات عملی در کاربرد ولت‌سنج:

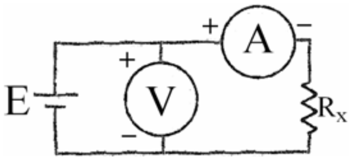
* ولت‌سنج نبایستی بصورت سری در مدار قرار گیرد. (باید با عنصری که ولتاژ آن را می‌سنجیم موازی شود)
* قطبیت ولتمتر بایستی رعایت شود.
* برای اندازه‌گیری یک ولتاژ مجهول از محدوده بالا به پایین حرکت شود.

۷-۷) اهم‌سنج با استفاده از گالوانومتر

الف – روش ولت‌سنج – آمپرسنج: در این روش از قانون اهم استفاده می‌شود ($V = RI$) و لذا یک آمپرسنج و یک ولت‌سنج بطور همزمان در مدار قرار می‌گیرد. شکل (۷-۱۱).



ب- برای سنجش مقاومتهای کوچک



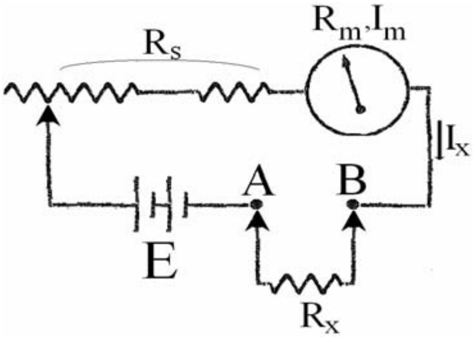
الف – برای سنجش مقاومتهای بزرگ

شکل (۷-۱۱) مدار با دو سنجه برای اندازه‌گیری مقاومت مجهول

تمرین: نشان دهید که در سنجش یک مقاومت بزرگ میزان خطای ناشی از بارگذاری در حالت الف کمتر از حالت ب است.

ب- اهم‌سنج سری (متوالی): مدار یک اهم‌سنج سری در شکل (۷-۱۲) نشان داده شده است. در این شکل داریم:

$$I_x = \frac{E}{R_s + R_m + R_x} \qquad (۴۱-۷)$$



شکل (۷-۱۲) مدار اهم‌سنج سری

در عمل، با تنظیم R، هنگامی که $R_x = 0$ است (دو سر A و B اتصال کوتاه شده‌اند)

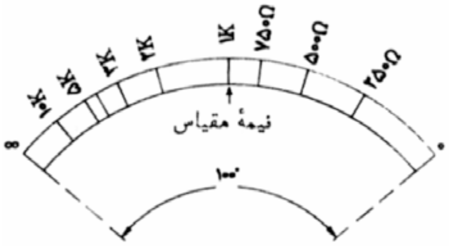
سعی می‌شود $I_x = I_{m_{max}}$ باشد. یعنی:

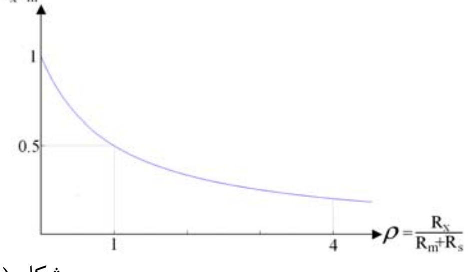
$$I_{m_{max}} = E \big/ R_s + R_m \qquad (۴۲-۷)$$

حال اگر نسبت $\frac{R_x}{R_m + R_s}$ را ρ بنامیم، خواهیم داشت:

$$I_x = \frac{I_{m_{max}}}{1+\rho} \quad \text{یا} \quad \frac{I_x}{I_{m_{max}}} = \frac{1}{1+\rho} \qquad (۴۳-۷)$$

واضح است که رابطه ρ با I_x یک رابطه خطی نیست، بلکه به صورت یک هذلولی است: (شکل ۷-۹)



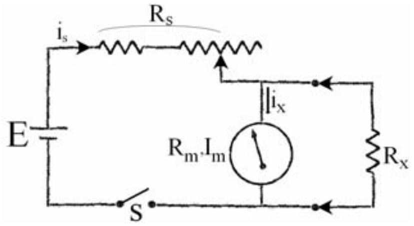


شکل (۷-۱۳)

و چون $I_{m_{max}}$ و $(R_m + R_s)$ ثابت فرض می‌شوند. درواقع، رابطه بین I_x و R_x یک رابطه غیرخطی است. از آنجا که زاویه انحراف با I_x نسبت خطی دارد. بنابراین درجه‌بندی اهم متر یک درجه‌بندی غیرخطی خواهد بود. بدیهی است به ازای $R_x = 0$ انحراف ماکزیمم و به ازای $R_x = \infty$ انحراف عقربه صفر خواهد بود و لذا درجه‌بندی غیرخطی اهم متر نسبت به درجه‌بندی آمپرمتر یا ولت‌متر معکوس نیز می‌باشد.

توجه کنید که انحراف ۵۰٪ به ازای $R_x = R_m + R_s$ بدست می‌آید. لازم به ذکر است که اگر به دلیل کهنه شدن، ولتاژ باتری E نزول کند با تنظیم مقاومت متغیر نمی‌توان اهم متر را تصحیح نمود.

ج- اهم‌سنج موازی: در شکل (۷-۱۴) یک اهم‌سنج موازی نشان داده شده است:



شکل (۷-۱۴) مدار اهم‌سنج موازی

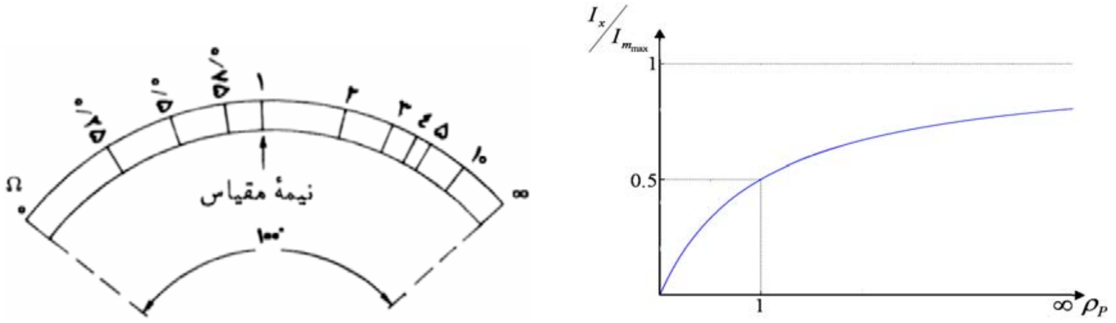
در این مدار تنظیم طوری انجام می‌شود که به ازای $R_x \to \infty$ انحراف ماکزیمم باشد. در این مدار داریم:

$$I_s\left(\frac{R_m \cdot R_x}{R_m + R_x}\right) = I_x \cdot R_m \Rightarrow I_x = \frac{I_s \cdot R_x}{R_m + R_x} = \frac{I_{m_{max}}\left(R_s + R_m\right)}{\left(R_m \| R_x\right) + R_s} \times \frac{R_x}{\left(R_m + R_x\right)} \qquad (۴۴-۷)$$

و پس از ساده کردن:

$$\rho_p = \frac{R_x}{\left(R_m \| R_s\right)} \Rightarrow I_x = \frac{I_{m_{max}}}{1 + \frac{1}{\rho_p}} \qquad (۴۵-۷)$$

شکل (۷-۱۵) منحنی تغییرات $I_x / I_{m_{max}}$ برحسب مقادیر ρ_P را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود. انحراف ۵۰٪ با $\left(R_m \| R_s\right) = R_x$ بدست می‌آید.

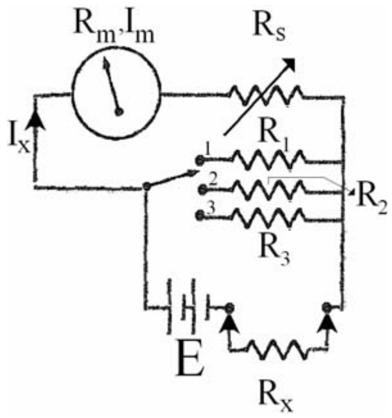


شکل (۷-۱۵)

کلید S هنگامی که اهم‌سنج کار نمی‌کند باید باز باشد.

مقاومت داخلی اهم‌متر موازی کوچکتر از اهم‌سنج سری است و بنابراین اهم‌سنج موازی برای اندازه‌گیری مقاومتهای کوچکتر مناسب است.

د- اهم‌سنج چند محدوده‌ای: در شکل (۷-۱۶) مدار یک اهم‌متر سه محدوده‌ای دیده می‌شود. معمولاً صفحه اهم‌متر فقط با یک مجموعه عدد مدرج شده است. بنابراین، در هر یک از وضعیتهای کلید باید عدد معینی در عدد خوانده شده روی صفحه ضرب شود.



شکل (۷-۱۶) اهم‌سنج چند محدوده سری

فرض کنیم کلید در وضعیت نشان داده شده، قرار گرفته باشد. یعنی R_1 در مدار باشد در این صورت:

$$I_x = \frac{E}{R_x + \left[R_1 \| (R_m + R_s)\right]} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_m + R_s} \qquad (۴۶-۷)$$

حال اگر $R_1 \langle\langle R_m + R_s$ باشد آنگاه:

$$R_1 + (R_m + R_s) \approx R_m + R_s$$
$$R_1 \| (R_m + R_s) \approx R_1$$

از طرف دیگر R_s طوری تنظیم می‌شود که در حالت اتصال کوتاه ($R_x = 0$)، ماکزیمم انحراف عقربه ایجاد شود. یعنی:

$$\frac{E}{R_s + R_m} = I_m$$

بنابراین:

$$I_x = \frac{E}{R_x + R_1} \cdot \frac{R_1}{R_m + R_s} = \frac{R_1}{R_x + R_1} \cdot I_m \qquad (۴۷-۷)$$

$$\Rightarrow \frac{I_x}{I_m} = \frac{R_1}{R_x + R_1} \Rightarrow R_x = R_1 \cdot \left(\frac{I_m}{I_x} - 1\right) \qquad (۴۸-۷)$$

حال اگر همین نسبت I_m/I_x (یا همین انحراف عقربه) به ازای یک مقاومت (R_{x_2}) در وضعیت ۲ رخ دهد، خواهیم داشت:

$$R_{x_1} = R_1\left(\frac{I_m}{I_x} - 1\right) \ , R_{x_2} = R_2\left(\frac{I_m}{I_x} - 1\right) \qquad \Rightarrow \frac{R_{x_2}}{R_{x_1}} = \frac{R_2}{R_1} \ \text{یا} \ \Rightarrow R_{x_2} = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_{x_1} \qquad (۴۹-۷)$$

بنابراین در حالیکه فقط یک مقیاس داریم و فرضاً مقیاس برای حالت ۱ (وجود R_1 در مدار) تنظیم و مدرج شده باشد در آن صورت با ورود مقاومت R_2 به جای R_1 باید عدد خوانده شده روی مقیاس در ضریب $\frac{R_2}{R_1}$ ضرب شود.

۷-۸) اندازه‌گیری ولتاژ و جریان AC به کمک گالوانومتر

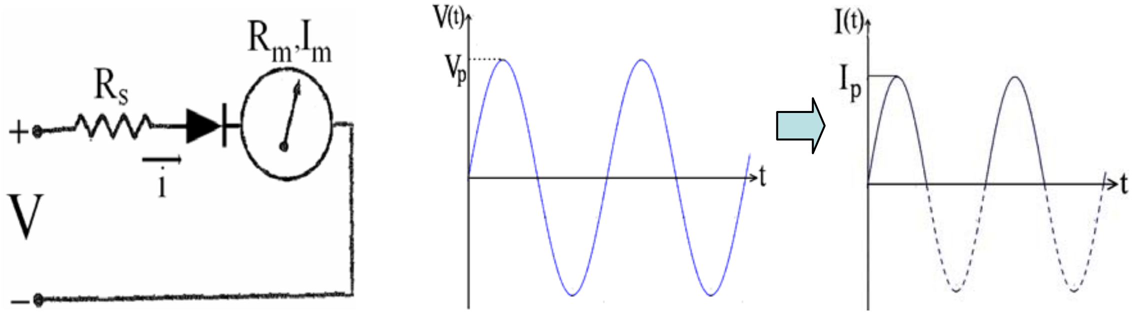
معادله دیفرانسیل مربوط به رفتار گالوانومتر نشان می‌دهد که عبور هر جریان متناوب با فرکانس بیش از فرکانس طبیعی گالوانومتر با تضعیف بسیار شدیدی به حرکت عقربه منتقل می‌شود. یعنی عقربه در برابر این جریانها

انحراف قابل مشاهده‌ای نخواهد داشت. به همین دلیل گفته می‌شود گالوانومتر قاب گردان یک **متوسط‌سنج** است. لذا برای نمایش مقدار موثر یک موج متناوب به یکی از روشهای زیر عمل می‌شود.

* **تغییر شکل موج به نحوی که متوسط آن غیر صفر باشد:** برای این منظور موج را معمولاً از یک مدار یکسوکننده نیم موج یا تمام موج دیودی عبور می‌دهند. از نقطه نظر بسط فوریه موج یکسوشده دارای یک مقدار متوسط و مضاربی از فرکانس اصلی می‌باشد که با توجه به طبیعت پائین گذر گالوانومتر، تنها مقدار متوسط باعث انحراف عقربه شده و با قرارگرفتن فرکانسهای دیگر در خارج از باند عبور عملاً حرکت قابل ملاحظه‌ای ایجاد نمی‌گردد.

برای هر شکل موج خاص، بسته به آنکه به صورت تمام موج یا نیم موج یکسو شده باشد نسبت معینی بین مقدار موثر موج و مقدار متوسط موج یکسو شده وجود دارد. مثلاً برای موج سینوسی که تماماً یکسوشده باشد این نسبت ۱.۱۱ و برای موج مثلثی ۱.۱۵ و برای موج مربعی ۱ است. بدین ترتیب در صورت مشخص بودن شکل موج و ضریب شکل مربوطه می‌توان با اندازه‌گیری مقدار متوسط موج یکسوشده دستگاه را برحسب مقدار موثر مدرج نمود. در آمپرسنجها و ولت‌سنجهای تجاری معمولاً درجه‌بندی برای موج سینوسی در نظر گرفته شده است. لذا اندازه‌گیری هر موج غیرسینوسی توسط این دستگاهها منجر به خطای قرائت می‌گردد. میزان خطا تابعی از اختلاف ضریب شکل موج بین موج مورد نظر با موج سینوسی است. در شکل (۷-۱۸) یک ولتمتر AC با استفاده از دستگاه قاب گردان و یکسوکننده نیم موج نشان داده شده است. ضریب شکل موج در این حالت ۲.۲۲ می‌باشد (چرا؟)

$$\text{ضریب شکل موج} = \frac{\text{مقدار موثر موج اصلی}}{\text{مقدار متوسط موج یکسوشده}} \qquad (۵۰-۷)$$



شکل (۷-۱۸)

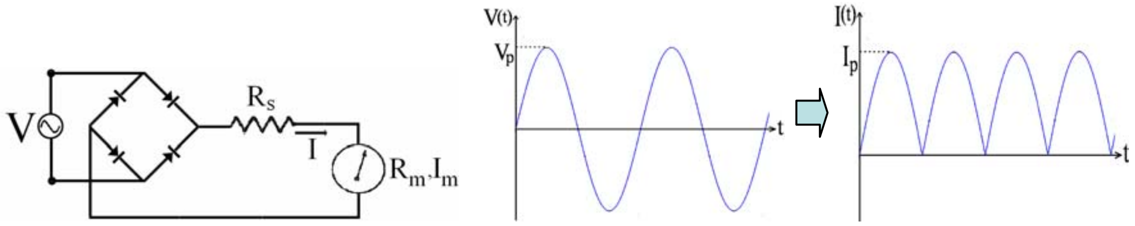
حساسیت ولت‌متر ac بنا به تعریف عبارتست از $\frac{R_V}{V_{rms}}$ بنابراین با جایگذاری روابط زیر فرمول (۷-۵۲) نتیجه خواهد شد:

$$R_v = R_s + R_m \quad ، \quad \frac{V_{rms}}{V_{av}} = 2\times1.11 = 2.22 \quad و \quad R_v \cdot I_{m_{max}} = V_{av}(\max)$$

$$S_{dc} = \frac{1}{I_{m_{max}}} = \frac{R_v}{V_{av}(\max)} \Rightarrow S_{ac} = \frac{V_{av}(\max)}{I_{m_{max}} \cdot V_{rms}} = \frac{1}{I_{m_{max}}} \times \frac{1}{2.22} \qquad (۵۱-۷)$$

$$S_{ac} \approx 0.45 S_{dc} \qquad (۵۲-۷)$$

در شکل (۷-۱۹) یک مدار یکسوکننده تمام موج به همراه یک گالوانومتر که به صورت ولت‌متر dc بسته شده است، جمعاً تشکیل یک ولت‌متر ac را داده‌اند.

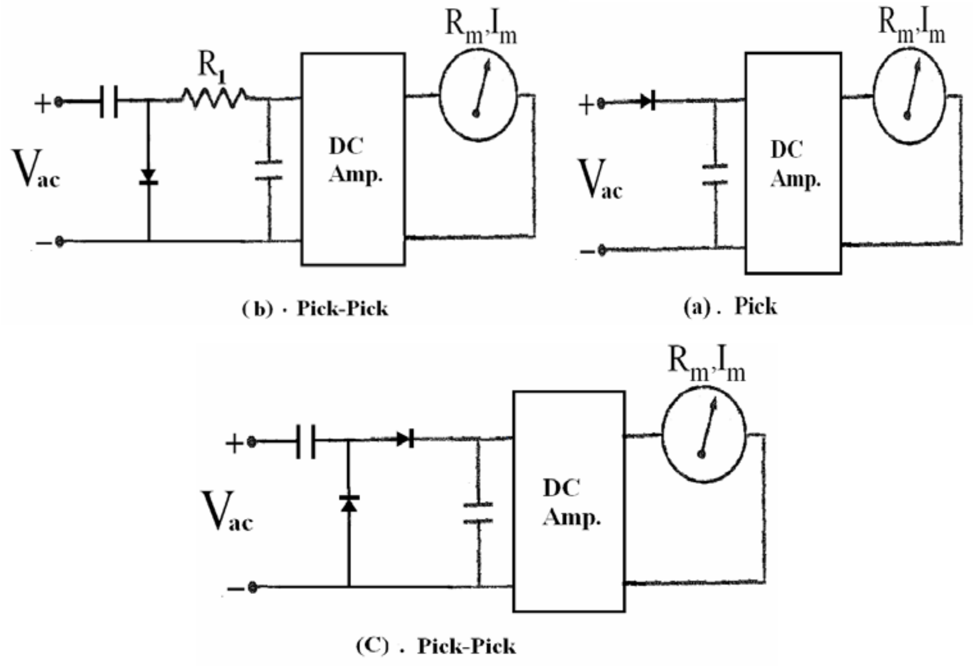


شکل (۷-۱۹) مدار یک سنجه ac با پل دیودی

در اینجا می‌توان نشان داد که $\frac{V_{rms}}{V_{av}}=1.11$ و بنابراین حساسیت عبارت خواهد بود از:

$$\Rightarrow S_{ac}=\frac{1}{I_{m_{\max}}}\times\frac{1}{1.11}\approx 0.9\cdot S_{dc} \qquad (۵۳-۷)$$

* **اندازه‌گیری مقدار موثر از طریق اندازه‌گیری مقدار پیک:** در این روش با اعمال ولتاژ ثابتی معادل ولتاژ پیک موج و با داشتن شکل موج می‌توان به مقدار موثر آن پی‌برد. به عنوان مثال در موج سینوسی نسبت مقدار موثر به مقدار پیک برابر $1/\sqrt{2}$ می‌باشد. بدیهی است که در این حالت نیز با تغییر شکل موج ورودی نسبت فوق تغییر کرده و دستگاه تجاری که بر اساس موج سینوسی مدرج شده دچار خطای اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۷-۲۰ چند روش پیاده سازی ایده فوق را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۲۰) اندازه‌گیری rms ولتاژ از روی مقدار پیک

* **اندازه‌گیری مقدار موثر از طریق مستقیم**: در این روش ابتدا موج وارد هیتر شده و گرمای آن توسط ترموکوپل به ولتاژ تبدیل می‌گردد. ولتاژ حاصله باعث عبور جریانی می‌شود که توسط آمپرمتر قابل اندازه‌گیری است. در این مدار ولتاژ اندازه‌گیری شده مستقل از شکل موج ورودی بوده و لذا برای هر موج متناوب و یا غیر متناوب مثل نویز قابل استفاده می‌باشد. عیب دستگاه کند بودن آن و یکی از مزایایش عدم وابستگی به تغییرات دمای محیط می‌باشد.

یک راه دیگر این است که با استفاده از مدارهای الکترونیکی سیگنال ابتدا به توان ۲ برسد و سپس به گالوانومتر اعمال گردد.

سئوال – مدار آمپرسنج ac را با استفاده از قاب گردان طراحی کنید. در حالت نیم موج و تمام موج چه تفاوتی در شکلهای (۷-۱۸) و (۷-۱۹) خواهیم داشت؟

۷-۹) مالتی‌متر

دیدیم که برای آمپرسنجی (ac و dc)، ولت‌سنجی (ac و dc) و اهم‌سنجی می‌توان از یک گالوانومتر قاب گردان استفاده کرد و تفاوت دستگاههای فوق در مداری است که گالوانومتر در آن قرار می‌گیرد. بنابراین ممکن خواهد بود که با استفاده از یک گالوانومتر و کلیدهای متعدد و مداربندی مناسب دستگاهی ساخت که همه کاربردهای فوق را داشته باشد. چنین دستگاهی را یک مالتی‌متر (چند سنجه) یا آمپر، ولت، اهم، متر AVOMETER می‌خوانند.

۷-۱۰) خطاهای دستگاه قاب گردان

۱- تضعیف آهنربای دائم (مقدار را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد.)

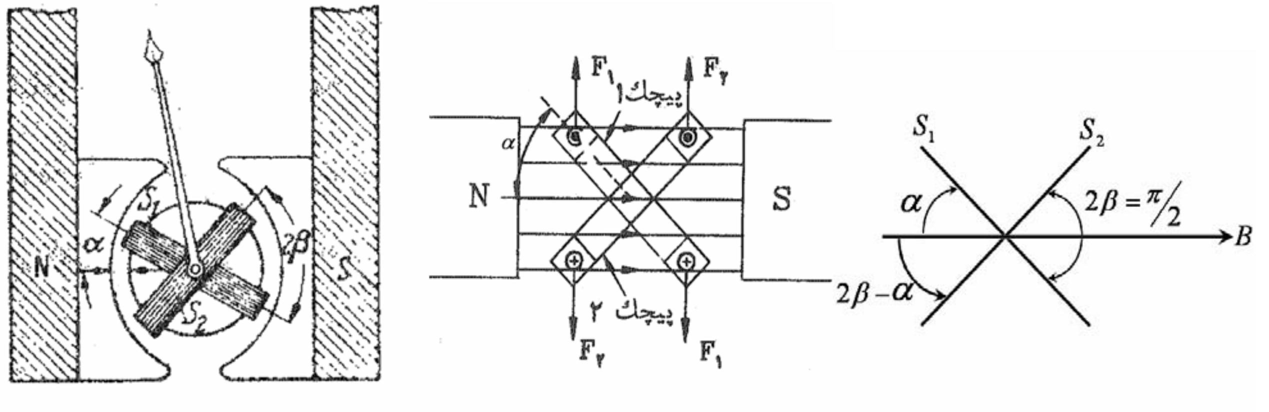
۲- تضعیف فنر مقاوم: جریان از طریق فنر به قاب میرسد و فنر در اثر عبور جریان گرم شده و کوپل مقاوم کم می‌شود. در این حالت مقدار بیش از واقعی نشان داده می‌شود.

۳- تغییر مقاومت سیم پیچی قاب: در اثر گرم شدن ناشی از عبور جریان مقاومت سیم پیچ زیاد می‌شود. راه حل استفاده از موادی است که ضریب افزایش مقاومت آنها با دما کم باشد. یکی از مواد منگانن است که ضریب حرارتی آن $\alpha_m = 0.00015C^{o^{-1}}$ است در حالیکه برای مس این ضریب بسیار بزرگتر است ($\alpha_{cu} = 0.004C^{o^{-1}}$).

۴- افزایش دمای محیط و دستگاه: تجربه نشان داده است که در اثر افزایش 1°C حرارت، ۰/۲٪ خاصیت آهنربائی کم شده و ۰/۴٪ مقاومت فنر کاهش می‌یابد. با افزودن مواد مخصوص برای فنر این کاهش خاصیت فنری را تقلیل می‌دهند. افزایش مقاومت سیم‌پیچ بدلیل استفاده از منگانن، قابل چشم‌پوشی است.

۷-۱۱) دستگاه با قاب صلیبی

این دستگاه یک دستگاه قاب گردان است با این تفاوت که دو قاب که با هم زاویه 2β دارند روی هسته مغناطیسی گردان قرار می‌گیرند. (شکل ۷-۲۱)



شکل (۷-۲۱) دستگاه قاب گردان صلیبی

زاویه بین دو قاب: 2β

زاویه بین قاب و خط میدان: α

جریانها طوری وارد می‌شوند که کوپل قاب S_1 در خلاف جهت کوپل S_2 باشد و ایستادن عقربه در منتجه کوپلها است. یعنی این دستگاه فنر ندارد و کوپل مقاوم توسط قاب دوم ایجاد می‌شود. از این جهت دستگاه را دستگاه قاب گردان با فنر الکتریکی هم می‌گویند. گشتاور انحراف دهنده قاب اول:

$$T_{d_1} = N_1 B A_1 I_1 \cos\alpha \qquad (۵۴\text{-}۷)$$

و گشتاور انحراف دهنده قاب دوم:

$$T_{d_2} = N_2 B A_2 I_2 \cos(2\beta - \alpha) \qquad (۵۵\text{-}۷)$$

هنگامی که عقربه دستگاه به حالت نهایی رسیده است داریم:

$$T_{d_1} = T_{d_2}$$

در دستگاه عملاً $2\beta = \pi/2$ ، $A_1 = A_2$ و $N_1 = N_2$ انتخاب می‌شود. در اینصورت در حالت تعادل داریم:

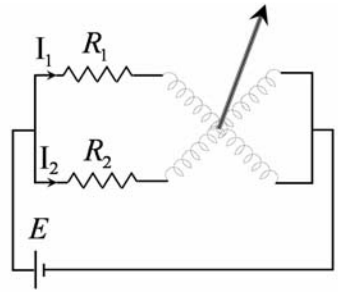
$$I_1 \cos\alpha = I_2 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \qquad (۵۶-۷)$$

با جایگذاری داریم:

$$\Rightarrow \tan\alpha = \frac{I_1}{I_2} \qquad \Rightarrow \qquad \alpha = \tan^{-1}\frac{I_1}{I_2} \qquad (۵۷-۷)$$

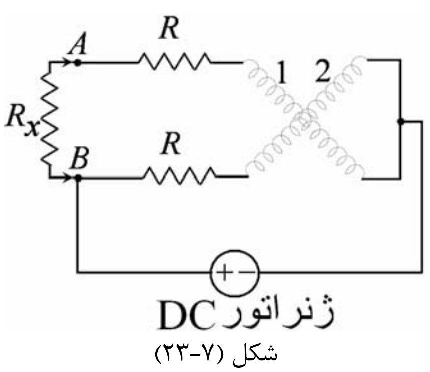
یعنی در صورتیکه دو جریان مساوی باشند $\alpha = 45^\circ$ شده و عقربه در وسط خط‌کش می‌ایستد. حال با استفاده از مدار معادل الکتریکی دستگاه (شکل ۷-۲۲) خواهیم داشت:

$$\left.\begin{aligned} I_1 &= \frac{E}{R_1} \\ I_2 &= \frac{E}{R_2} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \theta = \tan^{-1}\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \qquad (۵۸-۷)$$



شکل (۷-۲۲)

این دستگاه در واقع یک نسبت‌سنج است و کاربرد اصلی آن این دستگاه در ساختن مگر (مگا اهم متر) است که برای سنجش مقاومت عایقی وسایل الکتریکی کاربرد دارد. مدار نمونه‌ای یک دستگاه مگر در شکل (۷-۲۳) دیده می‌شود.



شکل (۷-۲۳)

مولد جریان دائم معمولاً با دست چرخانده می‌شود و با استفاده از کلاچ گریز از مرکز به ازای هر سـرعت، یـک ولتاژ ثابت dc تولید می‌شود. با استفاده از شکل می‌توان دید که اگر $R_x = \infty$ باشد کوپل حاصل فقط از یک سـیم‌پـیچ است و عقربه حداکثر انحراف را خواهد داشت و اگر $R_x = 0$ باشد کوپل حاصل صفر است و عقربـه تکـان نمـی‌خـورد. درجه‌بندی مقیاس برای مقاومتهای بزرگ، باز می‌شود و بنابراین برای تست عایقی کاربرد دارد. مگرهـای $100V$ بـرای تست خطوط تلفن، $250V$ تا $500V$ برای کابل و موتورها و $10000V$ و بالاتر برای فشارقوی ساخته شده‌اند.

فصل هشتم – دستگاه آهن گردان

۸-۱) معرفی:

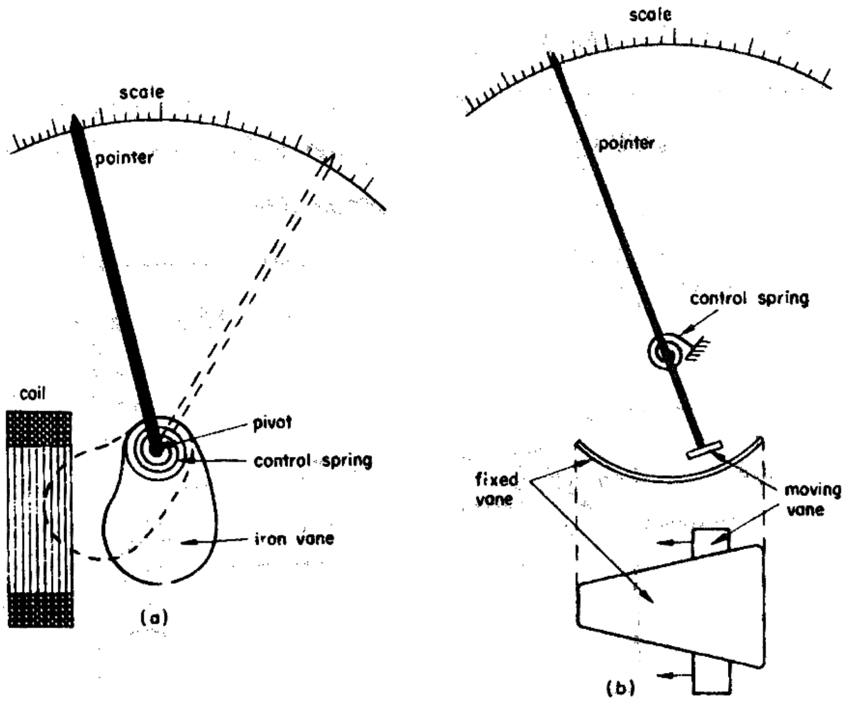
در این دستگاهها پیچک حامل جریان ساکن است و هسته آهنی متحرک. این دستگاهها در تابلوهای برق کاربرد فراوان دارند و در مقایسه با اسبابهای دیگر ac با همان دقت و استحکام، ارزانتر تمام می‌شوند. پیچک با ولتاژ یا جریان اندازه‌گیری شونده تغذیه می‌شود و پره آهنی چنان حرکت می‌کند که رلوکتانس مسیر کاهش یابد. یعنی نیرو یا گشتاور تولیدی در جهتی است که باعث افزایش اندوکتانس پیچک گردد. عقربه دستگاه به هسته آهنی بسته شده و گشتاور مقاوم توسط فنر و یا نیروی جاذبه زمین تامین می‌شود. میرایی معمولاً با اصطکاک هوا تامین می‌شود.

دو نوع دستگاه آهن گردان وجود دارد: ۱- نوع جذبی ۲- نوع دفعی

- در نوع جذبی پس از عبور جریان در پیچک، هسته آهنی که به صورت یک قرص مسطح یا تیغه آهنی است به داخل میدان پیچک کشیده می‌شود.

در دستگاههای تابلویی و یا آنهایی که عمودی نصب می‌شوند می‌توان از جاذبه زمین برای کنترل استفاده نمود. شکل (a-۱-۸) نمایش ساده یک دستگاه آهن گردان نوع جذبی را نشان می‌دهد.

- در نوع دفعی، دو پره در فضای داخلی پیچک قرار دارند که یکی ساکن و دیگر متحرک است. هنگام عبور جریان از پیچک هر دو پره به یک شکل مغناطیس شده و بین آنها نیروی دافعه به وجود می‌آید و در نتیجه پره متحرک حرکت می‌کند. در شکل (b-۱-۸) نمودار این دستگاه دیده می‌شود.



شکل (۱-۸)

۸-۲) معادله کلی گشتاور:

برای بدست آوردن معادله و گشتاور و تعیین زاویه انحراف دستگاه از تعادل انرژی استفاده می‌کنیم.

در اثر تغییرات جزئی در جریان گذرنده از دستگاه، یک انحراف کوچک $d\theta$ ایجاد می‌گردد. اگر T_d گشتاور انحراف دهنده باشد. داریم:

$dw_m = T_d \cdot d\theta$ (کار مکانیکی انجام شده) (۸-۱)

انرژی ذخیره شده در پیچک نیز تغییر می‌کند. چون تغییر در I، L و θ بوجود آمده است.

$$e = d[LI] = I\frac{dL}{dt} + L\frac{dI}{dt}$$

افزایش انرژی ذخیره شده = $\left[\frac{1}{2}(L+dL)(I+dI)^2\right] - (\frac{1}{2}LI^2)$

انرژی الکتریکی اعمال شده = $e \cdot I \cdot dt = I^2 \cdot dL + I \cdot L \cdot dI$

انرژی الکتریکی اعمال شده = افزایش انرژی ذخیره شده + کار انجام شده

$$I^2 \cdot dL + I \cdot L \cdot dI = I \cdot L \cdot dI + \frac{1}{2}I^2 \cdot dL + T_d \cdot d\theta \qquad (۸-۲)$$

$$\Rightarrow T_d \cdot d\theta = \frac{1}{2}I^2 dL \qquad (۸-۳)$$

$$\Rightarrow T_d = \frac{1}{2}I^2\frac{dL}{d\theta} \qquad (۸-۴)$$

که در آن T_d برحسب نیوتن متر، I برحسب آمپر، L برحسب هانری و θ برحسب رادیان است. از سوی دیگر گشتاور مقاوم (یا کنترل) توسط فنر تامین می‌گردد و عبارتست از:

$$T_c = K\theta \qquad (۸-۵)$$

در حالت تعادل نهایی $T_c = T_d$ و با استفاده از روابط (۸-۴) و (۸-۵) داریم:

(فرمول کلی زاویه انحراف دستگاه آهن‌گردان)

در نتیجه میزان انحراف با مجذور جریان عمل‌کننده متناسب است.

۸-۳) توانائی کار با ac و dc

جهت جریان در هر راستا باشد، پره‌ها چنان مغناطیس می‌شوند که در نوع جذبی همدیگر را جذب و در نوع دفعی همدیگر را دفع می‌کنند. به همین دلیل اسباب با آهن متحرک غیرقطبی است. یعنی میزان انحراف عقربه دستگاه به جهت عبور جریان بستگی ندارد. بنابراین دستگاه قابلیت کار با ac و dc را دارد. از معادله دینامیک یا استاتیک دستگاه نیز به راحتی میتوان دریافت که جهت جریان در محاسبه θ نقشی ندارد. همچنین با توجه به ضریب I^2 در معادله کلی انحراف می‌توان نتیجه گرفت که این دستگاه یک موثرسنج است.

۸-۴) مقیاس

بدلیل تناسب انحراف با مجذور جریان، پیداست که مقیاس یکنواخت نیست. اگر $dL/d\theta$ ثابت باشد بهرحال می‌توان مقیاس را رسم کرد. اما در اسبابهای عملی $dL/d\theta$ نیز ثابت نمی‌ماند و مقیاس از شکل مجذوری نیز انحراف می‌یابد. در عمل با طراحی مناسب دستگاه سعی می‌شود دستگاه در قسمت عمده مقیاس یکنواخت باشد. شرط خطی

بودن اینست که $I = K\theta$ باشد. اگر بتوان $\frac{dL}{d\theta}$ را طوری تنظیم کرد که $\theta \cdot \frac{dL}{d\theta}$ همواره مقدار ثابتی باشد مقیاس خطی بدست می‌آید.

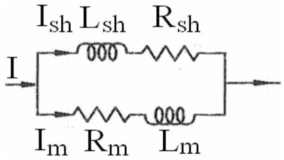
تمرین – این رابطه را ثابت کنید.

انحراف عقربه اسبابهای با آهن‌گردان نوع جذبی و دفعی در عمل محدود به 90° است ولی با ترکیب دو نوع عملکرد می‌توان سنجه‌ای ساخت که مشخصات گشتاور و توزیع مقیاس آن در محدوده 240° خوب باشد.

۸-۵) آمپرسنج با دستگاه آهن‌گردان

از آنجا که قسمت متحرک دستگاه حامل جریان نیست، دستگاههای با آهن‌گردان برای محدوده‌های تا ۵۰A ساخته می‌شوند و به جز در جریانهای خیلی زیاد به شنت احتیاجی ندارد. برای کم کردن اثر بارگذاری آمپرسنج آهن گردان مقطع هادی سیم‌پیچ زیاد و تعداد دورهای آن کم انتخاب می‌شود. در جریانهای بالاتر نیز معمولاً از ترانسفورماتور جریان استفاده می‌شود. اگر لازم باشد که مقاومت شنت با مدار پیچک موازی شود، می‌بایست اثر خودالقایی مقاومت شنت نیز در نظر گرفته شود (شکل ۸-۲).

$$\frac{I_{sh}}{I_m} = \sqrt{\frac{R_m^2 + L_m^2\omega^2}{R_{sh}^2 + L_{sh}^2\omega^2}} = \frac{R_m}{R_{sh}} \frac{\sqrt{1+\left(\omega L_m / R_m\right)^2}}{\sqrt{1+\left(\omega L_{sh} / R_{sh}\right)^2}} \qquad (۸-۷)$$

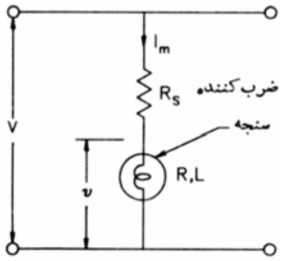


شکل (۸-۲)

برای مستقل بودن انحراف از فرکانس جریان ورودی باید ثابت زمانی سنجه و شنت برابر باشند. یعنی باید $L/R = L_{sh}/R_{sh}$. اما چون طراحی شنت با اندوکتانس مناسب مشکل است، در این دستگاهها به ندرت از شنت استفاده می‌شود.

۸-۶) ولت‌سنج با دستگاه آهن‌گردان

همانند گالوانومتر، گستره ولتاژ دستگاه آهن‌گردان را نیز می‌توان به کمک یک مقاومت متوالی با پیچک مطابق شکل (۸-۳) افزایش داد. برای اینکه دستگاه در مقابل فرکانسهای مختلف جواب ثابتی بدهد لازم است امپدانس مدار ورودی ولت‌سنج در این طیف فرکانسی ثابت بماند. از اینرو مقاومت سری باید از نوع بدون اندوکتانس ساخته شود. در عمل با توجه به بزرگی R_s اثر تغییر X_L در فرکانسهای مختلف بی‌اهمیت می‌گردد.



شکل (۸-۳)

۸-۷) مقایسه دستگاههای جذبی با دفعی

اندوکتانس اسبابهای جذبی معمولاً کمتر از اسبابهای دفعی متناظر است و بنابراین ولت‌سنج در طیف فرکانسی وسیعتری دقیق است و امکان کاربرد شنت برای آمپرسنج بیشتر است. از سوی دیگر دستگاههای دفعی از نظر تولید اقتصادی کارخانه‌ای مناسبتر هستند و مقیاس یکنواخت در آنها آسانتر بدست می‌آید. بنابراین نوع دفعی متداولتر از نوع جذبی است.

۸-۸) خطاهای آهن‌گردان

دو نوع خطا در این دستگاه پیش می‌آید: خطاهایی که در اندازه‌گیری ac و dc مشترکاً پیش می‌آیند و خطاهایی که فقط در ac پیش می‌آیند.

۸-۸-۱) خطاهای مشترک در ac و dc

الف – خطاهای پسماندی: چگالی شار در هنگام افزایش و کاهش جریان در یک ماده مغناطیسی یکسان نیست و بنابراین دستگاه در هنگام کاهش جریان (یا ولتاژ) عدد بزرگتری را نشان خواهد داد. راه حل استفاده از مواد آلیاژی آهن نیکل است که دارای حلقه هیسترزیس باریک هستند. همچنین قسمتهای آهنی دستگاه کوچک انتخاب می‌شود تا سریعتر خاصیت مغناطیسی خود را از دست بدهد.

خطای پسماند ۲ تا ۳ درصد است و با استفاده از آلیاژها تا مقدار ۰/۰۵ درصد کاهش می‌یابد.

ب – خطاهای گرمایی: از بین رفتن خاصیت فنر و افزایش مقاومت سیم‌پیچ سنجه و مقاومت سری در اثر گرما خطاهای عمده گرمایی هستند. با استفاده از ماده منگانن در ساخت R_s و بزرگ کردن نسبت $\frac{R_s}{R_m}$ اثر خطای ناشی از گرم شدن حتی‌المقدور کاهش می‌یابد.

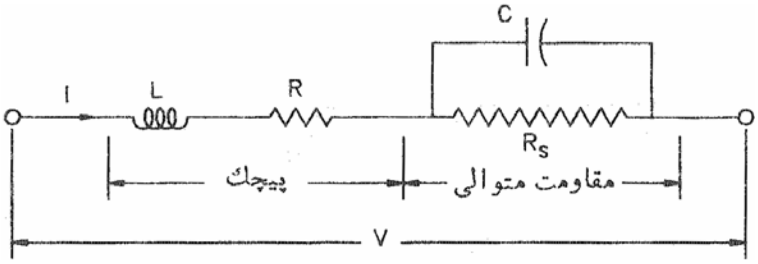
ج – خطای ناشی از میدانهای مغناطیسی پراکنده: در دستگاه اندازه‌گیری رلوکتانسی معمولاً میدان مغناطیسی عمل کننده ضعیف است و بنابراین به راحتی توسط میدانهای خارجی اعوجاج پیدا می‌کند. لذا با استفاده از جعبه فلزی و یا یک حفاظ آهنی بر روی قسمتهای عمل کننده می‌توان این خطا را کم کرد.

۸-۸-۲) خطاهای منحصر به ac (خطای فرکانس)

تغییر فرکانس به دلیل تغییر دادن راکتانس پیچک و نیز تغییر دادن دامنه جریانهای گردابی تولید شده در قسمتهای فلزی دستگاه می تواند خطا ایجاد کند. این خطا در ولتمتر و آمپرمتر آهن‌گردان مشاهده خواهد شد.

- **خطای ناشی از تغییر راکتانس پیچک** با افزودن یک خازن به صورت موازی با R_s تا حد زیادی قابل جبران است (شکل ۸-۴). اگر C به درستی انتخاب شود، مدار کلاً به صورت یک مقاومت خالص عمل کرده و اثر تغییر فرکانس در آن مشاهده نمی‌شود. این شرط برای C به صورت رابطه (۸-۸) در می‌آید:

$$C = \frac{L}{R_s^2} \qquad (۸-۸)$$



شکل (۸-۴)

انحراف با افزایش فرکانس برای یک جریان خاص کم می‌شود $\Rightarrow I=\dfrac{V}{\sqrt{(R+R_s)^2+\omega^2L^2}}$ بدون خازن

با خازن $Z=j\omega L+\dfrac{R_s}{1+j\omega CR_s}+R\approx j\omega L+\dfrac{R_s-j\omega CR_s^2}{1+\omega^2C^2R_s^2}$ (۸-۱۰)

$\omega CR_s \langle\langle 1 \Rightarrow$

$Z\approx j\omega L+\left(R_s-j\omega CR_s^2\right)\cdot\left(1-\omega^2C^2R_s^2\right)=R_s+j\omega(L-CR_s^2)$ (۸-۱۱)

و چون Z در همه فرکانسها باید با R_s برابر باشد پس:

$L-CR_s^2=0$

که در آن L سلف اندوکتانس پیچک و R_s مقاومت اهمی عنصر شنت می‌باشد.

خطای ناشی از جریانهای گردابی از آنجا ناشی می‌شود که جریان گردابی یک نیروی مقاوم مخالف حرکت (کاهش گشتاور محرک) ایجاد می‌کند. اگر ضریب القای متقابل بین پیچک و پره را M، جریان پیچک را I و امپدانس مسیر جریانهای گردابی را Z_e بگیریم، جریان گردابی I_e در پره آهنی چنین بدست خواهد آمد.

$$I_e=\frac{E_e}{Z_e}=\frac{\omega MI}{\sqrt{R_e^2+\omega^2L_e^2}} \qquad (۸-۱۲)$$

بنابراین خطای جریان گردابی در فرکانسهای کم با مجذور فرکانس افزایش می‌یابد و در فرکانس‌های بالا خطا عملاً ثابت است.

و مولفه‌ای از آن که بر خلاف جریان I عمل کرده و گشتاور مقاوم ایجاد می‌کند.

$$I_e'=\frac{\omega^2ML_eI}{R_e^2+\omega^2L_e^2} \qquad (۸-۱۳)$$

$$I_e'\approx\omega^2\frac{ML_eI}{R_e^2} \qquad (۸-۱۴)$$

اگر $\mathrm{Re}\rangle\rangle\omega L_e$ باشد یعنی مسیر جریانهای گردابی اهمی و ω به حد کافی کوچک باشد آنگاه

اما اگر ω بزرگ باشد:

$$I_e'\approx\frac{MI}{L_e} \qquad (۸-۱۵)$$

بنابراین دستگاه برای فرکانسهای بالاتر از ۱۰۰Hz مناسب نیست.

۸-۹) مزایا و معایب

۸-۹-۱) مزایا

الف) کاربرد ac و dc

ب) خطای اصطکاک کم (نسبت گشتاور به وزن بزرگ است)

ج) ارزانی: شنت نمی‌خواهد (از صفر تا ۵۰A) و پیچک مقطع بزرگ و دور کم برای آمپرسنجی و مقطع کم و دور زیاد برای ولت‌سنجی.

د) استحکام: نداشتن سیستم متحرک حامل جریان

ه) طول مقیاس (240°) : ولی غیرخطی معمولاً در محدوده پایین دستگاه

و) دقت ۲٪

۸-۹-۲) معایب

الف) خطاهای شکل موج (خطی نبودن منحنی B-H آهن): (یعنی گشتاور انحراف دهنده واقعاً و دقیقاً با مربع جریان متناسب نیست) از عناصری که در محدوده اشباع کار کنند می‌توان استفاده کرد ولی در آنجا نیز مشکل عدم بهینه‌سازی است. یعنی حداکثر انحراف بدست نمی‌آید.

ب) خطاهای ناشی از پسماند، تغییر فرکانس، میدانهای مغناطیسی پراکنده

ج) تفاوت درجه‌بندی ac و dc (به واسطه اثر اندوکتانس پیچک و جریان گردابی در کار با ac)

د) مقیاس در محدوده پایین، بهم فشرده است.

مثال (۸-۱)- یک دستگاه ولت‌سنج آهن گردان با محدوده 300V دارای پیچک با مقاومت 500Ω و اندوکتانس 0.8H است. فرکانس نامی عملکرد دستگاه 50Hz است. (ولت‌سنج 50Hz خطا ندارد). جریان عبوری از دستگاه در انحراف تمام مقیاس برابر 100mA است. وقتی دستگاه به یک منبع ولتاژ dc با مقدار 200V متصل شود چه عددی را نشان خواهد

داد؟ (201.5)

خطای دستگاه در این حالت چقدر است؟

$$X_L = 2\pi \times f \times L = 2\pi \times 50 \times 0.8 = 251.2\Omega$$

امپدانس مدار در 50Hz:

$$Z_{50} = \frac{300}{0.1} = 3000\Omega$$

$$I_{m_{max}} = 0.1A$$

مقاومت (اهمی) مدار دستگاه

$$R = \sqrt{Z_{50}^2 - X_L^2} = \sqrt{(3000)^2 - (251.2)^2} = 2989\Omega$$

جریانی که دستگاه در 200V (ac) می‌کشد:

$$I_{m_{ac}} = \frac{200}{3000} = \frac{1}{15}A$$

جریانی که دستگاه در 200V (dc) می‌کشد:

$$I_{m_{dc}} = \frac{200}{2989} = 0.067A$$

انحراف در این دستگاه با I^2 متناسب است.

$$\theta = KI^2 \, dL/d\theta$$

$$\text{dc 200V قرائت دستگاه در} = \frac{(I_{m_{dc}})^2}{(I_{m_{ac}})^2} \times 200 = \frac{(0.067)^2}{\left(\frac{1}{15}\right)^2} \times 200 = 201.5$$

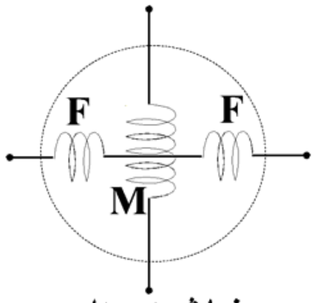
خطای قرائت: $\frac{201.5-200}{200}\times 100 = 0.75\,\%$

فصل نهم – دستگاه الکترودینامیکی

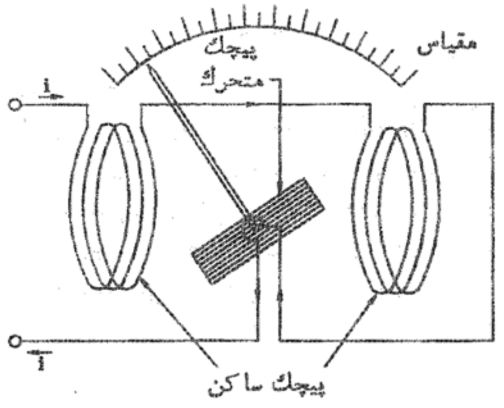
۹-۱) معرفی

در گالوانومتر دارسونوال دیدیم که سیم‌پیچ حامل جریان در داخل میدان مغناطیسی ناشی از یک آهنربای دائم، به حرکت در می‌آید. در دستگاه الکترودینامیکی به جای آهنربای دائم از یک سیم‌پیچ دیگر برای ایجاد میدان مغناطیسی استفاده می‌شود. به عبارت دیگر اساس کار این دستگاه تاثیر متقابل میدانهای مغناطیسی ناشی از دو سیم‌پیچ حامل جریان است. یکی از این سیم‌پیچها ساکن و دیگری قابل چرخش حول یک محور می‌باشد.

- سیم‌پیچ ثابت به دو نیمه متقارن تقسیم شده است و معمولاً از همان جریانی که به سیم‌پیچ متحرک می‌رود تغذیه می‌شود.



نمایش در مدار



شکل (۹-۱) نمودار ساده دستگاه الکترودینامیکی

- دو نیمه سیم‌پیچ ثابت همیشه با همدیگر سری هستند. برای خذف اثر جریانهای گردابی پیچک متحرک یا به صورت خود نگهدار و یا روی یک قاب غیرفلزی پیچیده می‌شود. در واقع می‌توان فرض کرد که پیچکهای ساکن و متحرک هر دو دارای هسته هوایی هستند.

- گشتاور کنترل در این دستگاه نیز توسط فنر فراهم می‌شود و سیستم متحرک علاوه بر فنر شامل عقربه و وزنه‌های تعادل می‌باشد.

- میرایی دستگاه با اصطکاک هوا و توسط دو پره آلومینیومی متصل به انتهای محور ایجاد می‌شود. این پره‌ها در اتاقکهای قطاعی شکل حرکت می‌کنند.

- به دلیل عدم استفاده از هسته‌های آهنی میدان مغناطیسی دستگاه ضعیف است و حتی میدان مغناطیسی زمین هم می‌تواند روی آن اثر بگذارد. به همین دلیل از حفاظ‌های یک لایه و در موارد دقیقتر از حفاظهای دولایه برای دستگاه استفاده می‌شود.

گالوانومتر دارسونوال: $1000G \langle B \langle 4000G$

الکترودینامومتر: $B \approx 60G$

۹-۲) معادله گشتاور

فرض کنیم: i_1= جریان لحظه‌ای در پیچکهای ساکن، برحسب آمپر

i_2= جریان لحظه‌ای در پیچک متحرک، برحسب آمپر

L_1= ضریب خود القایی پیچکهای ساکن، برحسب هانری

L_2= ضریب خود القایی پیچک متحرک، برحسب هانری

M= ضریب القای متقابل بین پیچکهای ساکن و پیچک متحرک، برحسب هانری

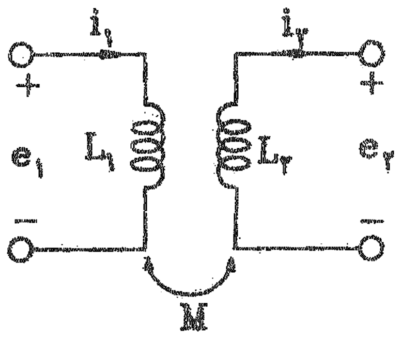
با توجه به شکل (۹-۲) داریم :

شار گردشی پیچک ۱ $= \lambda_1 = L_1 i_1 + M i_2$ (۹-۱)

شار گردشی پیچک ۲ $= \lambda_2 = L_2 i_2 + M i_1$ (۹-۲)

و همچنین

$$e_1 = {d\lambda_1}/{dt},\ e_2 = {d\lambda_2}/{dt} \qquad (۹-۳)$$



شکل (۹-۲) –معادل مداری دستگاه الکترودینامیکی

با توجه به اصل بقای انرژی داریم:

(۹-۴) انرژی مکانیکی + انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی= انرژی الکتریکی ورودی به دستگاه

یعنی :

$$W_e = W_f + W_m \Rightarrow dW_e = dW_f + dW_m \qquad (۹-۵)$$

$$dW_e = e_1 i_1 dt + e_2 i_2 dt$$
$$= i_1 L_1 di_1 + i_1^2 dL_1 + i_1 i_2 dM + i_1 M di_2 + i_2 L_2 di_2 + i_2^2 dL_2 + i_1 i_2 dM + i_2 M di_1 \qquad (۹-۶)$$

$$W_f = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + i_1 i_2 M \qquad (۹-۷)$$

$$\Rightarrow dW_f = i_1 L_1 di_1 + \frac{i_1^2}{2} dL_1 + i_2 L_2 di_2 + \frac{i_2^2}{2} dL_2 + i_1 M di_2 + i_2 M di_1 + i_1 i_2 dM \qquad (۹-۸)$$

بنابراین با جایگزینی (۹-۶) و (۹-۸) در (۹-۵) داریم:

$$dW_m = \frac{i_1^2}{2} dL_1 + \frac{i_2^2}{2} dL_2 + i_1 i_2 dM \qquad (۹-۹)$$

ضرایب خودالقایی L_1 و L_2 ثابت هستند. بنابراین $dL_2 = dL_1 = 0$ و خواهیم داشت.

$$dW_m = i_1 i_2 dM \qquad (۹-۱۰)$$

اگر گشتاور انحراف دهنده لحظه‌ای را T_i بگیریم و $d\theta$ تغییر انحراف متناظر با آن باشد پس:

$$dW_m = T_i d\theta = i_1 i_2 dM \qquad (۹-۱۱)$$

$$T_i = i_1 i_2 \frac{dM}{d\theta} \qquad (۹-۱۲)$$

۹-۳) معادله تعادل در حالت dc:

اگر I_1 جریان پیچک‌های ساکن و I_2 جریان پیچک متحرک باشد. با استفاده از رابطه ۹-۱۲ که برای جریانهای لحظه‌ای بدست آمد، خواهیم داشت:

$$T_d = I_1 I_2 \frac{dM}{d\theta} \qquad (۹-۱۳)$$

این گشتاور تا هنگامی که با گشتاور مقاوم فنر برابر نشده است. پیچک متحرک را منحرف می‌کند. اگر θ زاویه انحراف پایدار نهایی باشد گشتاور کنترل عبارت خواهد بود از $T_c = K\theta$ و چون در حالت تعادل $T_d = T_c$ است، θ را می‌توان چنین نوشت:

$$\theta = \frac{I_1 I_2}{K_l} \cdot \frac{dM}{d\theta} \qquad (۹-۱۴)$$

۹-۴) معادله تعادل در حالت ac

با استفاده از رابطه (۹-۱۲) گشتاور انحراف دهنده متوسط در یک دوره تناوب کامل T چنین بدست می‌آید:

$$T_d = \frac{1}{T}\int_0^T T_i dt = \frac{1}{T}\frac{dM}{d\theta}\int_0^T i_1 i_2 dt \qquad (۹-۱۵)$$

(T دوره تناوب است) اگر جریانهای i_1 و i_2 سینوسی با فرکانس ω و اختلاف فاز ϕ باشند:

$$i_1 = I_{m_1}\sin(\omega t)\ ,\ i_2 = I_{m_2}\sin(\omega t - \varphi)$$

گشتاور انحراف دهنده متوسط برابر خواهد شد با:

$$T_{av} = I_1 I_2 \cos\varphi \cdot \frac{dM}{d\theta} \qquad (۹-۱۶)$$

(I_1 و I_2 مقادیر موثر جریانهای I_1 و I_2 هستند)

و چون در حالت پایدار نهایی T_d با T_c برابر خواهد بود، برای θ چنین بدست می‌آید:

$$\theta = \frac{I_1 I_2}{K_l}\cos\varphi \cdot \frac{dM}{d\theta} \qquad (۹-۱۷)$$

پس برای جریانهای سینوسی گشتاور انحراف دهنده و انحراف به حاصلضرب مقادیر جریانها و اختلاف فاز بین آنها بستگی دارد. رابطه (۹-۱۷) در مقایسه با رابطه (۹-۱۴) نشان می‌دهد که اگر دستگاه برای جریانهای dc مدرج شده باشد و از آن برای سنجش ac با دو جریان **همفاز** بکار رود مقیاس بدون هیچگونه تغییری، مقدار موثر جریان ac را نشان خواهد داد.

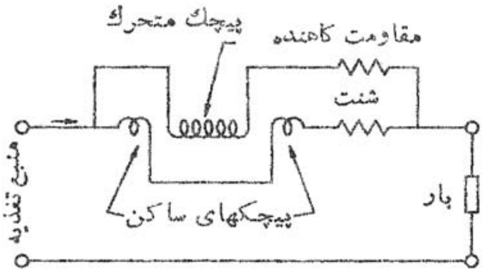
۹-۵) آمپرسنج الکترودینامومتری

شکل (۹-۱) آرایش پیچکهای یک آمپرسنج الکترودینامومتری را نشان می‌دهد. در این حالت پیچکهای ساکن و متحرک متوالی هستند. بنابراین داریم(در حالت ac و dc): $\varphi = 0$ و $I = I_1 = I_2$

پس با استفاده از رابطه (۹-۱۷) می‌توان نوشت (رابطه (۹-۱۷) عام‌تر از رابطه (۹-۱۴) است بنابراین شامل آن هم می‌شود.).

$$\theta = \frac{I^2}{K_l} \cdot \frac{dM}{d\theta} \qquad (۱۸-۹)$$

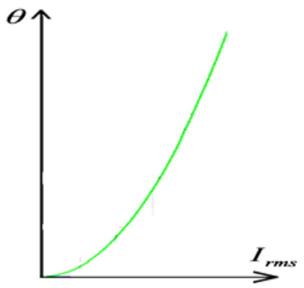
در این دستگاهها محدوده جریان پیچک متحرک تا ۲۰۰mA است و برای سنجش جریانهای بزرگتر، از مقاومت شنت استفاده می‌شود (شکل ۹-۳). در این حالت مجموعه مقاومت کاهنده و پیچک متحرک به صورت متوالی و مجموعه پیچکهای ساکن و مقاومت شنت نیز به صورت متوالی است و این دو مجموعه با هم موازی می‌شوند. برای اینکه قرائت دستگاه در فرکانسهای متفاوت دچار اختلاف نشود بایستی ثابت زمانی L/R دو شاخه مساوی باشد وگرنه جریان دو شاخه مستقل از فرکانس نخواهد بود.



شکل (۹-۳)

تبصره – ۱- بدیهی است چون انحراف با توان دوم جریان مرتبط است درجه‌بندی مقیاس برحسب جریان خطی نمی‌باشد: (شکل ۹-۴)

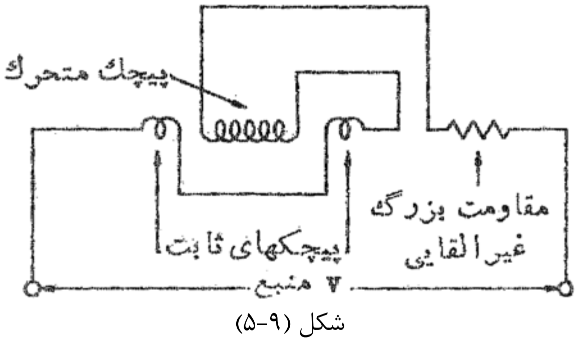
۲- علامت + و – برای ورودیهای آمپرمتر تعیین نمی‌شود. (چرا؟)



شکل (۹-۴) رابطه بین جریان ورودی و زاویه انحراف عقربه در یک آمپرسنج دینامومتری

۹-۶) ولت‌سنج الکترودینامومتری

با اتصال متوالی یک مقاومت بزرگ غیرالقایی با پیچکهای ساکن و متحرک می‌توان یک ولت‌متر ساخت این ترکیب راشکل (۹-۵) نشان می‌دهد.



شکل (۹-۵)

گشتاور انحراف طبق رابطه کلی (۹-۱۶) بدست می‌آید و چون در این حالت $I_1 = I_2 = \frac{V}{Z}$ و $\phi = 0$ بنابراین:

$$T_d = \frac{V^2}{Z^2} \cdot \frac{dM}{d\theta} \qquad (۹-۱۹)$$

که در آن V ولتاژ اعمال شده به دستگاه و Z امپدانس ورودی دستگاه است. بنابراین انحراف عبارتست از:

$$\theta = \frac{V^2}{K_l Z^2} \cdot \frac{dM}{d\theta} \qquad (۹-۲۰)$$

ولت‌سنج الکترودینامومتری دقیقترین ولت‌سنج ac است ولی حساسیت آن در مقایسه با اسبابهای dc کم است (به چه دلیل فیزیکی؟). به عنوان مثال:

$S = 30\,\Omega/V$ ولت‌سنج الکترودینامومتری

$S = 20\,K\Omega/V$ ولت‌سنج دارسونوال

بدیهی است در اینجا نیز + یا − بودن ورودیهای ولتمتر تاثیری در انحراف عقربه ندارد.

۹-۷) سنجش توان با دستگاه الکترودینامیکی:

همانگونه که دیده شد الکترودینـامومتر اساساً یـک دسـتگاه حاصلـضرب‌سـنج اسـت (در مقایـسه گـالوانومتر دارسونوال که یک متوسط‌سنج و دستگاه آهن‌گردان که یک موثرسنج است) و بنابراین کاربرد اصلی آن سـنجش تـوان (توان ظاهری، توان اکتیو و توان راکتیو) است.

می‌دانیم که:

$S =$ توان ظاهری لحظه‌ای $= v.i$

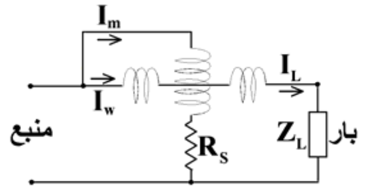
$P =$ توان اکتیو (حقیقی) لحظه‌ای $= v.i.\cos\theta$, $\qquad S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

$Q =$ توان راکتیو لحظه‌ای $= v.i.\sin\theta$

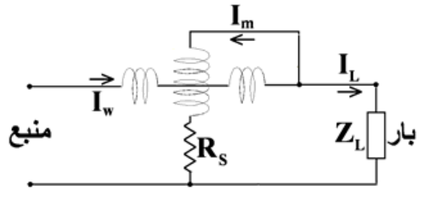
(θ اختلاف فاز بین موجهای ولتاژ و جریان است.)

۹-۷-۱) واتمتر

شکل (۹-۶) آرایش یک دستگاه الکترودینامیکی که برای سنجش توان مصرفی بارهای الکتریکی بکـار مـی‌رود را در دو حالت (بار با امپدانس بالا یا بار سبک و با امپدانس کم – بار سنگین) نشان می‌دهد.



A – بار سبک (Z_L بزرگ)



B – بار سنگین (Z_L کوچک)

شکل (۹-۶)

دیده می‌شود که سیم‌پیچ متحرک نقش ولتمتر را ایفا می‌کند و لذا بایستی یک مقاومـت بـزرگ بـا آن سـری شود. حال اگر فرض کنیم:

R_c = مقاومت پیچک جریان (مقدار بسیار کوچک)

R_v = مقاومت پیچک ولتاژ (مقدار بسیار بزرگ)

R_L = مقاومت اهمی بار
jX_L = راکتانس القایی بار
jX_c = راکتانس القایی پیچک جریان
I_w = جریان عبوری از پیچک جریان
I_L = جریان بار
V_w = ولتاژ دو سر پیچک ولتاژ
V_L = ولتاژ دو سر بار
I_m = جریان عبوری از پیچک ولتاژ

به علت سری شدن یک مقاومت بزرگ با پیچک ولتاژ از راکتانس سلفی آن می‌توان صرفنظر کرد. حال با استفاده از پارامترهای فوق و با در نظر گرفتن رابطه (۹-۱۷) داریم:

$$\text{قرائت واتمتر}\ \theta=\frac{I_w\cdot I_m}{k_l}cos\varphi\cdot\frac{dM}{d\theta} \qquad (۹-۲۱)$$

با طراحی مناسب سعی می‌شود $\frac{dM}{d\theta}$ در محدوده کار دستگاه ($45^\circ\langle\theta\rangle145^\circ$) ثابت بماند. بنابراین:

$$\theta=k_wI_wI_m\,cos\varphi=k_wI_w\frac{V_w}{R_v}cos\varphi \qquad (۹-۲۲)$$

با توجه به آرایش‌های دوگانه شکل (۹-۶) با تقریب مناسب می‌توان گفت که $I_w=I_L$ و $V_w=V_L$ (چرا؟).

یعنی:

$$\theta=k'_wI_LV_L\,cos\varphi \qquad (۹-۲۳)$$

که در آن ϕ اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان بار است. بنابراین دستگاه در واقع یک وات‌سنج است.

نکته قابل ذکر این است که در این حالت رعایت سربندی (+و-) وات‌متر جهت قرائت صحیح توان لازم است (چرا؟).

۹-۷-۲) سنجش توان راکتیو (وارمتر)

در این اندازه‌گیری $V_LI_L\sin\varphi$ مورد نظر می‌باشد. روش متداول بدین‌صورت است که توسط یک مدار الکتریکی یا الکترونیکی سیگنالی را که 90° از ولتاژ عقب‌تر باشد ایجاد نموده و سپس سیگنال را در جریان بار ضرب می‌کنند:

در اینصورت انحراف دستگاه متناسب با $V_LI_L\cos(\frac{\pi}{2}-\varphi)$ خواهد بود. بنابراین:

$$\theta=k_{var}V_LI_L\,sin\varphi=k_{var}Q_L \qquad (۹-۲۴)$$

۹-۷-۳) سنجش توان ظاهری:

در اینجا چون حاصلضرب ولتاژ و جریان بار بدون اختلاف فاز آنها مورد نظر است. متداولترین راه این است که ابتدا از جریان و ولتاژ توسط ترانس‌های اندازه‌گیری نمونه‌برداری شده و پس از یکسوسازی آنها به صورت سیگنال dc به وات‌متر اعمال می‌شود. به دلیل اینکه در این حالت $\cos\phi=1$ خواهد بود. لذا انحراف فقط تابع حاصلضرب اندازه سیگنالها است.

۹-۸) خطاهای دستگاه الکترودینامیکی:

منابع عمده خطا عبارتند از کوچک بودن گشتاور نسبت به وزن، فرکانس، جریانهای گردابی، میدانهای مغناطیسی خارجی و تغییر دما. برای حل مشکل اول سعی می‌شود پیچک متحرک کم حجم و سبک ساخته شود و قسمت اعظم جریان عبوری از پیچکهای ساکن (با قطر و وزن زیاد) بگذرد تا گشتاور حاصله نیز کاهش نیابد.

برای احتراز از خطای فرکانس لازم است L/R مدار پیچکهای ساکن و متحرک در آمپرمترها یکسان باشند و در مورد ولتمتر باید ضریب اندوکتانس قسمت کوچکی از امپدانس کل ورودی دستگاه باشد. (یعنی R_s بزرگ و غیرسلفی باشد.)

خطای جریان گردابی به دلیل تزویج بین پیچک متحرک با پیچکهای ساکن ایجاد می‌شود و بنابراین هسته‌ها از نوع هوایی و تکیه‌گاه پیچکها نیز فاقد فلز ساخته می‌شوند.

برای حذف اثر میدانهای مغناطیسی خارجی از حفاظ استفاده می‌شود و چون حفاظ فلزی، خود در جریانهای گردابی نقش مولد خطا را دارد، در اسبابهای دقیق از روش دیگری استفاده می‌شود. در این روش عملاً دو دستگاه هم محور با یک عقربه قرار می‌گیرند که جهت میدانهای مغناطیسی آنها در جهت مخالف ولی کوپل اعمالی در یک جهت است. در این حالت یک میدان مغناطیسی خارجی باعث کاهش شار در یکی و افزایش در دیگری شده و در نتیجه کوپل حاصله نسبتاً ثابت می ماند.

خطا در اثر دما نیز ناشی از عبور جریان از پیچک‌ها و گرم شدن و افزایش مقاومت آنها است که با استفاده از مواد مناسب این خطا کاهش می‌یابد.

۹-۹) مزایا و معایب

۹-۹-۱) مزایا:

* به دلیل هسته هوایی خطای پسماند و فوکو و غیرخطی بودن B-H را ندارند.
* دستگاهها در محدوده ۴۰ تا ۵۰۰ هرتز بسیار دقیق عمل می‌کنند و دستگاههای بدون حفاظ تا ۱۰KHz قابلیت کاربرد دارند.
* در ac و dc به کار می‌روند.
* برای تعیین مقدار موثر یک موج (غیر سینوسی) دقیق عمل می‌کنند. رابطه ۹-۱۵ نشان می‌دهد که: $\left(T_d \propto E^2\right)$ که E مقدار موثر شکل موج مورد نظر است.

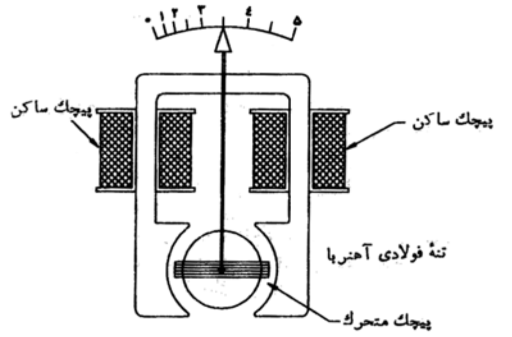
۹-۹-۲) معایب:

* نسبت گشتاور به وزن و در نتیجه حساسیت آنها کم است
* اتلاف اصطکاکی با توجه به کوچک بودن گشتاور، نسبت بزرگی را دارد.
* از دستگاههای قاب‌گردان یا آهن‌گردان گرانتر هستند.
* جریان لازم برای کارکرد دستگاه، به‌سبب کوچک بودن میدان مغناطیسی، زیاد است.
* مقیاس غیر یکنواخت دارند.
* در فرکانسهای پایین نوسانات گشتاور را دنبال می‌کنند و نمی‌توانند متوسط‌گیری کنند. (در ۵ تا ۱۵ هرتز کاربرد ندارند یا باید میرایی خاص برای آنها طراحی شود.)

۹-۱۰) دستگاه فرودینامیکی

ساختمان این دستگاه بر اساس شبیه به نوع الکترودینامیکی است. با این تفاوت که مدار مغناطیسی آن از آهن نرم تشکیل شده است (شکل ۹-۷). دو نیمه پیچک ساکن روی هسته نصب شده و پیچک متحرک نیز یک قاب‌گردان با هسته استوانه‌ای است و شکل هسته طوری است که میدان در فاصله هوایی شعاعی باشد.

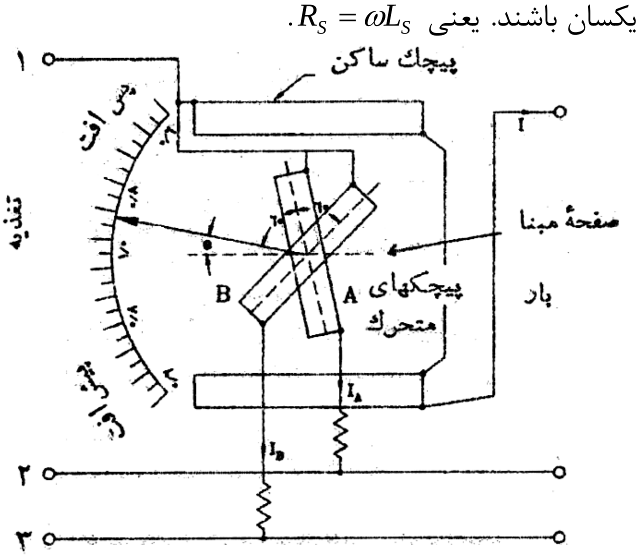
طرز کار دستگاه بدین‌صورت است که در شکاف هوایی یک میدان یکنواخت شعاعی متناسب با جریان پیچک ساکن تولید می‌شود. جریان پیچک متحرک در تعامل با این میدان گشتاور تولید می‌کند. مقدار متوسط گشتاور از همان رابطه (۹-۱۶) بدست می‌آید. به دلیل استفاده از هسته مغناطیسی و افزایش گشتاور دستگاه را می‌توان کوچکتر، مستحکمتر و ارزانتر ساخت و همچنین اثر میدانهای مغناطیسی خارجی کاهش می‌یابد. در عوض، بکار بردن آهن اتلافهای پسماندی و جریان فوکویی را افزایش می‌دهد و بنابراین دقت و محدوده فرکانسی این دستگاه از نوع الکترودینامیکی کمتر است.



شکل (۹-۷) دستگاه فرودینامیکی

۹-۱۱) محاسبه ضریب توان ($\cos\phi$) با استفاده از دستگاه الکترودینامیکی با قاب صلیبی

شکل (۹-۸) ساختمان یک ضریب توان‌سنج الکترودینامیکی تکفاز را نشان می دهد. پیچک ساکن به عنوان پیچک جریان عمل می‌کند و از دو قسمت مساوی تشکیل شده است. جریان مدار تحت آزمایش از این پیچک می‌گذرد. دو پیچک قاب صلیبی A و B هر دو به صورت ولت‌متری بسته شده‌اند. اما در یکی از آنها به جای مقاومت سری از سلف سری استفاده شده است. مقدار R_s و L_s طوری انتخاب شده‌اند که دو شاخه مزبور در فرکانس معین کارکرد دستگاه دارای جریان یکسان باشند. یعنی $R_S = \omega L_S$.



شکل (۹-۸)

بنابراین جریان پیچک A همفاز با ولتاژ مدار است در حالی که جریان پیچک B در حالتی که L کاملاً سلفی باشد 90° نسبت به ولتاژ پس افت دارد. زاویه بین صفحات پیچکها نیز برابر 90° انتخاب شده است. همانطور که در مورد دستگاه قاب صلیبی گفته شد، نیروی کنترل از تقابل دو پیچک قاب ایجاد می‌شود و به دلیل اینکه گشتاورهای این دو پیچک در جهت مخالف یکدیگر هستند. عقربه نهایتاً در جایی می‌ایستد که این دو گشتاور برابر باشند. اگر فرض کنیم ضریب توان بار در حالت پسفاز و برابر $\cos\phi$ باشد و ارتباط M و θ از رابطه زیر بدست آید:

$$M=-M_{max}\cos\theta \Rightarrow {dM}/{d\theta}=M_{max}\sin\theta \qquad (۹-۲۵)$$

در اینصورت با استفاده از رابطه (۹-۱۶) گشتاور انحراف دهنده موثر بر پیچک A چنین بدست می‌آید:

$$T_A=K\cdot V\cdot I\cdot M_{max}\cos\varphi\cdot\sin\theta \qquad (۹-۲۶)$$

و گشتاور انحراف دهنده موثر بر پیچک B خواهد شد:

$$T_B=K\cdot V\cdot I\cdot M_{max}\cos(90^\circ-\varphi)\cdot\sin(90^\circ+\theta)=K\cdot V\cdot I\cdot M_{max}\sin\varphi\cdot\cos\theta \qquad (۹-۲۷)$$

در حالت تعادل داریم:

$$T_A=T_B\Rightarrow KVIM_{max}\cos\varphi\sin\theta=KVLM_{max}\sin\varphi\cos\theta\Rightarrow\tan\theta=\tan\varphi\Rightarrow\theta=\varphi \qquad (۹-۲۸)$$

یعنی انحراف دستگاه برابر اختلاف فاز بار است. صفحه دستگاه را برحسب $\cos\phi$ مدرج می‌کنند. باید به این نکته توجه داشت که در اثر تغییر فرکانس باید L یا R یا هر دو تغییر کنند تا رابطه $R=\omega L$ برقرار بماند وگرنه دستگاه دچار خطا خواهد شد.

مثال (۹-۱)- در یک آمپرسنج الکترودینامومتری M به صورت M=-6cos(θ+30°)mH تغییر می‌کند. که در آن θ برحسب درجه است. T_d حاصل از جریان مستقیم 50mA و متناظر با انحراف ۶۰° را پیدا کنید.

$$\frac{dM}{d\theta}=\frac{d}{d\theta}\left(-6\cos(\theta+30^\circ)\right)=6\sin(\theta+30^\circ)$$

$$\theta=60^\circ\Rightarrow\frac{dM}{d\theta}=6\times10^{-3}H$$

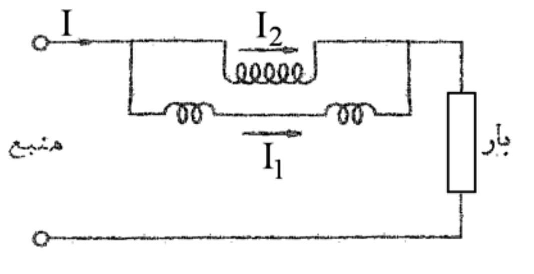
$$\Rightarrow T_d=I^2\frac{dM}{d\theta}=(50\times10^{-3})^2\times6\times10^{-3}=15\mu\cdot N\cdot m$$

مثال (۹-۲)- در یک آمپرسنج الکترودینامومتری، پیچک ساکن دارای مقاومت کل 3.0Ω و اندوکتانس کل 0.12H و پیچک متحرک با مقاومت R=30Ω و اندوکتانس L=0.003H است. اگر دستگاه در dc درجه‌بندی شده ولی در اندازه‌گیری 50Hz بکار رود و پیچکهای ساکن و متحرک مستقیماً موازی شده باشند، خطا چقدر است؟

جریان پیچک‌های ساکن در حالت dc
$$I_1=\frac{R_2}{R_1+R_2}\cdot I=\frac{10}{11}\cdot I$$

جریان پیچک متحرک در حالت dc
$$I_2=\frac{R_1}{R_1+R_2}\cdot I=\frac{1}{11}\cdot I$$

$$\theta\propto I_1I_2=KI_1I_2=0.0827KI^2$$



راکتانس پیچک ساکن در ۵۰Hz
$$X_1=2\pi\times50\times0.12=37.7\Omega$$

راکتانس پیچک متحرک در ۵۰Hz $X_2 = 2\pi \times 50 \times 0.003 = 0.9425\Omega$

در ac:

$Z_1 = \sqrt{(3)^2 + (37.7)^2} = 37.8\Omega \qquad \alpha_1 = 85^\circ,30'$

$Z_2 \approx 30\Omega \qquad \alpha_2 = 1^\circ,48'$

$$I_1 = I\frac{Z_2\angle\alpha_2}{Z_1\angle\alpha_2 + Z_2\angle\alpha_2} = I*(0.588\angle -47^\circ,42')$$

$$I_2 = I\frac{Z_1\angle\alpha_1}{Z_1\angle\alpha_2 + Z_2\angle\alpha_2} = I*(0.743\angle -36^\circ)$$

$$\varphi = \angle I_1 - \angle I_2 = 83^\circ,42' \Rightarrow \cos\varphi = 0.1907$$

$$\theta = K_1 I_1 I_2 \cos\varphi = 0.048KI^2$$

درصد خطا = (خوانده ac − خوانده dc) / خوانده dc × ۱۰۰ = -۴۱,۹٪

مثال (۹-۳) - در یک وات‌سنج مقاومت پیچک جریان 0.03Ω و مقاومت پیچک ولتاژ 6000Ω است. الف- در صد خطا را در دو حالت مدار شکل (۶-۹) بیابید در حالیکه بار با ولتاژ 220V و ضرایب توان 0.6 و جریان 20A باشد. ب- در چه جریانی خطای دو روش اتصال یکی است؟

توان مصرفی بار $= 220 \times 20 \times 0.6 = 2640W$

در اتصال طبق شکل الف وات‌سنج اتلاف پیچک جریان را نیز اندازه می‌گیرد:

$$P_C = I^2 R_C = (20)^2 \times 0.03 = 12W$$

خطا $= \frac{12}{2640} = 0.45\%$

در اتصال طبق شکل ب اتلاف پیچک ولتاژ اضافه می‌شود:

$P_V = \frac{V^2}{R_V} = \frac{(220)^2}{6000} = 8.06W \qquad$ خطا $= 0.31\%$

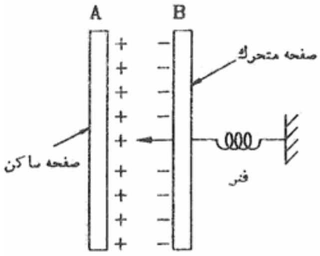
ب – برای اینکه خطا در دو نوع اتصال مساوی باشد. داریم:

$$I^2 R_C = \frac{V^2}{R_V} \Rightarrow I^2 = \frac{(220)^2}{6000 \times 0.03} = \frac{(220)^2}{180} \Rightarrow I \approx \frac{220}{13.5} \approx 16.5A$$

فصل دهم – دستگاه الکترواستاتیکی

۱-۱۰) معرفی

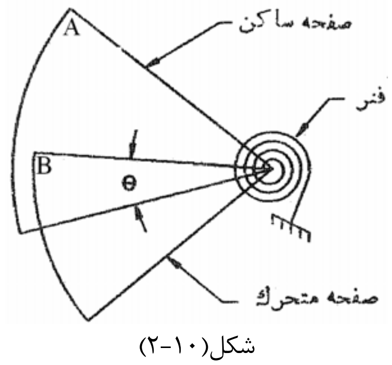
در این دستگاه گشتاور انحراف دهنده ناشی از نیروهـای کـولنی اسـت. قـسمت اصـلی دسـتگاه از دو جوشـن تشکیل می‌شود که یکی ثابت و دیگری متحرک است. هنگامیکه جوشنها با بارهای مخالف یـا همنـام الکتریکـی شـارژ شوند، بین آنها نیروی جاذبه یا دافعه ایجاد می‌شود و باعث می‌گردد که جوشن متحرک از وضـعیت تعـادل جـا بـه جـا کند. در واقع جوشن متحرک دستگاه تمایل دارد به وضعی برسد که در آن انرژی ذخیره شده در خازن معادل دسـتگاه بیشینه گردد. این دستگاه در اصل ولت‌سنج است (چرا؟) ولی به کمک عناصر خارجی مـی‌توانـد جریـان و تـوان را نیـز اندازه بگیرد. مهمترین کاربرد این دستگاه در اندازه‌گیری آزمایشگاهی ولتاژهای بالا است.



شکل (۱-۱۰) اساس کار دستگاه

۲-۱۰) معادله گشتاور

در شکل (۲-۱۰) صفحه A ساکن و صفحه B متحرک است. دو صفحه بـار مخـالف دارنـد و فنـری وصـل بـه صفحه B مانع چرخش آن است. فرض کنید بین دو صفحه اختلاف پتانسیل V اعمال شده است. در یک حالـت تعـادل معین اگر ظرفیت بین دو صفحه C فرض شود. انرژی ذخیره شده $\frac{1}{2}CV^2$ ژول است.



شکل(۲-۱۰)

حال فرض کنیم ولتاژ اعمالی بـه انـدازه dv افـزایش یابـد. در نتیجـه صـفحه B بـه انـدازه $d\theta$ بـه سـمت A می‌چرخد. در اثر افزایش ولتاژ یک جریان خازنی از مدار کشیده می‌شود که عبارتست از:

$$i=\frac{dq}{dt}=\frac{d}{dt}(CV)=C\frac{dV}{dt}+V\frac{dC}{dt} \qquad (۱-۱۰)$$

انرژی ورودی به سیستم عبارتست از:

$$Vidt = V^2dC + CVdV \qquad (۱۰-۲)$$

$$\text{تغییر انرژی ذخیره شده} = \frac{1}{2}(C+dC)(V+dV)^2 - \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}V^2dC + C\cdot V\cdot dV \qquad (۱۰-۳)$$

(در خلاصه‌سازی رابطه (۱۰-۳) از جملات کوچک با درجه بالا صرفنظر شده است)

بنابر اصل بقای انرژی داریم:

(۱۰-۴) افزایش انرژی ذخیره شده – انرژی الکتریکی ورودی = کار مکانیکی انجام شده

یعنی:

$$T_d \cdot d\theta = \left(V^2dC + CVdV\right) - \left(\frac{1}{2}V^2dC + CVdV\right) = \frac{1}{2}V^2dV \qquad (۱۰-۵)$$

بنابراین:

$$T_d = \frac{1}{2}V^2\frac{dC}{d\theta} \qquad (۱۰-۶)$$

و حال اگر گشتاور کنترل ناشی از فنر را $T_c = K\theta$ را بدانیم در حالت تعادل که $K\theta = T_d$ خواهد شد. داریم:

$$\theta = \frac{1}{2}\cdot\frac{V^2}{K}\cdot\frac{dC}{d\theta} \qquad (۱۰-۷)$$

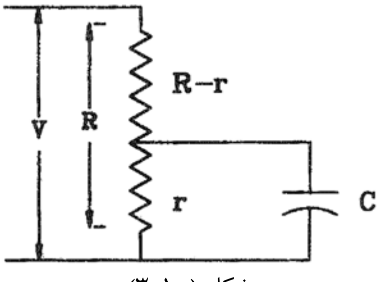
با دقت در رابطه (۱۰-۷) و (۱۰-۶) می‌توان دریافت که چرا این دستگاه را یک ولت‌سنج واقعی می‌دانیم (سئوال: برای تبدیل این دستگاه به یک آمپرسنج چه پیشنهادی دارید؟). متناسب بودن گشتاور با مجذور ولتاژ باعث می‌شود که دستگاه در ac و dc قابل استفاده باشد. در ac مقدار موثر ولتاژ مستقل از فرکانس و شکل موج نمایش داده می‌شود.

۱۰-۳) توسعه محدوده سنجش در ولت‌سنج الکتروستاتیکی

۱۰-۳-۱) مقسم ولتاژ مقاومتی

آرایش این مقسم مطابق شکل (۱۰-۳) است. ولتاژ اندازه‌گیری شونده V، مستقیماً به دو سر کل مقاومت R اعمال می‌شود و ولت‌سنج الکتروستاتیکی با مقاومت C به دو سر r وصل می‌گردد. برای عملکرد dc به فرض اینکه خازن ولت‌سنج دارای مقاومت نشتی بینهایت باشد ضریب ضرب‌کنندگی مقسم ولتاژ، m، مساوی R/r خواهد بود.

در حالت ac، راکتانس خازن به صورت موازی با r قرار می‌گیرد و امپدانس مجموعه C و r عبارتست از:



شکل (۱۰-۳)

$$Z = \frac{r\left(\frac{1}{j\omega C}\right)}{r + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{r}{1 + j\omega Cr} \qquad (۱۰-۸)$$

بنابراین، کل امپدانسی که ولتاژ V می‌بینید برابر است با:

$$Z_i = (R-r) + \left(\frac{r}{1+j\omega Cr}\right) = \frac{R+j\omega Cr(R-r)}{1+j\omega Cr} \qquad (۹-۱۰)$$

پس داریم:

$$\frac{Z_i}{Z} = \frac{R}{r} + j\omega C(R-r) \qquad (۱۰-۱۰)$$

و اگر m را قدر مطلق نسبت $\frac{Z_i}{Z}$ بگیریم، خواهیم داشت:

$$m = \left|\frac{Z_i}{Z}\right| = \frac{R}{r}\sqrt{1+\frac{\omega^2 C^2 r^2}{R^2}(R-r)^2} \qquad (۱۱-۱۰)$$

اگر $r \langle\langle R$ و $\omega^2 r^2 C^2 \langle\langle 1$ باشد، داریم:

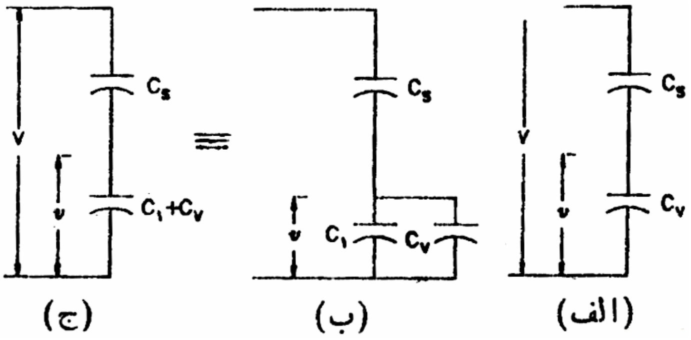
$$m \approx \frac{R}{r} \qquad (۱۲-۱۰)$$

با این شرایط کارکرد دستگاه در ac بدون خطا خواهد بود.بدیهی است شرط بزرگ بودن R نسبت به r در ولتاژهای بالا که توان مصرفی دستگاه V^2/r است، ایجاد محدودیت می‌کند و به همین دلیل استفاده از مقسم‌های مقاومتی به سنجش ولتاژهای درحد چند KV محدود می‌شود.

نکته قابل ذکر دیگر این است که مقاومت R باید غیر القایی ساخته شود.

۱۰-۳-۲) مقسم ولتاژ خازنی

گسترش محدوده ولتاژ ولت‌سنج الکتروستاتیکی به کمک خازن سری مناسب متوالی در شکل (۱۰-۴-الف) ارائه شده است.



شکل (۱۰-۴)

در این شکل C_v ظرفیت ولت‌سنج و C_s ظرفیت سری با آن است. امپدانس ولت‌سنج عبارت است از:

$$Z_V = \frac{1}{j\omega C_V} \qquad (۱۳-۱۰)$$

و امپدانس کل مجموعه:

$$Z_i = Z_v + Z_s \Rightarrow Z_i = \frac{1}{j\omega C_S} + \frac{1}{j\omega C_V} = \frac{C_S + C_V}{j\omega C_S C_V} \qquad (۱۴-۱۰)$$

پس:

$$\frac{Z_i}{Z_V} = \frac{C_V + C_S}{C_S} \qquad (۱۵-۱۰)$$

در نتیجه m عبارتست از:

$$m = \frac{V}{v} = \frac{Z_i}{Z_v} = 1 + \frac{C_v}{C_s} \qquad (۱۶-۱۰)$$

ظرفیت ولت‌سنج همراه با میزان انحراف تغییر می‌کند. بنابراین، ولت‌سنج الکتروستاتیکی باید همراه با خازن سری خود کالیبره شود. در عمل C_s یک رشته خازن متوالی است که موازی با ولتاژ تحت اندازه‌گیری بسته می‌شوند و ولت‌سنج مطابق شکل (۱۰-۳- ب) با یکی از آنها موازی می‌شود. در این حالت: (شکل ۱۰-۳- ج)

$$m = 1 + \frac{C_1 + C_v}{C_s} \quad (۱۰-۱۷)$$

مزیت این کار اینست که معمولاً C_1 نسبت به C_v به اندازه‌ای بزرگ انتخاب می‌شود که تغییرات C_v در اثر جابجایی صفحه متحرک تاثیر زیادی در بر جمع $C_1 + C_V$ نمی‌گذارد و بنابراین m تقریباً ثابت می‌ماند..

۱۰-۴) ویژگیهای دستگاه الکتروستاتیکی

- قابلیت کاربرد در ac و dc با توجه به رابطه (۱۰-۷) θ با مقدار موثر ولتاژ متناوب، متناسب است.

- مقیاس: با توجه به اینکه θ با توان دوم V ارتباط دارد لذا مقیاس یکنواخت نخواهد بود. در اسبابهای نوع جذبی سعی می‌شود در محدوده حرکت عقربه طراحی به گونه‌ای باشد که $\frac{dC}{d\theta} \propto \frac{1}{V}$ در آن صورت:

$$\theta \propto \left(V^2 \times \frac{1}{V} \right) \propto V \quad (۱۰-۱۸)$$

و بنابراین مقیاس خطی بدست می‌آید. در عمل در قسمت پایین که V کوچک است نمی‌توان اینکار را انجام داد. لذا همیشه مقیاس نزدیک صفر فشرده خواهد بود.

- جریان دستگاه: جریان دستگاه در حالت dc فقط جهت باردارکردن جوشنها است و بسرعت میرا می‌شود. پس از آن از مقاومت عایقی بین دو جوشن (حدوداً 10^{12} تا 10^{19} اهم) جریان بسیار کوچکی می‌گذرد. بنابراین، در حالت dc دستگاه واقعاً به حد یک ولتمتر ایده‌آل می‌رسد.

در حالت ac جریان به ظرفیت دستگاه (C) و فرکانس ولتاژ تحت اندازه‌گیری بستگی دارد. جریان با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد، چون راکتانس خازن $X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$ است.

- نیروهای عمل‌کننده: چگالی انرژی در میدانهای الکتریکی در مقایسه با چگالی انرژی در میدانهای مغناطیسی خیلی کوچک است (مثلاً $4.4\ j/m^3$ در مقایسه با $15 \times 10^3\ j/m^3$). لذا نیروهای عمل‌کننده در دستگاه الکتروستاتیکی در مقایسه با اسبابهای الکترومغناطیسی و دیگر اسبابهایی که با کشیدن جریان کار می‌کنند، خیلی کم است.

- افزایش نیروهای عمل‌کننده: با افزایش ظرفیت دستگاه $\left(C = \frac{\varepsilon A}{d} \right)$ نیروهای عمل‌کننده دستگاه تقویت می‌شوند. برای افزایش C، تغییر ε (استفاده از عایق با ε_r بالا)، افزایش A (سطح صفحات) و کاهش d (فاصله بین جوشنها) امکان‌پذیر است.

- اضافه ولتاژ: اعمال ولتاژ بالاتر از تحمل دستگاه باعث ایجاد جرقه بین جوشنها می‌شود که باعث می‌شود دستگاه و منبع ولتاژ آسیب ببینند. در عمل با سری کردن یک مقاومت کربنی بزرگ با دستگاه، جریان اتصالی محدود می‌شود. راه دیگر استفاده از دو الکترود کمکی است که جرقه در بین آنها سریعتر از جوشنها برقرار می شود.

- استحکام و حساسیت: به جای یاتاقان و فنر کنترل، در دستگاههای آزمایشگاهی از نوار پیچشی استفاده می‌شود. لذا حساسیت افزایش و استحکام کاهش می یابد.

- تخلیه سطحی: برای جلوگیری از تخلیه بارها از سطح جوشنها، لبه‌ها را گرد می‌سازند. همچنین از گاز فشرده یا روغن عایق در بین دو جوشن استفاده می‌شود.

- حد فرکانسی دستگاه در حالت تئوری نا محدود است. اما در عمل به حدود ۱۰۰KHz محدود می‌گردد.

- خطا: تغییر دما و فرکانس بر کار دستگاه بی تاثیر است و همچنین دستگاه تحت تاثیر میدانهای پراکنده مغناطیسی قرار نمی‌گیرد. ولی برای جلوگیری از تاثیر میدانهای الکتریکی پراکنده باید دارای پوشش باشد. خطای ناشی از بارگذاری دستگاه به ویژه در حالت dc بسیار کم و قابل صرفنظر است.

۱۰-۵) مزایا و معایب

۱۰-۵-۱) مزایا

- توان مصرفی ناچیز
- کاربرد در ac و dc
- عدم ایجاد خطای ناشی از تغییر فرکانس و تغییر شکل موج
- عدم ایجاد خطا ناشی از میدانهای پراکنده مغناطیسی
- مناسب بودن برای ولتاژهای بالا

۱۰-۵-۲) معایب

- گران بودن
- حجیم بودن
- غیر مستحکم بودن
- نیروی عمل کننده ضعیف
- مقیاس غیرخطی

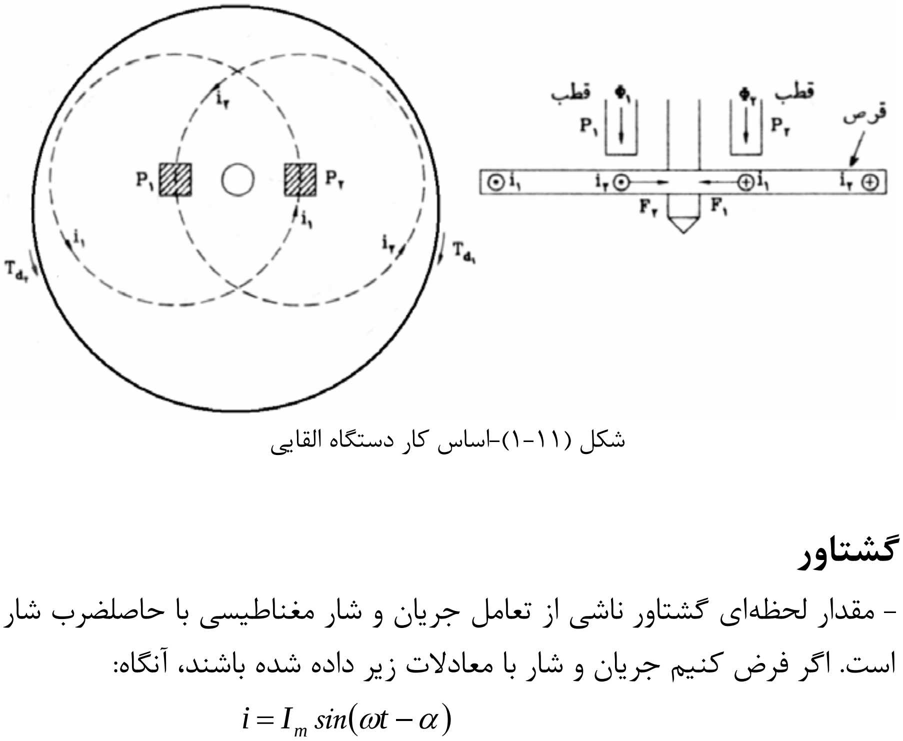
فصل یازدهم – دستگاه القایی و انرژی‌سنجی

۱-۱۱) معرفی

دستگاه القایی بر اساس القای مغناطیسی کار می‌کند. در این دستگاه دو پیچک وجود دارد کـه در ا ثـر عبـور جریان از آنها، میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. در واقع، جریانهای گذرنده از پیچکهای دستگاه، دو شار پدید می‌آورنـد. این شارها متناوب‌اند و در یک قرص یا استوانه فلزی نیروی محرک الکتریکی (emf) تولیـد مـی کننـد. ایـن نیروهـای محرکه به نوبه خود در این فلز، جریانهای گردابی بوجود می‌آورند. بین شار اول و جریان گردابی شار دوم یک گشتاور و بین شار دوم و جریان گردابی ناشی از شار اول یک گشتاور دیگر بوجود می‌آید.

* گشتاور کل، برآیند مجموع این دو گشتاور است، و باعث چرخش قرص یا استوانه می‌شود.

این دستگاهها تنها برای اندازه‌گیری ac مناسبند و بـه دلیـل عیبهـای عمـده‌ای کـه دارنـد اصـولاً بـه عنـوان ولت‌سنج و آمپرسنج بکار نمی‌روند. از این دستگاهها عمدتاً در انرژی‌سنجی استفاده می‌شود. (کنتور برق)



شکل (۱۱-۱)-اساس کار دستگاه القایی

۲-۱۱) معادله گشتاور

یادآوری - مقدار لحظه‌ای گشتاور ناشی از تعامل جریان و شار مغناطیسی با حاصلضرب شار لحظه‌ای و جریان لحظه‌ای متناسب است. اگر فرض کنیم جریان و شار با معادلات زیر داده شده باشند، آنگاه:

$$\varphi = \phi_m \sin \omega t \qquad i = I_m \sin(\omega t - \alpha)$$

$$T_d \propto \varphi \cdot i$$

و در یک دوره تناوب T می‌توان گشتاور متوسط را بدست آورد.

$$T_{d_{av}} \propto \phi_m \cdot I_m \cos \alpha$$

حال اگر فرض کنیم جریانهای هم‌فرکانس i_a و i_b با دامنه‌های I_a و I_b و اختلاف فاز β از پیچک‌های دستگاه عبور می‌کنند، شارهای φ_1 و φ_2 بادامنه‌های ϕ_{m_1} و ϕ_{m_2} و اختلاف فاز β در اثر عبور این جریانها، برقرار می‌شود:

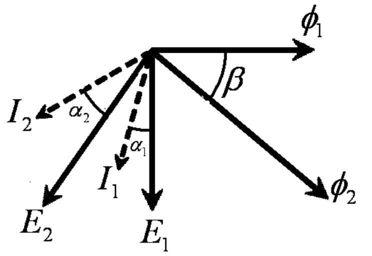
$$\varphi_1 = \phi_{m_1} \sin \omega t, \qquad \varphi_2 = \phi_{m_2} sin(\omega t - \beta) \qquad (۱-۱۱)$$

شار φ_1 یک نیروی محرکه الکتریکی در قرص القا می‌کند که مقدار موثر آن متناسب با مقدار ϕ_1 و فرکانس (ω یا f) است: (ϕ_1 مقدار موثر شار φ_1 است.)

$$E_1 \propto f\phi_1 \qquad (۲-۱۱)$$

این نیروی محرکه باعث ایجاد یک جریان گردابی در قرص یا استوانه با مقدار موثر I_1 می‌شود. اگر امپدانس مسیر جریان گردابی، Z باشد:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z} \propto \frac{f}{Z}\phi_1 \qquad (۳-۱۱)$$



شکل (۱۱-۲)- نمودار فازوری دستگاه القایی

گشتاور متوسط حاصل از اثر φ_2 بر I_1 عبارت است از:

$$T_{d_1} = K_1 \cdot \phi_2 \cdot I_1 \cdot cos(90 - \beta + \alpha_1) \qquad (۴-۱۱)$$

که در آن α_1 اختلاف فاز E_1 و I_1 (زاویه امپدانس) و β زاویه بین φ_1 و φ_2 است

همچنین گشتاور متوسط حاصل از اثر ϕ_1 بر I_2 عبارت است:

$$T_{d_2} = K_2 \cdot \phi_1 \cdot I_2 \cdot cos(90 + \beta + \alpha_2) \qquad (۵-۱۱)$$

اگر Z برای هر دو جریان گردابی یکسان باشد $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$ خواهد شد.

با مفروضات مسئله (به شکل (۱۱-۱) مراجعه کنید)، دو گشتاور T_{d_1} و T_{d_2} در جهت مخالفند و بنابراین گشتاور کل از تفاضل این دو بدست می‌آید:

$$T_d = T_{d_1} - T_{d_2} = K \cdot \phi_1 \cdot \phi_2 \frac{f}{Z} sin\beta \, cos\alpha \qquad (۶-۱۱)$$

این معادله کلی گشتاور در دستگاههای القایی است و چند ویژگی را نشان می‌دهد.

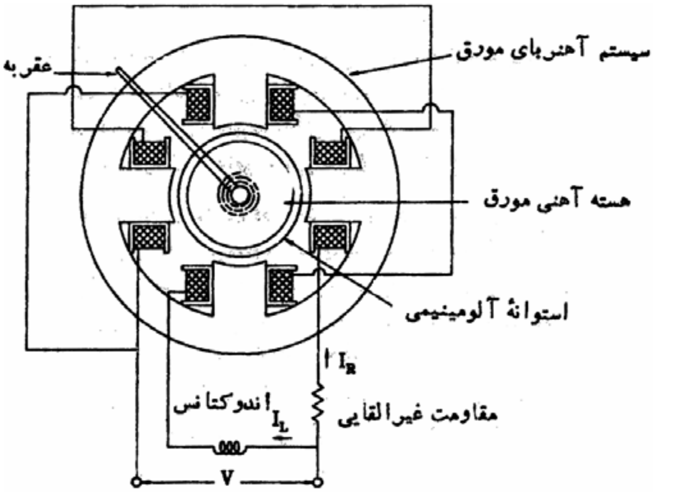
* گشتاور با $\cos\alpha$ نسبت مستقیم دارد. یعنی برای هر چه بزرگتر بودن گشتاور بایستی مسیر جریان گردابی شدیداً مقاومتی باشد. ($\alpha = 0$)
* گشتاور با $\sin\beta$ نسبت مستقیم دارد. یعنی برای هر چه بزرگتر شدن گشتاور می بایست زاویه بین دو شار تا حد امکان به 90° نزدیک باشد

۱۱-۳) انواع دستگاههای القایی

۱۱-۳-۱) نوع فراریس

در این نوع دستگاه، هر دو سیم‌پیچ روی یک هسته آهنی (استاتور) پیچیده می‌شوند. یکی از سیم‌پیچها با یک پیچک میراکننده و دیگری با یک مقاومت بزرگ سری است. در نتیجه سیم‌پیچ اول شدیداً سلفی و دومی شدیداً مقاومتی می‌شود. هر دو سیم‌پیچ از یک منبع تغذیه می‌شوند و طبق شکل (۱۱-۳) موازی‌اند. بنابراین بین جریانهای

آنها حدود 90° اختلاف فاز پیش خواهد آمد. اگر از اتلاف مسیر آهنی صرفنظر کنیم شارهای ناشی از این جریان‌ها هم 90° اختلاف فاز دارند. میدان چرخان حاصل از پیچکهای استاتور در استوانه آلومینیومی روتور جریان گردابی القا می‌کند و در نتیجه گشتاور تولید می‌شود. استوانه سعی می‌کند چرخش میدان را دنبال کند. اگر استوانه آزادی چرخش داشته باشد با سرعتی نزدیک ولی کمتر از سرعت چرخش میدان می‌گردد. برای جلوگیری از چرخش و کنترل حرکت، یک فنر در ایجا نیز لازم است که چرخش را به کمتر از 360° محدود نماید. زاویه انحراف را گشتاور محرک (انحراف دهنده) و گشتاور فنر (کنترل) تعیین می‌کنند. میرایی حرکت توسط یک قرص آلومینیومی که در میدان یک آهنربای دائم حرکت می‌کند، پدید می‌آید.



شکل (۱۱-۳)-دستگاه القایی نوع فراریس

بدیهی است که در این دستگاه $\phi_R \propto I_R$ و $\phi_L \propto I_L$ و I_R و I_L در آمپرسنج، با جریان اندازه گرفتنی I و در ولت‌سنج با ولتاژ اندازه گرفتنی V متناسبند پس:

$$T_d = K_a \cdot I^2 \frac{f}{Z} sin\beta cos\alpha \quad \text{در آمپرسنج} \qquad (۷-۱۱)$$

$$T_d = K_v \cdot V^2 \frac{f}{Z} sin\beta cos\alpha \quad \text{در ولت‌سنج} \qquad (۸-۱۱)$$

بنابراین، در حالت تعادل که $T_d = T_c = K\theta$ باشد، داریم:

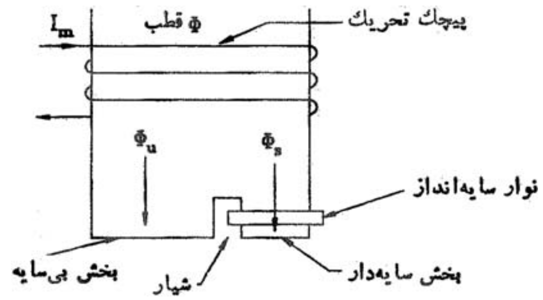
$$\theta = \frac{K_a}{K} I^2 \frac{f}{Z} sin\beta cos\alpha \qquad (۹-۱۱)$$

که $\frac{K_a}{K}$ عدد ثابتی است.

۱۱-۳-۲) نوع قطب سایه‌دار

این دستگاه یک آهنربای الکتریکی با هسته مورق دارد که در وسط قطب آن یک شیار باریک تعبیه شده است. پیچک اصلی روی قطب قرار دارد و یک پیچک فرعی با تعداد دور کم و قطر زیاد (یک نوار مسی) شیار قطب را پر کرده است (شکل ۱۱-۲).

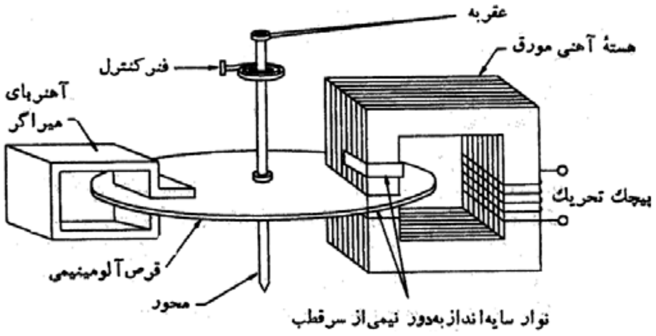
هنگامی که از پیچک تحریک جریان متفاوت بگذرد، شار متناوب تولید می‌شود. این شار در پیچک فرعی ولتاژ القا می‌کند و مسیر کوتاهی که کاملاً سلفی است برای ایجاد جریان فراهم است. عبور این جریان باعث ایجاد شار جدیدی در قسمت سایه‌دار قطب می‌گردد که با شار اول حدود 90° اختلاف فاز دارد.



شکل (۱۱-۴)-قطب سایه‌دار

یک نمونه کاربردی دستگاه القایی با قطب سایه‌دار در شکل (۱۱-۵) دیده می‌شود. پیچک تحریک روی قطب آهنربای الکتریکی قرار دارد و جریانی متناسب با ولتاژ یا جریان تحت اندازه‌گیری از آن می‌گذرد.

سیستم متحرک یک قرص مسی یا آلومینیمی است که در شکاف هوایی آهنربای الکتریکی حرکت می‌کند. قرص روی محور سوار است و گشتاور کنترل توسط فنر تامین می‌گردد. یک آهنربای میراکننده نیز روبروی آهنربای الکتریکی قرار دارد. بنابراین گشتاور انحراف دهنده و میراکننده هر دو به کمک قرص هادی ایجاد می‌شوند.



شکل (۱۱-۵)-دستگاه القایی با قطب سایه‌دار

در این دستگاه اختلاف فاز بین دو شار حدود 40° تا 50° است.

می‌توان دید که در این دستگاه نیز نهایتاً:

$$T_d = K_1 I^2 \frac{f}{Z} \sin\beta \cos\alpha \qquad (۱۱-۱۰)$$

و در حالت تعادل نهایی:

$$\theta = K_2 I^2 \frac{f}{Z} \sin\beta \cos\alpha \qquad (۱۱-۱۱)$$

بنابراین این دستگاه نیز یک موثرسنج ولتاژ و یا جریان است و چون θ متناسب با توان دوم جریان است بنابراین مقیاس خطی نمی‌باشد.

۱۱-۴) مزایا و معایب

۱۱-۴-۱) مزایا

- مقیاس وسیع و باز بدست می‌آید. (حدود °۳۰۰ در عمل)
- میرایی اسباب مناسب است.
- اثر میدانهای مغناطیسی پراکنده روی آن کم است.

۱۱-۴-۲) معایب

- توان مصرفی نسبتاً بالا

- قیمت زیاد است
- انحرافهای زیاد خاصیت فنر را کم می‌کند
- خطاهای ناشی از فرکانس و دما زیاد است (چرا؟).
- تنها در ac کاربرد دارد.
- مقیاس خطی نیست.

مثال (۱۱-۱)– یک اسباب القایی با قطب سایه‌دار و جبران نشده برای 50Hz کالیبره شده است. انحراف اسباب به ازای جریان 10A، 150° است. نسبت R به L مسیر جریانهای گردابی در قرص 1500 است. انحراف دستگاه هنگام اندازه‌گیری جریان 10A با فرکانس 100Hz چقدر است.

حل: $R/L = 1500$ پس اگر فرض کنیم $L = nH$

$X_1 = 2\pi \times 50 \times n = (314n) \quad \Omega$ راکتانس در 50Hz

$R_1 = (1500n) \quad \Omega$ مقاومت مسیر جریانهای گردابی

$Z_1 = \sqrt{(1500n)^2 + (314n)^2} = (1532.4n) \quad \Omega$ امپدانس مسیر جریانهای گردابی در 50Hz

$$cos\alpha_1 = \frac{R_1}{Z_1} = 0.978$$

$X_2 = 2\pi \times 100 \times n = (628n) \quad \Omega$ راکتانس در 100Hz

$$R_2 = (1500n) \quad \Omega$$

$$Z_2 = \sqrt{(1500n)^2 + (628n)^2} = (1626.1n) \quad \Omega$$

$$cos\alpha_2 = \frac{R_2}{Z_2} = 0.922$$

در مورد انحراف داریم:

$$\theta = K_2 I^2 \, f/Z \, sin\beta \, cos\alpha$$

$$\theta_1 = K_2 I^2 \, f_1/Z_1 \, sin\beta \, cos\alpha_1$$

$$\theta_2 = K_2 I^2 \, f_2/Z_2 \, sin\beta \, cos\alpha_2$$

$$\frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{Z_1 f_2 \, cos\alpha_2}{Z_2 f_1 \, cos\alpha_1} \Rightarrow \theta_2 = \theta_1 \times \frac{Z_1 f_2 \, cos\alpha_2}{Z_2 f_1 \, cos\alpha_1} = 150 \times \frac{1532.4}{1626.1} \times \frac{100}{50} \times \frac{0.922}{0.978}$$

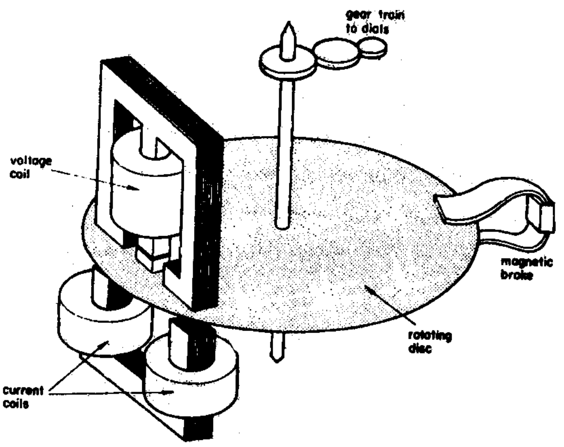
$$\Rightarrow \theta_2 = 266.5^\circ$$

$$\text{خطا} = \frac{266.5 - 150}{150} \times 100 = 77.7\,\%$$

۱۱-۵) سنجش انرژی بوسیله دستگاه القایی

سنجش انرژی در مدارهای خانگی و صنعتی ac معمولاً توسط دستگاههای القایی انجام می‌گیرد. واحد سنجش انرژی وات ساعت یا کیلو وات ساعت است (انرژی= توان× زمان). این دستگاه ۴ قسمت اصلی دارد:

۱- سیستم محرک ۲- سیستم متحرک ۳- سیستم ترمز ۴- سیستم ثبت کننده



شکل (۱۱-۶)

۱۱-۵-۱) سیستم محرک

سیستم محرک این دستگاه شامل دو آهنربای الکتریکی است که دارای هسته آلیاژی فولاد است. پیچک یکی از آهنرباها توسط جریان بار تغذیه می‌شود پیچک دوم دو به سر منبع وصل می شود و بنابراین جریانی متناسب با ولتاژ تغذیه از آن می گذرد. پیچک جریان از دو قسمت یکسان تشکیل می‌شود. پیچک ولتاژ بر روی بازوی میانی هسته آهنی قرار گرفته است. این قسمت از هسته دارای شیار بوده و با روش قطب شکافدار شاری تولید می‌کند که نسبت به ولتاژ اعمال شده 90° اختلاف فاز دارد.

۱۱-۵-۲) سیستم متحرک

قسمت اصلی سیستم متحرک یک قرص آلومینیومی با محور فولادی است کـه در شکاف هوایی هسته‌های آهنی پیچکهای جریان و ولتاژ قرار دارد.

۱۱-۵-۳) سیستم ترمز

آهنربای دائمی که نزدیک لبه دیسک قرار گرفته است، سیستم ترمز را تشکیل می‌دهد. وضعیت این آهنربای دائمی قابل تنظیم است و بنابراین با تغییر محل قرارگیری آن می‌توان گشتاور ترمزی را تنظیم کرد. ترمز بدین ترتیب ایجاد می‌شود که نیروی محرکه ایجاد شده در دیسک ناشی از شار آهنربای دائم با سرعت دیسک متناسب است. این ولتاژ یک جریان گردابی در دیسک تولید می‌کند. هر چه جریان گردابی بزرگتر باشد، نیروی مقاوم بزرگتری در مقابل حرکت دیسک ایجاد می‌نماید. پس هنگامی که گشتاور ترمزی با گشتاور محرک یکسان باشد، سرعت ثابتی بدست می‌آید.

روش کارکرد این سیستم از رابطه اصلی دستگاه القایی نتیجه می‌شود:

$$T_d = K \cdot \phi_1 \cdot \phi_2 \frac{f}{Z} \sin\beta \cos\alpha$$

αامپدانس مسیر جریان گردابی و β زاویه بین ϕ_1 و ϕ_2 است. باید توجه داشت که ϕ_1 ناشی از ولتاژ و ϕ_2 ناشی از جریان است. ϕ_2معمولاً با جریان همفاز است و حالت بهینه این است که ϕ_1 نیز با ولتاژ 90° اختلاف فاز داشته باشد. در اینصورت اگر اختلاف فاز جریان و ولتاژ φ باشد اختلاف فاز بین ϕ_1 و ϕ_2، $\pi/2 - \varphi$ خواهد بود. یعنی $\beta = \pi/2 - \varphi$ است.

$$T_d = K_2 \cdot V \cdot I \frac{f}{Z} sin\left(\pi/_2 - \varphi\right) cos\,\alpha = K_2 \cdot V \cdot I \frac{f}{Z} cos\,\varphi\, cos\,\alpha \qquad (۱۲-۱۱)$$

در حالت سرعت مانا داریم $T_B = T_d$ و چون $T_B = K_4 N$ داریم:

$$\Rightarrow N = KVI\, cos\,\varphi \qquad (۱۳-۱۱)$$

(N سرعت چرخش دیسک –مثلاً برحسب دور در دقیقه- است)

یعنی سرعت چرخش تابعی است از $V \cdot I \cos\varphi$. به عبارت بهتر، سرعت چرخش در دیسک با توان مصرفی بار نسبت مستقیم و خطی دارد.

۱۱-۵-۴)سیستم ثبت (شمارش)

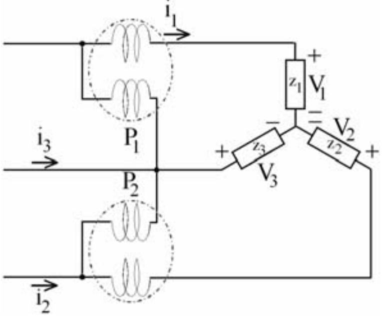
سیستم ثبت یا شمارش همواره عددی متناسب با تعداد چرخش قسمت متحرک را ثبت می‌کند یا نمایش می‌دهد. معمولاً از چرخ دنده‌های کاهنده جهت ارتباط بین صفحه شمارش و محور اصلی استفاده می‌شود.

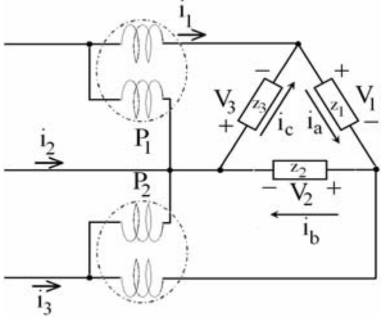
برای توضیح اینکه دستگاه چگونه انرژی مصرفی را نشان می‌دهد. تصور کنید یک نشان دهنده به بار n واتی وصل است و دستگاه مشابه دیگری به بار ۲n واتی وصل شده است. بدیهی است سرعت چرخش کنتور بار ۲n واتی بیشتر است و بنابراین در یک واحد زمانی معین، قسمت متحرک دور بیشتری می‌زند و عدد بزرگتری را ثبت می‌کند.

۱۱-۶) سنجش توان و انرژی سه فاز ac

بدیهی‌ترین راه سنجش توان و بالطبع انرژی در مدار سه‌فازه یا چند فازه، استفاده از چند دستگاه انرژی‌سنج تکفاز است. اما در سیستم سه‌فاز که معمولترین سیستم صنعتی است، جهت صرفه‌جویی در هزینه دستگاه اندازه‌گیری از دو دستگاه استفاده می‌شود. بطور کلی در هر سیستم nسیمه تعداد n-1 عنصر اندازه‌گیری انرژی لازم است.

در شکل ۱۱-۷ نمایش ساده یک مدار سه‌سیمه سه‌فاز با بارهای ستاره و یا مثلث نشان داده شده است.





شکل (۱۱-۷)

در اتصال ستاره:

$$P_1 = i_1(V_1 - V_3) \qquad P_1 \text{ خوانده وات‌سنج} \qquad (۱۴-۱۱)$$

$$P_2 = i_2(V_2 - V_3) \qquad P_2 \text{ خوانده وات‌سنج} \qquad (۱۵-۱۱)$$

جمع خوانده‌های دو وات‌سنج $\Rightarrow P_1 + P_2 = V_1 i_1 + V_2 i_2 + V_3 i_3$ (۱۶-۱۱)

پس جمع خوانده‌های دو وات‌سنج مساوی توان مصرفی بار است و متعادل نبودن بار سه‌فاز در آن اثری ندارد.

در اتصال مثلث نیز می‌توان نشان داد که همین رابطه برقرار است. یعنی:

$$P_1 + P_2 = V_1 i_a + V_2 i_b + V_3 i_c \qquad (۱۷-۱۱)$$

فصل دوازدهم – پلهای اندازه‌گیری

۱۲-۱) معرفی

پلهای اندازه‌گیری اساساً از چهار بازو، یک منبع تغذیه و یک آشکارساز تعادل تشکیل می‌شوند. در سیستمهای اندازه‌گیری به دو صورت از پل استفاده می‌شود. یکی پل تعادلی و دیگری پل انحرافی. در پل تعادلی اندازه‌گیری پارامترهای مختلف مداری همچون مقاومت و امپدانس، ظرفیت و خود القائی، و فرکانس امکان‌پذیر است. روش کار در این پل‌ها به این ترتیب است که در حالت تعادل پل، توسط روابطی که بین عناصر مدار حاکم می‌شود، عنصر مجهول محاسبه می‌گردد.

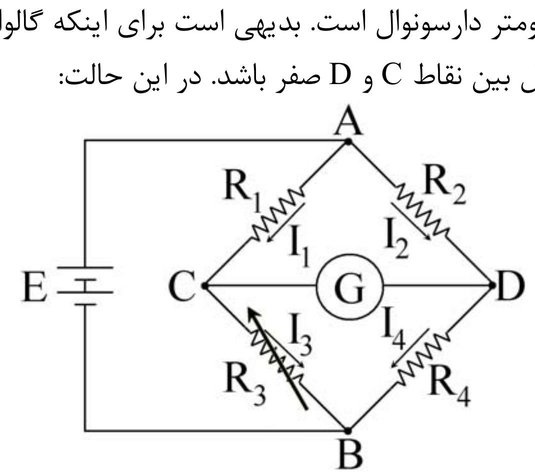
در پل انحرافی روابط موجود بین ولتاژ خروجی پل و تغییر عناصر پل مورد بررسی قرار می‌گیرند. در مقایسه، دقت اندازه‌گیری در پلهای تعادلی بسیار بیش از پلهای انحرافی و همچنین مستقل از درستی آشکارساز است. از سوی دیگر استفاده از پلهای انحرافی ساده‌تر و سریعتر از پلهای تعادلی است. از پلهای انحرافی برای تبدیل خروجی یک مبدل به ولتاژ الکتریکی استفاده می‌شود.

۱۲-۲) پلهای تعادلی

پلهای تعادلی بسته به منبع تغذیه اندازه‌گیری به دو دسته dc و ac تقسیم می‌شوند. در واقع برای اندازه‌گیری مقاومت وجود منبع تغذیه ac یا dc تفاوتی نخواهد داشت اما برای اندازه‌گیری امپدانس حتماً باید منبع ac باشد. هنگامیکه قرائت دستگاه آشکارساز صفر باشد. پل به تعادل رسیده است.

۱۲-۲-۱) پل وتستون

پل وتستون ساده‌ترین پل dc است که برای سنجش دقیق یک مقاومت مجهول بکار می‌رود (شکل ۱۲-۱). در این پل آشکارساز معمولاً یک گالوانومتر دارسونوال است. بدیهی است برای اینکه گالوانومتر جریانی را نشان ندهد و پل در تعادل باشد، باید اختلاف پتانسیل بین نقاط C و D صفر باشد. در این حالت:



شکل (۱۲-۱) پل وتستون

$$R_1 I_1 = R_2 I_2 , I_1 = I_3 , I_2 = I_4 \qquad \Rightarrow R_1\left(\frac{E}{R_1+R_3}\right)=R_2\left(\frac{E}{R_2+R_4}\right) \qquad (۱-۱۲)$$

$$\Rightarrow \frac{R_1}{R_1+R_3}=\frac{R_2}{R_2+R_4} \qquad (۲-۱۲) \qquad \Rightarrow R_1R_4=R_2R_3 \qquad (۳-۱۲)$$

یعنی نتیجه بدست آمده مستقل از مقاومت داخلی پیل (E) است.

معمولاً R_x در محل R_4 قرار می‌گیرد و با تغییر یک یا تعداد بیشتری از مقاومتهای R_1 تا R_3 سعی می‌شود. پل به حالت تعادل برسد. در اینحالت با معلوم بودن R_1 و R_2 و R_3، می‌توان R_x را محاسبه نمود. در این مدار، گالوانومتر باید از حساسیت زیاد برای نشان دادن نقطه صفر برخوردار باشد. پل وتستون برای اندازه‌گیری دقیق مقاومتها از یک اهم تا چند مگا اهم بکار می‌رود.

۱۲-۲-۲) خطاهای پل وتستون

- منبع اصلی خطا، مقادیر مقاومتهای معلوم R_1، R_2 و R_3 می‌باشد
- حساسیت پائین آشکارساز حالت تعادل
- تغییر مقادیر مقاومتهای معلوم و مجهول به واسطه تلفات حرارتی RI^2 به خصوص در اندازه‌گیری مقاومتهای کوچک
- مقاومت سیمهای رابط و اتصالات

۱۲-۲-۳) حساسیت پل وتستون

حساسیت پل جدا از حساسیت دستگاه آشکارساز است و در واقع میزان انحراف عقربه دستگاه به تغییر در مقاومت مجهول را نشان می‌دهد:

$$S=\frac{d\theta}{dR_4} \text{ یا } \frac{dl}{dR_4} \qquad (۴-۱۲)$$

اگر g حساسیت جریانی گالوانومتر و R_m مقاومت داخلی آن باشد، داریم:

$$\left.\frac{d\theta}{dR_4}\right|_{\text{تعادل}} = -gE\frac{R_1^2}{R_2(R_1+R_3)[R_3(R_1+R_2)+R_m(R_1+R_3)]} \qquad (۵-۱۲)$$

حساسیت خیلی کم می‌تواند نتیجه خطادار بدست دهد و حساسیت خیلی بالا در ایجاد حالت تعادل مشکل ایجاد خواهد کرد. محدوده کاربرد پل وتستون در اندازه‌گیری مقاومتهای کم به دلیل وجود مقاومت سیمهای رابط و مقاومت محلهای اتصال از حدود چند اهم پایینتر نمی‌رود و همچنین در اندازه‌گیری مقاومتها بزرگ به دلیل کم شدن حساسیت پل به حدود چند مگا اهم محدود می‌شود.

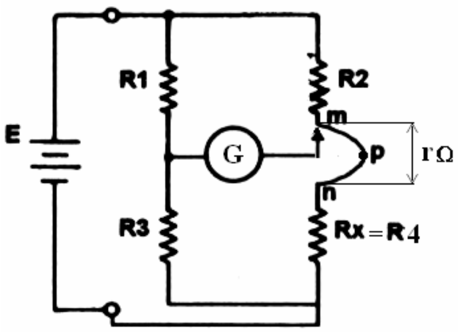
۱۲-۲-۴) پل کلوین

برای اندازه‌گیری مقاومتهای خیلی کوچک از پل کلوین استفاده می‌شود. برای اینکه با عملکرد این پل آشنا شویم ابتدا حالتی را فرض می‌کنیم که در یک پل وتستون مقاومت‌های مسیر نیز قابل توجه بوده و به صورت مساوی

نیز تقسیم نشده‌اند (شکل ۱۲-۲). اگر در حالی که سر دوم گالوانومتر به نقطه m وصل است حالت تعادل برقرار شود داریم:

$$R_4 + r = \frac{R_2 R_3}{R_1} \qquad (۶-۱۲)$$

و بنابراین R_x بیش از مقدار واقعی‌اش محاسبه می‌شود و در وضعیت n قضیه برعکس خواهد بود.

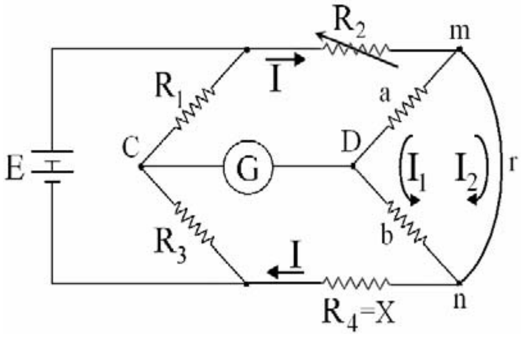


شکل (۱۲-۲)- خطای حاصل از مقاومت سیم‌بندی در پل وتستون

بدیهی است اگر گالوانومتر دقیقاً به نقطه P وصل شود به گونه‌ای که $\frac{r_1}{r_3} = \frac{R_1}{R_3}$ باشد در آن صورت در حالت تعادل خواهیم داشت:

$$R_1(R_4 + r_3) = R_3(R_2 + r_1) \Rightarrow R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

و مقاومت R_4 درست محاسبه می‌شود. اما پیدا کردن نقطه P به آسانی امکان‌پذیر نیست. اساس کار پل دوبل کلوین از بین بردن یا کم کردن خطای حاصل از مقاومت سیم‌بندی است (شکل ۱۲-۳).



شکل (۱۲-۳)-مدار پل کلوین

در این مدار R_2 طوری تنظیم می‌شود که پل به تعادل برسد و b و a به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که: $\frac{R_3}{R_1} = \frac{b}{a}$ باشد. در حالت توازن داریم:

$$V_C = \frac{R_3}{R_1 + R_3} E = \frac{R_3}{R_1 + R_3} I\left[R_2 + r \| (a+b) + R_4\right] \qquad (۷-۱۲)$$

$$V_D = I\left(R_2 + \frac{rb}{a+b+r}\right) \qquad (۸-۱۲)$$

$$V_C = V_D \Rightarrow \frac{R_3}{R_1 + R_3}\left[R_2 + r \| (a+b) + R_4\right] = R_4 + \frac{rb}{a+b+r} \qquad (۹-۱۲)$$

$$R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1} + \frac{ra}{a+b+r}\left[\frac{R_3}{R_1} - \frac{b}{a}\right] \qquad (۱۰-۱۲)$$

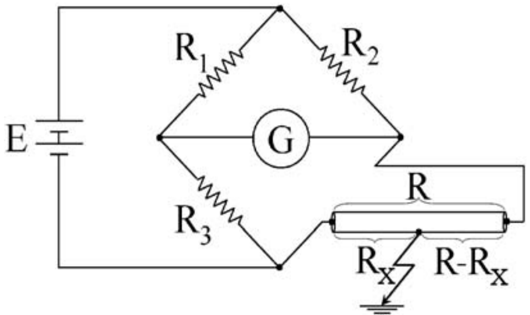
بنابراین با شرط $\frac{R_3}{R_1} = \frac{b}{a}$ می‌توان R_4 را بدون خطا قرائت کرد.

a و b در مقایسه با R_2 و R_4 بسیار بزرگ انتخاب می‌شوند. از این خاصیت برای برقراری رابطه شرط استفاده می‌شود. در ابتدا یک پل وتستون شامل R_1، R_3، a و b رابه تعادل می‌رسانیم و سعی می‌کنیم a و b از ۱۰۰ اهم بیشتر باشند. در این حالت خواهیم داشت $\frac{R_1}{R_3}=\frac{a}{b}$ و شرط پل کلوین ارضاء می‌شود. سپس مسیر m و n را می‌بندیم و R_x را در مدار پل کلوینقرار می‌دهیم. اکنون با تغییر فقط R_2 پل به توازن می‌رسد و قرائت و محاسبه R_x طبق رابطه اصلی پل ($R_x=\frac{R_3R_2}{R_1}$) انجام می‌شود.

۱۲-۲-۵) تعیین محل اتصالی کابل و زمین

فرض کنیم کابل در منطقه‌ای نامعین به زمین اتصال پیدا کرده است. دو سر سیم ابتدا و انتها را به عنوان یک شاخه در مدار یک پل قرار می‌دهیم (شکل ۱۲-۴) در حال توازن داریم:

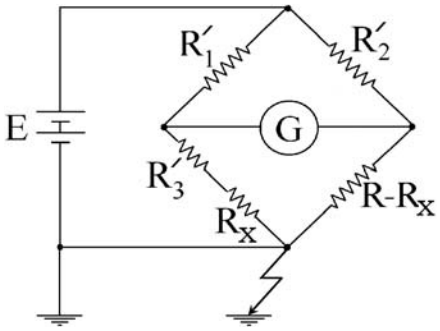
$$R=\frac{R_2R_3}{R_1} \qquad (۱۲-۱۱)$$



شکل (۱۲-۴)- پل وتستون برای سنجش مقاومت کابل

سپس منفی منبع تغذیه را باز کرده و به زمین وصل می‌کنیم(شکل ۱۲-۵). مجدداً در حال توازن داریم:

$$\Rightarrow R_1'\left(R-R_x\right)=R_2'\left(R_3'+R_x\right) \qquad (۱۲-۱۲)$$



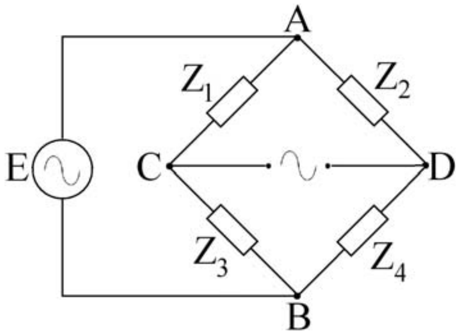
شکل (۱۲-۵)- تعیین محل اتصال کابل به زمین

از اینجا با اندازه‌گیری R_1'، R_2', R_3' و معلوم بودن R، R_x و در نتیجه محل و در نتیجه محل x تخمین زده می‌شود.

۱۲-۳) پلهای تعادلی ac

این پلها برای سنجش امپدانس و فرکانس بکار می‌روند. در این مدارها تفاوت اساسی در منبع است که یک منبع ac است. تفاوت دیگر در آشکارساز صفر است که باید با ac نیز کار کند. این دستگاه می‌تواند یک آمپرسنج ac،

یک ولت‌سنج ac، یک اسکوپ و یا یک گوشی باشد. چهار بازوی پل امپدانسهای Z_1 تا Z_4 هستند و برای رسیدن به تعادل باید یک یا تعداد بیشتری از امپدانسها را تغییر داد (شکل ۱۲-۶).



شکل (۱۲-۶)- مدار پل تعادلی ac

در پلهای ac پس از ایجاد تعادل خواهیم داشت:

$$I_1 = \frac{E}{Z_1 + Z_3}, I_2 = \frac{E}{Z_2 + Z_4} \qquad Z_1 I_1 = Z_2 I_2 \qquad \frac{Z_1}{Z_3} = \frac{Z_2}{Z_4}$$

$$\Rightarrow Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \qquad (۱۲\text{-}۱۳) \qquad \text{یا} \qquad \frac{Y_1}{Y_3} = \frac{Y_2}{Y_4}$$

از رابطه (۱۲-۱۳) بلافاصله نتیجه خواهد شد:

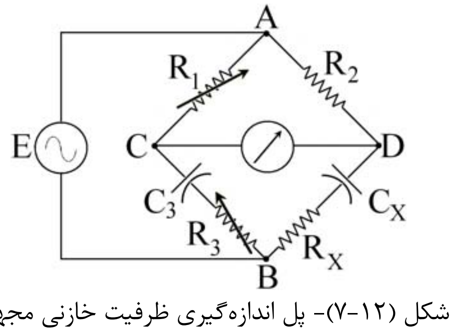
$$\begin{cases} |Z_1||Z_4| = |Z_2||Z_3| \\ \theta_1 + \theta_4 = \theta_2 + \theta_3 \end{cases} \qquad (۱۲\text{-}۱۴)$$

یعنی در حالت تعادل:

* حاصلضرب اندازهامپدانسهای بازوهای متقابل برابر است
* حاصل جمع زوایای امپدانسهای بازوهای متقابل برابر است

۱۲-۳-۱) پل اندازه‌گیری خازن

مدار شکل (۱۲-۷) برای اندازه‌گیری خازن و مقاومت سری با آن بکار می‌رود.



شکل (۱۲-۷)- پل اندازه‌گیری ظرفیت خازنی مجهول

در این مدار:

$$Z_1 = R_1 \qquad Z_2 = R_2 \qquad Z_3 = R_3 + \frac{1}{j\omega C_3} \qquad Z_4 = R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \qquad (15\text{-}12)$$

در حالت تعادل داریم: $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$ یعنی:

$$R_1\left(R_x+\frac{1}{j\omega C_x}\right)=R_2\left(R_3+\frac{1}{j\omega C_3}\right) \quad (۱۶-۱۲)$$

پس از مساوی قرار دادن قسمتهای موهومی و حقیقی دو رابطه مجزا بدست می‌آید:

$$R_1R_x=R_2R_3 \Rightarrow R_x=\frac{R_2R_3}{R_1} \quad (۱۷-۱۲)$$

$$\frac{R_1}{C_x}=\frac{R_2}{C_3} \Rightarrow C_x=\frac{R_1}{R_2}C_3 \quad (۱۸-۱۲)$$

دیده می‌شود که فرکانس سیگنال وارد محاسبات نشده است. پس پل مستقل از فرکانس است.

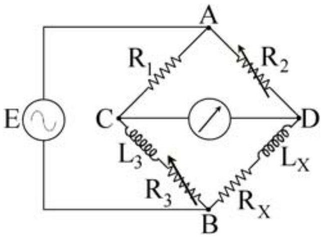
C_3 خازن استاندارد، R_1 و R_3 متغیر و R_2 ثابت است. برای ایجاد حالت تعادل تغییر مقاومتهای R_1 و R_3 متغیر انتخاب می‌شوند.

تنظیم R_1 ← تنظیم R_3 ← تنظیم R_1 ← تنظیم R_3 ← ...

در هر مرحله سیگنال آشکارساز کوچکتر می‌شود تا اینکه نهایتاً صفر می‌شود.

۱۲-۳-۲) پل اندازه‌گیری سلف

مدار شکل ۱۲-۸ برای اندازه‌گیری ضریب خود القائی و مقاومت سری با آن بکار می‌رود.



شکل (۱۲-۸)- اندازه‌گیری ضریب خودالقایی یک پیچک

در حالت توازن داریم:

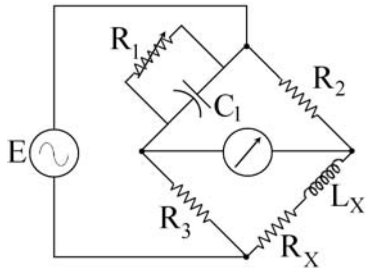
$$R_1\left(R_x+j\omega L_x\right)=R_2\left(R_3+j\omega L_3\right) \quad (۱۹-۱۲)$$

و پس از مساوی قرار دادن بخشهای موهومی و حقیقی در دو طرف تساوی:

$$R_x=\frac{R_2R_3}{R_1} \quad (۲۰-۱۲)$$

$$L_x=\frac{R_2}{R_1}L_3 \quad (۲۱-۱۲)$$

۱۲-۳-۳) پل ماکسول (اندازه‌گیری اندوکتانس مجهول با استفاده از خازن معلوم)



شکل (۱۲-۹)- مدار پل تعادلی ماکسول

با توجه به شکل (۱۲-۹) در حالت تعادل داریم:

$$Z_x = Z_2 Z_3 Y_1 \Rightarrow Z_x = R_2 R_3 \left(\frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right) \quad (۲۲-۱۲)$$

و بنابراین:

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (۲۳-۱۲)$$

$$L_x = R_2 R_3 C_1 \quad (۲۴-۱۲)$$

این مدار برای پیچکهای با Q ($Q = \frac{\omega L_x}{R_x}$) بزرگ مناسب نیست، چرا که باید مقاومت R_1 خیلی بزرگ ($10^5 \Omega$) انتخاب شود. در مورد پیچکهای با Qهای کوچکتر از یک نیز تنظیم پل مشکل می‌شود. این پل برای بخش ضریب خودالقایی پیچکهایی که Q آنها بین ۱ تا ۱۰ است، مناسب می‌باشد.

ابتدا تنظیم R_3 ← تنظیم R_1 ← تنظیم R_3 ← تنظیم R_1 یعنی تغییر R_3 در اینجا تعادل مقاومتی را نیز دوباره به هم می‌زند. بخصوص در Qهای کوچک که R_x بر L_x غالب است، تعادل بسیار کند بدست می‌آید.

۱۲-۳-۴) پل هی (اندازه‌گیری RL سری با Q بزرگ)

در این مدار C_1 با R_1 سری می‌شود و در حالت تعادل داریم:

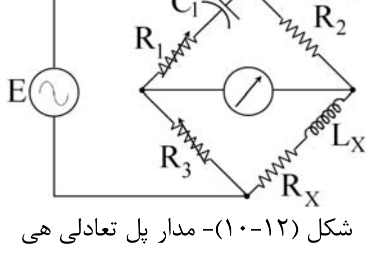
$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \quad \Rightarrow R_x = \frac{\omega^2 C_1^2 R_1 R_2 R_3}{1 + \omega^2 C_1^2 R_1^2} \quad (۲۵-۱۲) \qquad L_x = \frac{R_2 R_3 C_1}{1 + \omega^2 C_1^2 R_1^2} \quad (۲۶-۱۲)$$

اگر از روابط (۱۲-۲۵) و (۱۲-۲۶) در رابطه Q قرار دهیم

$$\Rightarrow Q = \frac{1}{R_1 C_1 \omega} \Rightarrow L_x = \frac{R_2 R_3 C_1}{1 + \left(\frac{1}{Q} \right)^2} \quad (۲۷-۱۲)$$

$$Q \rangle 10 \Rightarrow \frac{1}{Q^2} \langle 0.01 \Rightarrow L_x \approx R_2 R_3 C_1 \quad (۲۸-۱۲)$$

که این همان معادله پل ماکسول است. یعنی برای Qهای بزرگتر از ۱۰ می‌توان در مدار پل هی، رابطه پل ماکسول را بکار برد.



شکل (۱۲-۱۰)- مدار پل تعادلی هی

۱۲-۳-۵) پل شرینگ برای اندازه‌گیری خازن با مقاومت سری خیلی کوچک

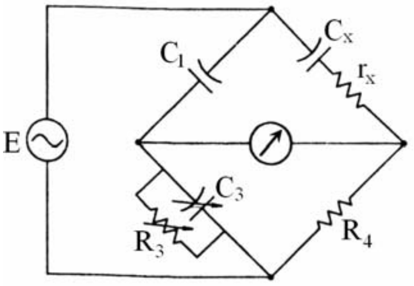
در حالت تعادل داریم:

$$r_x = \frac{R_4 C_3}{C_1} \quad (۲۹-۱۲) \qquad C_x = C_1 \frac{R_3}{R_4} \quad (۳۰-۱۲)$$

ضریب اتلاف خازن $= \Delta = \omega R_x C_x = \omega R_1 C_1$ (۳۱-۱۲)

C_1 یک خازن با فاصله هوایی و در نتیجه مقاومت سری صفر است.

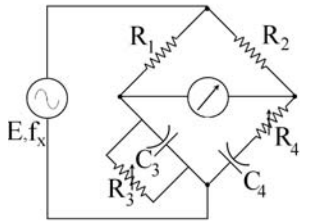
C_3 و R_3 عناصر متغیر انتخاب می‌شود و بنابراین در معادله مستقل بدست می‌آید.



شکل (۱۲-۱۱)-پل شرینگ

۱۲-۳-۶) پل وین برای اندازه‌گیری فرکانس مجهول

در این پل تمامی عناصر معلوم هستند و در حالت تعادل داریم:



شکل (۱۲-۱۲)-پل وین (اندازه‌گیری فرکانس)

$$\left(\frac{R_3}{1+j\omega C_3R_3}\right)R_2=\left(R_4+\frac{1}{j\omega C_4}\right)R_1$$

$$\frac{R2}{R1}=\frac{R4}{R3}+\frac{C3}{C4} \quad (۱۲-۳۲)$$

$$f_x=\frac{1}{2\pi\left(R_3R_4C_3C_4\right)^{1/2}} \quad (۱۲-۳۳)$$

در عمل برای سهولت رسیدن به حالت تعادل مدار را طوری تنظیم می‌کنند که همواره شرط (۱۲-۳۲) برقرار باشد و با تغییر فرکانس فقط تنظیم جهت ایجاد شرط (۱۲-۳۳) لازم باشد. برای اینکار معمولاً C_3 و C_4 مساوی و R_3 و R_4 نیز یکسان انتخاب می‌شوند. بنابراین، $R_2=2R_1$ خواهد شد. از طرفی برای اعمال شرط (۱۲-۳۳) می‌توان فقط R_3 و R_4 را به قسمی تغییر داد که همواره نسبت آنها برابر با یک باشد تا شرط (۱۲-۳۲) مختل شود. برای این کار از پتانسیومترهای هم‌محور یا جعبه مقاومتهای یکسان استفاده می‌شود. پس از تنظیم پل و رسیدن به حالت پل مقدار فرکانس مجهول به سادگی محاسبه می‌شود.

۱۲-۳-۷) پل هوی‌ساید برای اندازه‌گیری اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ

این مدار در شکل (۱۲-۱۲) ارائه شده است. در این مدار پیچکهای L_3 و L_5 علاوه بر خود القایی دارای اندوکتانس متقابل (M) بوده و هدف تعیین این ضریب است.

در حالت تعادل داریم:

$$R_1i_1=R_2i_2 \quad (۱۲-۳۴)$$

و

$$i_1\left(R_3+j\omega L_3\right)+j\omega M\left(i_1+i_2\right)=i_2\left(R_4+j\omega L_4\right) \quad (۱۲-۳۵)$$

با قرار دادن $i_2=\frac{R_1}{R_2}i_1$ در معادله اخیر داریم:

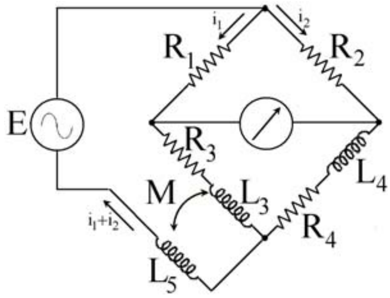
$$i_1(R_3 + j\omega L_3 + j\omega M) + \frac{R_1}{R_2} i_1 j\omega M = \frac{R_1}{R_2} i_1 (R_4 + j\omega L_4) \qquad (۳۶-۱۲)$$

با مساوی قراردادن قسمتهای حقیقی و موهومی داریم:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \qquad (۳۷-۱۲)$$

$$M = \frac{R_1 L_4 - R_2 L_3}{R_1 + R_2} \qquad (۳۸-۱۲)$$

دیده می‌شود که برای تعیین M، علاوه بر معلوم بودن مقادیر مقاومتها، دانستن مقدار L_3 هم لازم است.



شکل (۱۲-۱۳)-پل هوی‌ساید

سئوال – عناصر متغیر را چگونه انتخاب می‌کنید؟ اگر از R_1 و R_4استفاده شود، آیا ترتیب خاصی برای تنظیم آنها لازم است؟

تبصره – اگر همواره $R_1 = R_2$ باشد در آنصورت پس از تعادل خواهیم داشت:

$$M = \frac{L_4 - L_3}{2} \qquad (۳۹-۱۲)$$

$$R_4 = R_3 \qquad (۴۰-۱۲)$$

شکل (۱۲-۱۴) مدار دیگری برای تعیین اندوکتانس متقابل را نشان می‌دهد. این مدار در واقع اصلاح شده مدار شکل (۱۲-۱۳) است و مزیت آن در این است که برای محاسبه M لزومی به دانستن مقدار L_3 نیست.

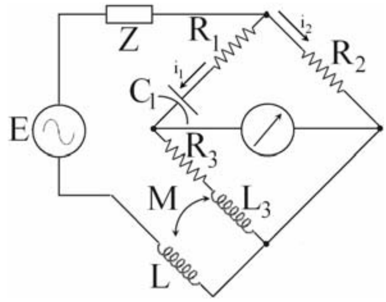
در این پل در حالت تعادل داریم:

$$i_1\left(R_1 - \frac{j}{C\omega}\right) = R_2 i_2 \qquad (۴۱-۱۲)$$

و

$$i_1(R_3 + j\omega L_3) - (i_1 + i_2) j\omega M = 0 \qquad (۴۲-۱۲)$$

$$i_1(R_3 + j\omega L_3) - i_1\left(1 + \frac{R_1}{R_2} - \frac{j}{R_2 C\omega}\right) j\omega M = 0 \qquad (۴۳-۱۲)$$



شکل (۱۲-۱۴)

با جداکردن مقادیر موهومی و حقیقی و صفر قرار دادن هر کدام ، روابط بین عناصر پل در حالت تعادل بدست می‌آید.

$$M = R_2 R_3 C_1 \qquad (۴۴-۱۲)$$

$$L_3 = M\left(1+\frac{R_1}{R_2}\right) = R_3 C\left(R_2 + R_1\right) \qquad (۴۵-۱۲)$$

عناصر تنظیم می‌توانند R_1 و R_2 باشند که در اینصورت ابتدا باید تنظیم با R_2 انجام شود و سپس توسط R_1 تنظیم نهایی انجام گیرد. در صورت تنظیم با R_1 و R_3 ترتیب اهمیتی ندارد (چرا؟).

سئوال – آیا علامت M در تعادل پل نقشی دارد؟

فصل سیزدهم – دستگاهها و روشهای اندازه‌گیری فرکانس

فرکانس سنجها به چند دسته تقسیم میشوند. از آن جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

۱- نوع تشدید مکانیکی ۲- نوع تشدید الکتریکی ۳- نوع الکترودینامومتری

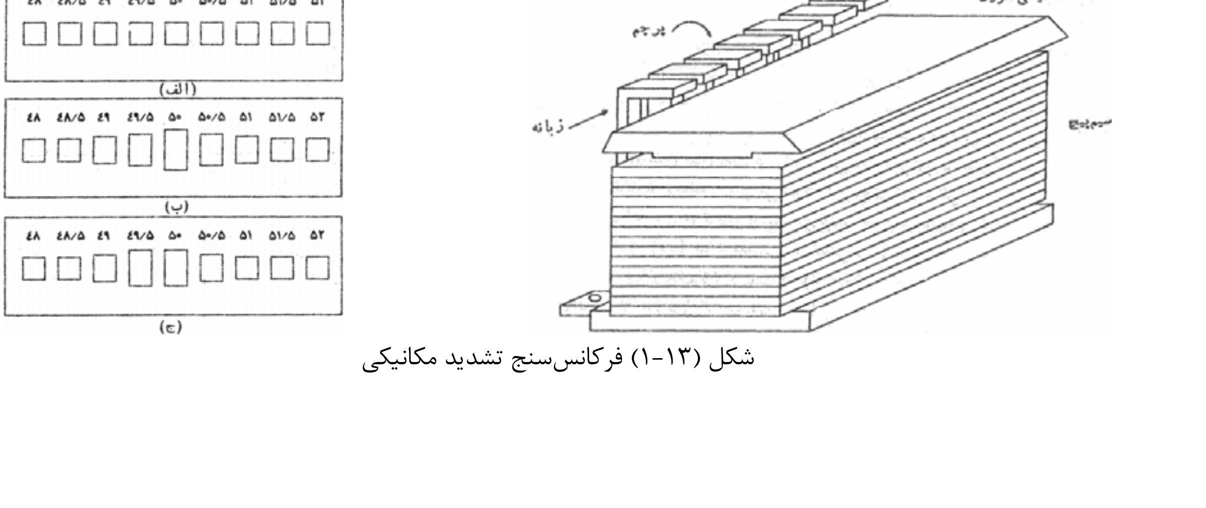
۴- نوع وستون ۵- نوع نسبت‌سنج ۶- نوع دارای هسته اشباع‌پذیر

۱۳-۱) فرکانس سنج با تشدید مکانیکی

این سنجه تعداد زیادی نوارهای باریک فولادی دارد که زبانه خوانده می‌شوند. این زبانه‌ها در یک ردیف کنار هم و در نزدیکی یک آهنربای الکتریکی قرار گرفته‌اند. هسته آهنربا مورق است و پیچک آن به همراه یک مقاومت سری به منبعی وصل می‌شود که فرکانس آن باید اندازه‌گیری شود. زبانه‌ها با عرض 4mm و ضخامت ۰,5mm کاملاً یکسان نیستند و بسته به وزن و ابعادشان فرکانس طبیعی ارتعاش مخصوص به خود دارند. تفاوت فرکانس ارتعاش زبانه‌های مجاور ۱ هرتز است.

وقتی فرکانس‌سنج توسط منبع تغذیه می‌شود از پیچک جریان i گذشته و نیروی جاذبه بین زبانه‌ها و آهنربا متناسب با i^2 است و بنابراین با دو برابر فرکانس تغذیه تغییر می‌کند و زبانه‌ای که فرکانس طبیعی آن با دو برابر فرکانس تغذیه یکی است شروع به ارتعاش می‌کند. بنابراین عدد نشان داده شده توسط هر تیغه با تیغه مجاورش 0.5Hz تفاوت دارد. این فرکانس‌سنجها به دلیل محدودیت در حجم و تعداد تیغه‌ها معمولاً محدوده فرکانسی مشخصی را اندازه‌گیری می‌کنند (مثلاً ۶ هرتز یعنی از ۴۷ تا ۵۳ هرتز) و بیشتر جهت اطمینان از درستی فرکانس منبع (مثلاً ۵۰ هرتز) و در تابلوهای برق نیروگاهها و مراکز بزرگ مصرف کاربرد دارند.

عیب دستگاه این است که فرکانس را با دقت بیش از نصف تفاوت فرکانس تشدید زبانه‌های مجاور نمی‌توان خواند. مزیت آن مستقل بودن نمایش از شکل موج ولتاژ منبع تغذیه است (البته به شرط اینکه ولتاژ منبع خیلی کوچک نباشد).

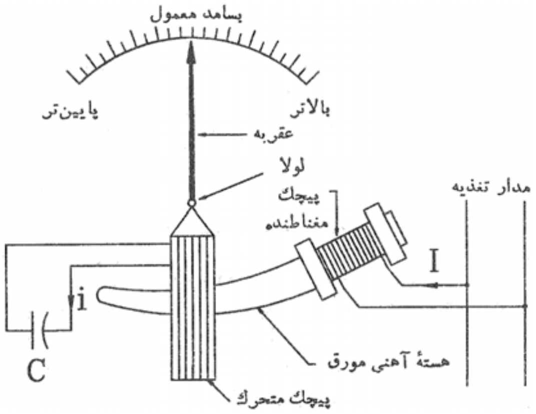


شکل (۱۳-۱) فرکانس‌سنج تشدید مکانیکی

۱۳-۲) فرکانس‌سنج با تشدید الکتریکی

۱۳-۲-۱) دستگاه فرودینامیکی

این دستگاه دارای یک پیچک ساکن است که از منبع تغذیه می‌شود. شار ناشی از این پیچک ولتاژی در پیچک متحرک القا می‌کند و این ولتاژ در یک مدار متشکل از خازن و اندوکتانس خود پیچک جریان i را راه می‌اندازد که به L و C بستگی دارد. در اینجا با توجه به ماهیت مدار شامل پیچک متحرک، سه حالت می‌توان در نظر گرفت.



شکل (۱۳-۲) فرکانس‌متر فرودینامیکی

اگر مدار سلفی بوده و i نسبت به ولتاژ القایی e به اندازه α پسفاز باشد در مورد گشتاور موثر بر پیچک متحرک می‌توان گفت که:

$$T_d \propto I \cdot i\cos(90^\circ + \alpha) \qquad (۱-۱۳)$$

و اگر مدار خازنی باشد چنین داریم:

$$T_d \propto I \cdot i\cos(90^\circ - \beta) \qquad (۲-۱۳)$$

که β زاویه پیشفازی جریان i نسبت به ولتاژ القایی e است.

در حالیکه اثر راکتانس سلفی L و خازنی C کاملاً یکسان باشند (حالت تشدید) زاویه بین i و e صفر شده و خواهیم داشت:

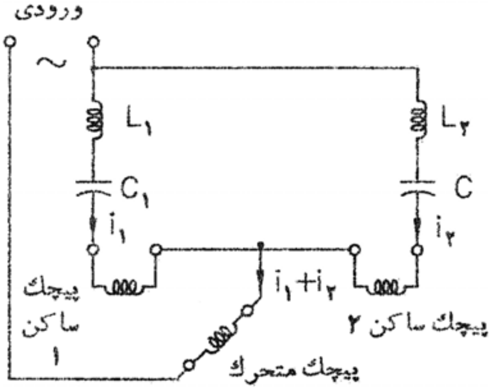
$$T_d \propto I \cdot i\cos 90^\circ = 0 \qquad (۳-۱۳)$$

یعنی در حالت تشدید گشتاوری به دستگاه وارد نمی‌شود. بنابراین به دستگاه تا وقتی که به تشدید نرسیده گشتاور وارد می‌شود. حال فرض کنیم در یک فرکانس معین حالت تشدید حاصل شده و دستگاه ساکن باشد. در این وضعیت اگر فرکانس کمی افزایش یابد، به راکتانس سلف نیز افزوده خواهد شد و گشتاور ایجاد می‌شود. طراحی دستگاه به نحوی است که با حرکت پیچک متحرک، اندوکتانس آن تغییر می‌کند (L متغیر است) بنابراین بدون اینکه نیروی کنترلی لازم باشد دستگاه مجدداً در وضعیتی تثبیت خواهد شد که $X_L = X_C$ یا $f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{LC}$ باشد. عقربه به پیچک متحرک وصل است و با کالیبره‌کردن دستگاه می‌توان فرکانس تغذیه را معین نمود.

۱۳-۲-۲) فرکانس‌سنج الکترودینامیکی

دستگاه الکترودینامیکی که قبلاً گفته شد دو پیچک دارد (یکی ساکن و دیگری متحرک) و پیچک ساکن خود از دو قسمت مجزا تشکیل می‌شود که با هم سری هستند. برای اینکه دستگاه به صورت فرکانس‌متر کار کند آنرا به شکل (۱۳-۳) می‌بندند. هر یک از دو مداری که به پیچک ساکن متصل هستند فرکانس تشدید مخصوص خود را

دارند. فرکانس تشدید f_1 کمی پائین‌تر از حد سنجش دستگاه و f_2 کمی بالاتر از بالاترین فرکانس قابل سنجش توسط دستگاه است.



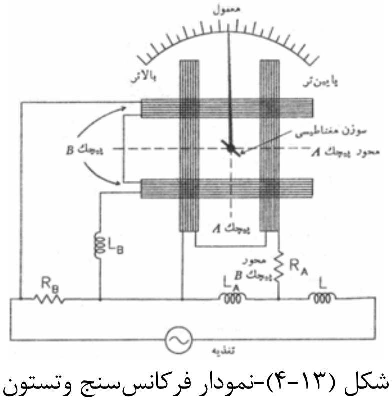
شکل (۱۳-۳) فرکانس‌سنج الکترودینامیکی

چنانچه در شکل ۱۳-۳ دیده می‌شود مدار برگشت جریانهای پیچکهای ساکن از پیچک متحرک است. گشتاور موثر وارد بر عنصر متحرک با جریان گذرنده از سیم‌پیچ (I) متحرک متناسب است. این جریان برابر مجموع جریانهای دو قسمت پیچک ساکن است. ($I = i_1 + i_2$)

برای فرکانس اعمال شده در محدوده سنجش دستگاه ($f_1 \langle f \langle f_2$) مدار متشکل از L_1 و C_1 خاصیت سلفی پیدا می‌کند (چون $X_{L_1} \rangle X_{C_1}$ می‌شود) و مدار متشکل از L_2 و C_2 دارای خاصیت خازنی خواهد بود. چون در f_2 راکتانس X_{C_1} و X_{L_1} برابر می‌شوند و در فرکانسهای کمتر، X_{C_2} و X_{L_2} بزرگتر خواهد بود. بنابراین گشتاورهای حاصل از جریانهای i_1 و i_2 بر پیچک متحرک بصورت مخالف عمل می‌کنند. گشتاور برآیند تابعی از فرکانس منبع است و بنابراین می‌توان مقیاس را برحسب فرکانس درجه‌بندی کرد.

۱۳-۳) فرکانس‌سنج وتستون

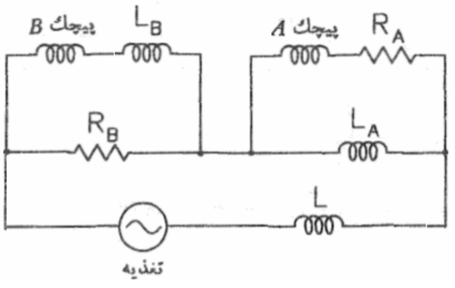
دستگاه شامل دو پیچک عمودد بر هم است که هر کدام از دو قسمت موازی تشکیل شده‌اند و به صورت اضلاع یک مربع آرایش یافته‌اند (شکل (۱۳-۱۴) را ببینید) یک سوزن مغناطیسی در فضای بین پیچکها قرار گرفته که دارای حرکت چرخشی آزاد است و در جهت میدان مغناطیسی قویتر قرار می‌گیرد. عقربه دستگاه نیز با یک زاویه 45° بطور ثابت نسبت به سوزن مغناطیسی نصب شده و همراه با آن می‌چرخد. فرکانس مبنای دستگاه در وسط مقیاس درج شده است.



شکل (۱۳-۴)-نمودار فرکانس‌سنج وتستون

هر دو پیچک توسط منبعی که فرکانس آنرا می‌سنجیم تغذیه می‌شوند. در مدار تغذیه هر کدام از پیچکها یک سلف و مقاومت اضافه شده‌اند. در شکل (۱۳-۵) مدار الکتریکی این سنجه دیده می‌شود.

مقادیر L_A، L_B، R_A و R_B طوری انتخاب شده‌اند که هرگاه دستگاه با فرکانس اصلی تغذیه شود، جریانهای عبوری دو پیچک یکسان شده و بنابراین میدان حاصل از هر دو پیچک یکسان می‌شوذد و سوزن در وضعیت 45° می‌ایستد و عقربه را درر وسط مقیاس قرار می‌دهد. اما اگر فرکانس تغییر کند، X_{L_A} و X_{L_B} تغییر می‌کنند در حالیکه R_A و R_B ثابت می‌مانند. بنابراین ولتاژ و جریان پیچکهای A و B متفاوت می‌شود و میدان آنها از حالت تعادل خارج می‌شود و عقربه و سوزن مغناطیسی را از وضعیت تعادلی منحرف می‌نمایند.

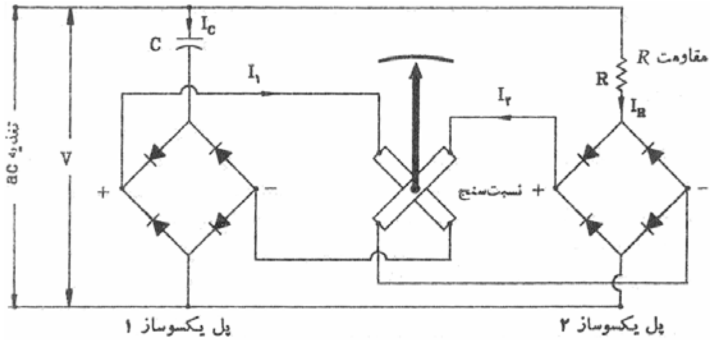


شکل (۱۳-۵)-مدار الکتریکی فرکانس‌سنج وتستون

اگر فرکانس از فرکانس مبنا زیادتر باشد، ولتاژ A زیاد شده و سوزن به سمتی که با محور A همراستا شود می‌چرخد (پاد ساعتگرد) و در وضعیتی که فرکانس از فرکانس مبنا کمتر است ولتاژ روی پیچک B بزرگتر شده و سوزن در جهت ساعتگرد چرخیده و عقربه در سمت راست حالت تعادل قرار می‌گیرد.

۱۳-۴) فرکانس‌سنج تناسبی

این دستگاه اساساً یک نسبت‌سنج است (فرضاً یک دستگاه قاب گردان صلیبی). دو پیچک نسبت‌سنج توسط جریانهای خروجی یکسوشده دو پل یکسوساز تغذیه می‌شوند. طرفهای ورودی پلها به جریان متناوب منبع وصل است و در مسیر یکی از آنها مقاومت R_a و در مسیر دیگری خازن C سری شده است. (شکل ۱۳-۶)



شکل (۱۳-۶)-فرکانس‌سنج تناسبی

فرض کنیم منبع ولتاژ V با فرکانس f، تغذیه کننده مدار باشد. در مورد جریان خروجی پل یکسوساز ۱ داریم:

$$I_1 \propto I_C \propto 2\pi \cdot f \cdot V \cdot C \qquad (۱۳-۴)$$

و در مورد جریان خروجی پل یکسوساز ۲

$$I_2 \propto I_R \propto \frac{V}{R} \qquad (۱۳-۵)$$

در مورد دستگاههای نسبت‌سنج:

$$\theta = K\frac{I_1}{I_2} \qquad (۱۳-۶)$$

پس:

$$\theta = K_1 \frac{2\pi \cdot f \cdot V \cdot C}{V/R} = 2\pi \cdot K_1 \cdot C \cdot R \cdot f \qquad (۷-۱۳)$$

حال که K_1، C و R ثابت هستند. نتیجه می‌گیریم:

$$\theta = K_2 f \qquad (۸-۱۳)$$

یعنی می‌توان مقیاس دستگاه را بصورت خطی (و بدون محدودیت) درجه‌بندی نمود.از این سنجه می‌توان تا فرکانس ۵۰۰۰ هرتز استفاده کرد.

۱۳-۵) فرکانس‌سنج با هسته اشباع‌پذیر

دستگاه از یک ترانسفورماتور با هسته اشباع‌پذیر و یک یکسوکننده و یک سنجه قاب گردان (آمپرمتر) تشکیل می‌شود (شکل ۱۳-۷). هسته از سه بخش ساخته شده است:

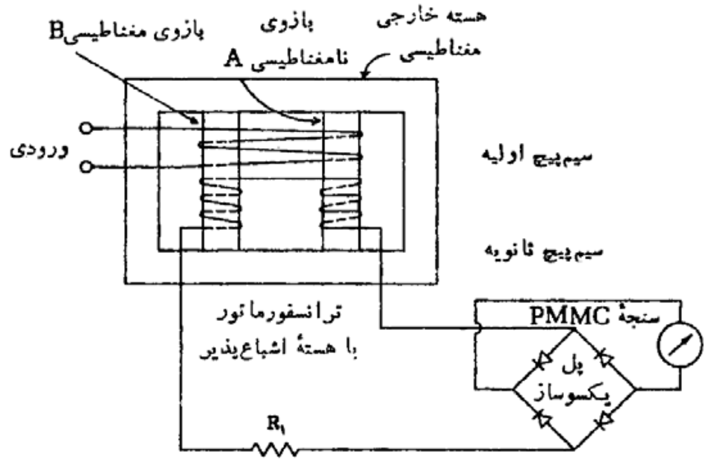
۱- هسته خارجی که به اشباع نمی‌رود و مغناطیسی است

۲- ستون A که نامغناطیسی است.

۳- ستون B که مغناطیسی است و با مقدار کم mmf اشباع می‌شود.

سیم‌پیچ اولیه به دور بازوهای A و B پیچیده می‌شود و ثانویه مرکب از دو پیچک است که یکی روی A و دیگری روی B پیچیده می‌شود و با هم سری شده‌اند. جهت پیچش سیمهای پیچکهای ثانویه طوری است که نیروی محرکه القایی در این دو با هم متقابل‌هستند. در حالت اشباع B ولتاژ خروجی تابعی از ولتاژ اولیه نبوده بلکه تنها تابعی از فرکانس منبع است. لذا خروجی مدار در حالت اشباع را یکسو کرده و در یک سنجه dc به عنوان تابعی از فرکانس می‌سنجند..

از این دستگاه به جهت گستره وسیع در سیستمهای تاکومتر (سرعت‌سنج) استفاده می‌شود.



شکل (۱۳-۷)-فرکانس‌سنج ترانسفورمری با هسته اشباع‌پذیر

روابط حاکم بر کار دستگاه به ترتیب ذیل استخراج می‌شوند.

اگر ϕ اختلاف بین مقدار شار بازوهای A و B باشد ، نیروی محرکه القایی در ثانویه عبارتست از :

$$e = N \, d\phi / dt \qquad (۹-۱۳)$$

و میانگین ولتاژ ثانویه در یک نیم سیکل برابر است با:

$$E_{av} = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\pi/\omega} e\,dt = \frac{\omega}{\pi} N \int_{-\phi_m}^{+\phi_m} d\phi = 4Nf\phi_m \qquad (۱۰-۱۳)$$

و از آنجا برای فرکانس داریم:

$$f = \frac{E_{av}}{4N\phi_m} = KE_{av} \qquad (۱۳-۱۱)$$

پس از اشباع بازوی B، ϕ_m ثابت شده و K عدد ثابتی خواهد بود. جریان پس از یکسوشدن سنجه dc عبارتست از:

$$I_{av} = \frac{E_{av}}{R} \qquad (۱۳-۱۲)$$

که در آن R شامل مقاومت پل یکسوساز، سنجه و مقاومت R_1 است بنابراین:

$$f = KRI_{av} \qquad (۱۳-۱۳)$$

و چون در سنجه قاب گردان θ مستقیماً با جریان مرتبط است:

$$\theta \propto I_{av} \propto f \qquad (۱۳-۱۴)$$

بنابراین یک دستگاه فرکانس‌متر خطی بدست می‌آید.

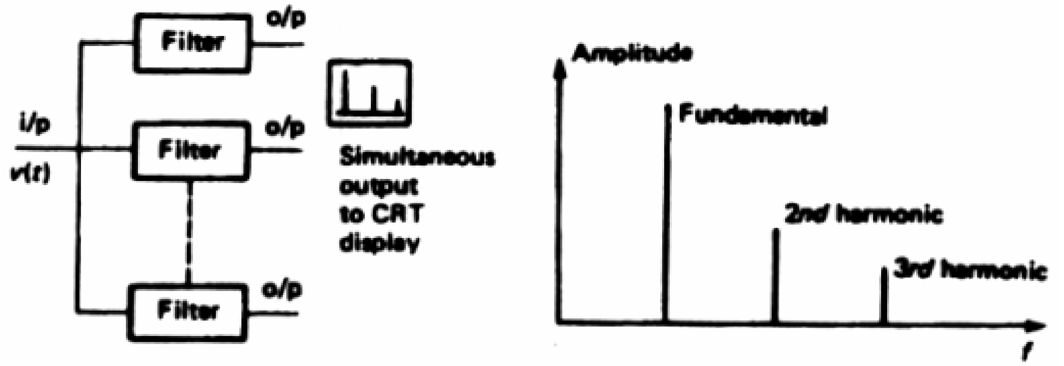
۱۳-۶) سنجش هارمونیکها

روش اساسی در این سنجش، اندازه‌گیری و نمایش سیگنال در حوزه فرکانس و یا به عبارت دیگر تعیین طیف سیگنال است. اگر چه در برخی از سنجشها نیازی به تعیین طیف سیگنال نیست و تعیین دامنه یک یا چند فرکانس مورد نظر، انجام می‌شود.

۱۳-۶-۱) تعیین طیف سیگنال در محدوده صوتی

این کار بوسیله یک دستگاه اسپکتروم آنالیزر که دارای یک بانک فیلتری میانگذر است انجام می‌شود. معمولاً بانک فیلتری مزبور از ۳۲ فیلتر تشکیل می‌شود و پهنای باند و فرکانس مرکزی فیلترها به گونه‌ای است که همدیگر را پوشش می‌دهند. سیگنال مورد نظر به صورت موازی به تمامی فیلترها داده شده. انرژی سیگنال خروجی هر یک از فیلترها اندازه‌گیری و نمایش داده می‌شود. نمایش دهنده می‌تواند یک CRT باشد.

تبصره – برای محاسبه توان سیگنال خروجی فیلتر، سیگنال مجذور شده و از آن انتگرال‌گیری می‌شود.

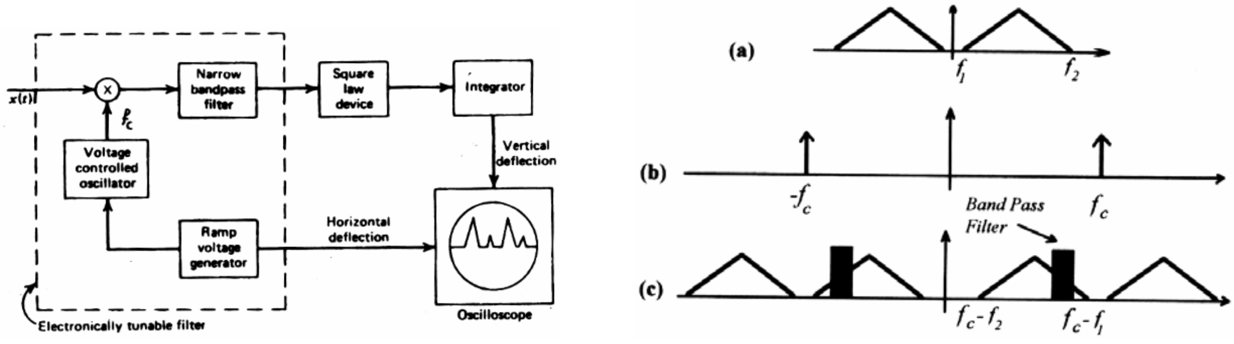


شکل (۱۳- ۸)

۱۳-۶-۲) تعیین طیف سیگنال با باند عریض

در این حالت از اسپکتروم آنالیزر با جاروب فرکانسی استفاده می‌شود. بخش اصلی دستگاه یک فیلتر میانگذر است که فرکانس مرکزی آن می‌تواند جابجا شود. با حرکت این فیلتر روی محور فرکانس و اندازه‌گیری سیگنال خروجی آن می‌توان طیف سیگنال را نمایش داد. از آنجا که تغییر فرکانس مرکزی یک فیلتر به سادگی امکان‌پذیر نیست، در عمل، فرکانس مرکزی فیلتر (f_C) ثابت بوده و طیف سیگنال را با ضرب آن در فرکانس خروجی VCO جابجا می‌کنند. با ضرب سیگنال ورودی در فرکانس خروجی VCO طیف سیگنال به حوالی نقطه f_C انتقال می‌یابد و

قسمتی از طیف در باند عبور فیلتر قرار می‌گیرد. بنابراین با تغییر فرکانس VCO می‌توان تمام طیف x(t) را جاروب کرد. اگر یک موج دندانه اره‌ای ولتاژ به VCO اعمال گردد فرکانس خروجی آن به صورت خطی تغییر خواهد کرد. با اعمال همین ولتاژ به صفحات انحراف افقی CRT و اعمال خروجی انتگراتور به صفحات انحراف عمودی، طیف سیگنال روی CRT دیده می‌شود.



شکل (۱۳-۹)

۱۳-۶-۳) آنالیزر فوریه

در این روش ابتدا سیگنال نمونه‌گیری شده و تبدیل به اطلاعات دیجیتال می‌شود. این اطلاعات وارد یک پردازشگر شده و روی نمونه‌ها الگوریتم تبدیل فوریه اجرا می‌شود. نتیجه عمل، طیف فرکانسی سیگنال می‌باشد. از این روش، به خاطر محدودیت در سرعت نمونه‌برداری و سرعت تبدیل آنالوگ به دیجیتال، در فرکانسهای پائین استفاده می‌شود.

۱۳-۶-۴) تعیین دامنه یک فرکانس معین

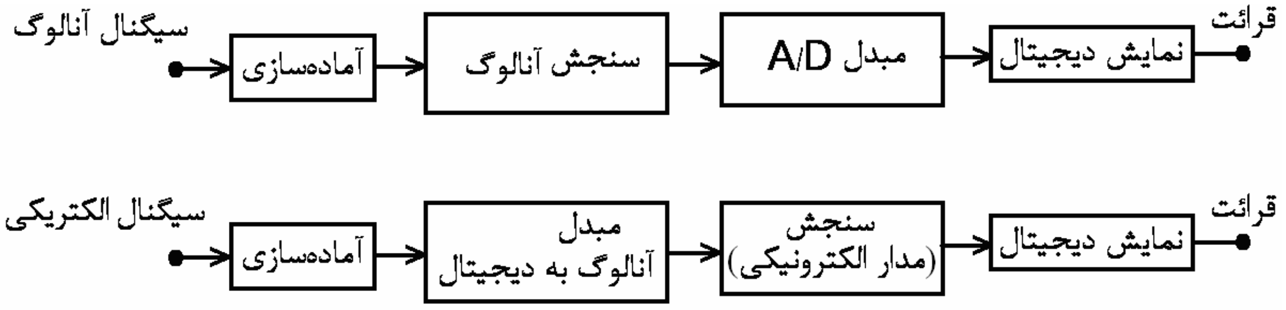
این کار را توسط آنالیزر موج (Wave Analyzer) انجام می‌دهند. در این سیستم می‌توان فرکانس مرکزی یک فیلتر میانگذر را روی فرکانس دلخواهی تنظیم کرده و دامنه سیگنال را روی آن فرکانس اندازه‌گیری نمود. آنالیزرهای موج نوعاً دارای محدوده فرکانسی 15Hz الی 32MHz و با پهنای باند 3Hz الی 3.1KHz می‌باشند و می‌توانند سیگنالهایی با دامنه $0.1\mu V$ الی 300V را بپذیرند. کار آنالیزر اعوجاج (Distortion Analyse) عکس کار آنالیزر موج است. به این ترتیب که مولفه خاصی از سیگنال توسط یک فیلتر با فرکانس مرکزی قابل تنظیم حذف می‌شود (فیلتر میان نگذر) و سپس انرژی سیگنال باقیمانده اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری اعوجاج کل (THD = Total Harmonics Disturtain) طبق رابطه زیر محاسبه و نمایش داده می‌شود.

$$THD = \left(\frac{\text{انرژی سیگنال در خروجی فیلتر}}{\text{انرژی کل سیگنال}}\right)^{1/2} \qquad (۱۵\text{-}۱۳)$$

فصل چهاردهم – معرفی مختصر دستگاههای اندازه‌گیری دیجیتال

۱۴-۱) معرفی

وسایل رقمی به وسایلی گفته می‌شود که حاصل اندازه‌گیری به صورت یک عدد روی صفحه نمایش ظاهر می‌شود. با این تقسیم‌بندی یک دستگاه دیجیتال لزوماً یک مدار الکترونیکی ندارد. اما وسایل دیجیتال که امروزه در اندازه‌گیری بکار می‌روند در واقع وسایل الکترونیکی دیجیتال هستند. یعنی مشخصه اساسی این دستگاهها وجود عناصر نیمه هادی و مدارهای مجتمع عملیاتی و گیتهای منطقی نیمه هادی است و نتیجه کار نیز بصورت عدد در یک نمایشگر دیده می‌شود. بر این اساس دو نوع وسیله رقمی می‌توان متصور شد.



شکل (۱۴-۱)

منظور از دستگاه اندازه‌گیری دیجیتال، نوع دوم می‌باشد. بنابراین می‌توان مشخصه دستگاههای دیجیتال را چنین برشمرد.

۱- نمایش به صورت عدد (نا پیوسته) در نمایشگرهای (LED=Light Emition Diode) یا (LCD=Liquid Crystal Displayer)

۲- استفاده از مدارات الکترونیک (و عمدتاً نیمه‌هادیها)

۳- عدم وجود مبدل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی (سنجش توسط مدارهای الکترونیکی که مستلزم استفاده از طبقه A/D قبل از طبقه سنجش است.)

۱۴-۲) ویژگیهای دستگاههای اندازه‌گیری دیجیتال

۱- قرائت آسان و بدون خطای دید (در واقع در سیستم آنالوگ فرد اندازه‌گیر، نقش مبدل A/D را دارد که علاوه بر خطای زیاد وقت‌گیر هم می‌باشد).

۲- سرعت نمایش به دلیل عدم وجود قسمت متحرک که دارای اینرسی مکانیکی است و مشکلات ناپایداری و نوسانات ناخواسته را ایجاد می‌کند.

۳- صحت بالا (یا درصد خطای کم) نسبت به ابراز آنالوگ مشابه که معمولاً به نسبت ۱۰برابر است (مثلاً خطای ۰,۱٪ در مقابل خطای ۱٪)

میزان صحت دستگاه برحسب درصد خطا بیان می‌شود و معمولاً به صورت زیر از طرف کارخانه سازنده ، ارائه می‌گردد:

$$\text{خطا} = xR + yS + n$$

که در آن R بیانگر عددی است که قرائت می‌شود. S به معنای عددی است که رنج دستگاه روی آن قرار دارد و x و y و n اعداد معلومی هستند که کارخانه ارائه می‌دهد.

مثال – اگر در یک سیستم اندازه‌گیری با $5\frac{1}{2}$ رقم x=0.004% و y=0.0015% و n=2 باشد و عددی که روی دستگاه قرائت می‌شود 13.5000 و رنج دستگاه 200mV باشد، خطای اندازه‌گیری را محاسبه کنید.

حل –

خطای قرائت = xR = (0.004%)(13.5) = 0.054%

خطای رنج = yS = (0.0015%)(200) = 0.3%

خطای رقم $\frac{2}{135000}\times 100 = 0.0015\%$

خطای کل = 0.054%+0.3%+0.0015%=0.3555%

در عمل برای سادگی در محاسبه خطا، معمولاً از منحنی‌هایی که بتوان مقدار خطا را براحتی از آن استخراج کرد، استفاده می‌شود.

۴- حساسیت دستگاه به شرایط محیطی: این وسایل هر چند ماه یکبار باید کالیبره شوند و با تغییرات شرایط محیط به خصوص دما، کالیبراسیون باید تکرار گردد.

۵- اثر بارگذاری کم (مصرف توان در داخل دستگاه جهت سنجش و نمایش یا کم است و یا از منبع دیگری بجز سیگنال ورودی تامین می‌گردد.)

۶- دقت یا قدرت تفکیک دستگاه نسبت به دستگاههای آنالوگ بیشتر است. در واقع تفکیک‌پذیری به تعداد رقمهایی که می‌تواند نمایش داده شود، بستگی دارد. به عنوان مثال در یک دستگاه با $3\frac{1}{2}$ رقم که می‌تواند ماکزیمم عدد ۱۹۹۹ را نشان دهد. تفکیک‌پذیری برابر $\frac{1}{2000}$ است (معنای $\frac{1}{2}$ این است که با ارزشترین رقم فقط می‌تواند ۱ یا ۰ باشد). البته کوچکترین عددی که این دستگاه نشان می‌دهد نیز چهار رقمی است: (0.000)

۱۴-۳) فرآیند اندازه‌گیری در دستگاههای مالتی‌متر دیجیتال

اساس کار این دستگاهها بدین ترتیب است که ابتدا سیگنال ورودی به ولتاژ تبدیل شود (پس سنجه در واقع یک ولت‌سنج است) در مرحله بعد سیگنال‌های ac یکسو شده و به dc تبدیل می‌شوند (در یکسوسازی اگر از موثرسنج واقعی استفاده شود (و نه یکسوساز ایده‌آل) قرائت نهایی مستقل از شکل موج سیگنال خواهد بود).

مرحله بعد که اساسی‌ترین بخش دستگاه است مبدل آنالوگ به دیجیتال است که به‌جای دامنه ولتاژ ورودی، تعدادی پالس (تعداد متناسب با دامنه) تولید می‌کند و به طبقه سنجش می‌دهد. طبقه سنجش یک شمارشگر است که پالسهای تولید شده (در یک محدوده معین) را می‌شمرد و پس از تنظیم و کد کردن حاصل، سیگنالهایی را به صفحه نمایش می‌فرستد. طبقه نمایش همانطور که گفته شد از لامپهای ۷ تکه یا LCD تشکیل می‌شود.

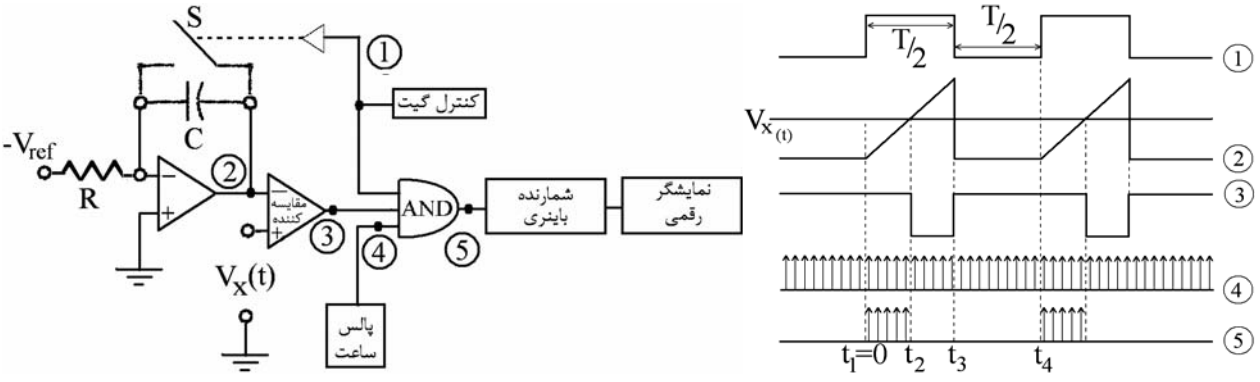
بنابراین می‌توان گفت وجود A/D قبل از سیستم سنجش تفاوت اصلی دستگاههای آنالوگ با دیجیتال را باعث می‌شود و اصولاً مسیر اندازه‌گیری و ماهیت دستگاه را عوض می‌کند.

مبدلهای A/D تنوع زیادی دارند که از آن جمله است: ❋ مبدل موازی (همزمان) ❋ مبدل پله‌ای ❋ مبدل با روش تقریبات متوالی ❋ مبدل با روش تبدیل ولتاژ به زمان (یک شیبی) ❋ مبدل با روش دو شیبی ❋ مبدل با روش تبدیل ولتاژ به فرکانس

در مالتیمترهای دیجیتال اغلب از مبدلهای دو شیبی استفاده می‌شود. در اینجا نحوه عملکرد مبدل یک شیبی و دو شیبی همچنین مبدل ولتاژ به فرکانس را مختصراً توضیح می‌دهیم.

۴-۱۴) مبدل A/D یک شیبی

شکل (۱۴-۲) نمایش مداری و زمانی این مبدل را به صورت ساده شده نشان می‌دهد.



شکل (۱۴-۲) اساس کار یک مبدل A/D زمانی (یک شیبی)

چنانکه دیده می‌شود، از ولتاژ مرجع ثابت (V_{ref}) انتگرال گرفته می‌شود و نتیجه (V_2) که به صورت یک شیب می‌باشد (با شیب $\frac{+V_{ref}}{R_1C}$) توسط یک مقایسه‌کننده با ولتاژ ورودی تحت اندازه‌گیری (V_x) مقایسه می‌گردد. خروجی مقایسه کننده تا زمانی که ولتاژ V_2 به V_x نرسیده است دارای منطق یک بوده و لذا به گیت AND اجازه ورود پالس به شمارنده را می‌دهد. شمارش تا لحظه رسیدن V_2 به V_x ادامه خواهد داشت (لحظه t_2) و سپس متوقف می‌گردد. اگر فرض کنیم از لحظه $t=0$ تا $t=t_2$ تعداد N پالس شمارش شده باشد می‌توان نوشت:

$$V_x = \frac{V_{ref}}{RC}.t_2 = \frac{V_{ref}}{RC}.\frac{N}{f_{clock}} \qquad \Rightarrow N = \frac{RC\cdot V_x}{V_{ref}} f_{clock} \qquad (۱-۱۴)$$

این روابط نشان می‌دهد که مراحل تبدیل عبارتند از تبدیل ولتاژ ورودی به زمان و سپس اندازه‌گیری زمان توسط شمارش پالس. همچنین اثر فرکانس ساعت، ظرفیت خازن و مقاومت ورودی انتگرالگیر در عدد نهایی از روابط فوق قابل رویت است.

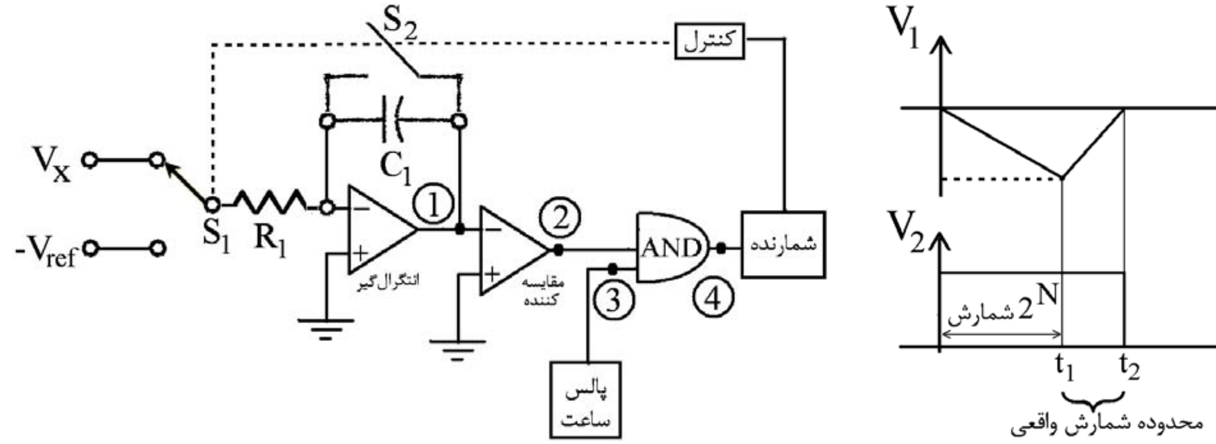
بدیهی است تعداد پالسها (یعنی N)، با فرض ثابت بودن R، C، V_{ref} و f_{clock} ، رابطه مستقیم با دامنه V_x دارد. یعنی: $N \propto V_x$ (۱۴-۲) بنابراین منظور ما از تبدیل A/D برآورده شده است.

یکی از مشکلات این مبدل حساسیت به نویز یا تداخل همراه با سیگنال ورودی است محدودیت دیگر روش این است که سیگنال ورودی فقط باید مثبت باشد.

۵-۱۴) مبدل A/D دو شیبی

گفته شد که در روش یک شیبی سیگنال ورودی در یک لحظه خاص از زمان با سیگنال تولید شده (مثلثی) مقایسه می‌شود و این اثر نویز و تداخل را زیاد می‌کند. در روش دو شیبی از سیگنال ورودی انتگرال‌گیری می‌شود و

مصونیت ذاتی در برابر نویز ایجاد می‌گردد. با انتخاب دوره زمانی برای انتگرال‌گیری، ایمنی در برابر تداخل فرکانسهای مزاحمی همچون ۵۰ هرتز برق شهر را نیز می‌توان ایجاد نمود. نمایش ساده مداری و زمانی این مبدل در شکل (۱۴-۳) دیده می‌شود.



شکل (۱۴-۳)-مبدل A/D دو شیبی

در ابتدا (t=0)، کلید S_1 به ولتاژ آنالوگ ورودی V_x وصل و کلید S_2 باز می‌شود بدینترتیب انتگرال‌گیری از ولتاژ ورودی آغاز می‌شود این انتگرالگیری تا لحظه‌ای که 2^N پالس شمارش شود، ادامه پیدا می‌کند. ولتاژ خروجی انتگرال‌گیر در این دوره برابر است با:

$$V_1 = \frac{-1}{R_1C_1}\int_0^t V_x dt = \frac{-V_x t}{R_1C_1} = \frac{-V_x t}{\tau} \qquad (۱۴-۳)$$

(که در آن $\tau = R_1C_1$ ثابت زمانی انتگراتور بوده و V_x در طول زمان انتگرال‌گیری ثابت فرض می‌شود.)

شمارنده باینری N بیتی نیز همزمان با شروع انتگرال‌گیری به دلیل باز بودن گیت AND با فرکانس کلاک شروع به شمارش می‌کند و پس از 2^N پالس یعنی در لحظه $t_1 = 2^N T_{clock}$ خروجی فیلیپ فلاپ تغییر وضعیت داده و خود به خود منجر می‌شود که کلید S_1 از V_x به $-V_{ref}$ تغییر وضعیت پیدا کند. درست در همین لحظه شمارنده باینری که به انتهای خودش رسیده به موقعیت صفر بر می‌گردد. حال خازن انتگراتور در جهت معکوس شروع به شارژ شدن می‌کند و ولتاژ نقطه ۱ در هر زمان t در این دوره عبارت خواهد بود از:

$$V_1 = \frac{\left(-V_x 2^N T_c\right)}{\tau} + V_{ref}\,\frac{\left(t - t_1\right)}{\tau} \qquad (۱۴-۴)$$

شمارنده تا زمانی که $V_1 \rangle 0$ است به شمارش خود ادامه می‌دهد در زمان t_2، $V_1 = 0$ و مقایسه کننده گیت را بسته و شمارش متوقف می‌گردد. با صفر قراردادن V_1 می‌توان رابطه بین خروجی شمارنده و ولتاژ ورودی V_x را بدست آورد:

$$V_1 = 0 \Rightarrow {V_x 2^N T_c}/{\tau} = {V_{ref}\left(t_2 - t_1\right)}/{\tau} \Rightarrow \left(t_2 - t_1\right) = {V_x 2^N T_c}/{V_{ref}} \qquad (۱۴-۵)$$

با فرض اینکه در طول زمان t_1 تا t_2 شمارنده تا عدد n شمارش کرده باشد می‌توان نوشت:

$$\left(t_2 - t_1\right) = nT_c \qquad (۱۴-۶)$$

و با ترکیب دو رابطه اخیر داریم:

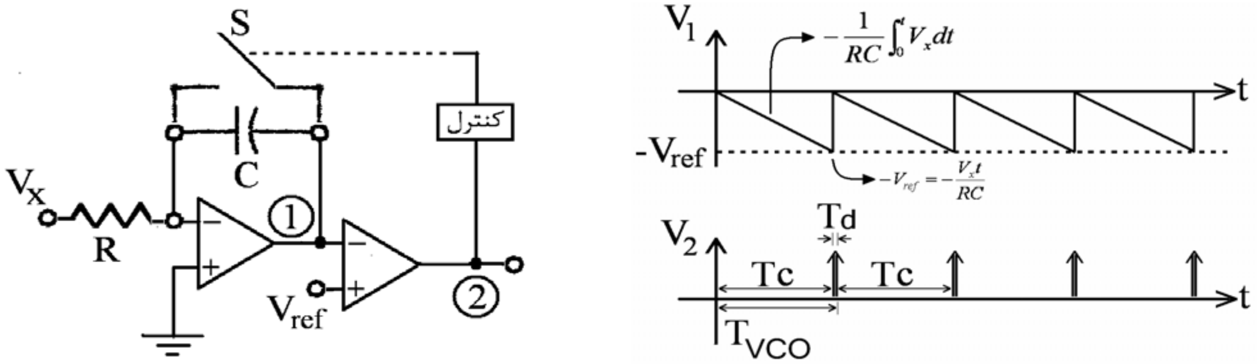
$$nT_c = V_x 2^N\, {T_c}/{V_{ref}} \qquad (۱۴-۷)$$

$$\Rightarrow n=\frac{2^N}{V_{ref}}V_x=K\cdot V_x \qquad (۸-۱۴)$$

ملاحظه می‌شود که به علت دو انتگرال‌گیری متوالی از V_x و V_{ref} عدد حاصل (n) مستقل از ثابت زمانی و همچنین فرکانس ساعت است و تنها عامل در درستی عمل تبدیل، ضریب حرارتی ولتاژ مرجع می‌باشد.

۱۴-۶) مبدل A/D با تبدیل ولتاژ به فرکانس

این مبدلها را VCO (نوسان‌ساز کنترل شده با ولتاژ می‌نامند) و یک مدار ساده آن در شکل (۱۴-۴) نشان داده شده است.



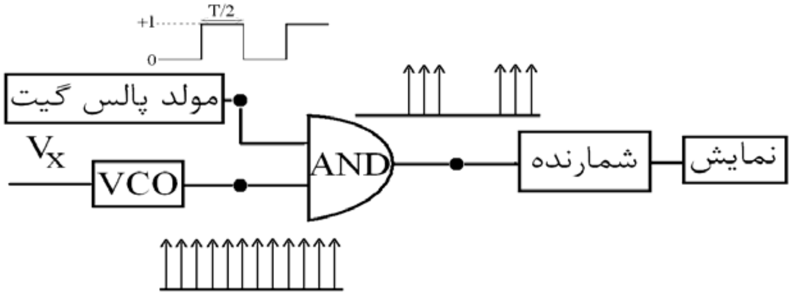
شکل (۱۴-۴) یک VCO ساده

ولتاژ ورودی پس از انتگرال‌گیری وارد مقایسه کننده شده و در آنجا با یک V_{ref} مقایسه می‌شود. به محض رسیدن خروجی انتگراتور به ولتاژ مرجع، مقایسه کننده تغییر وضعیت داده و خازن C از طریق کلید S و فرمان کنترل سوئیچ به مدت T_d ثانیه تخلیه کامل می‌شود. پس از زمان t_d کلید S مجدداً باز شده و عمل انتگرال‌گیری تکرار می‌شود. با فرض $T_d \langle\langle T_c$ می‌توان دید که رابطه خطی بین فرکانس پالس‌های VCO با ولتاژ ورودی V_x به صورت زیر برقرار است.

$$1/T_{VCO}=\frac{V_x}{R\cdot C\cdot V_{ref}} \qquad (۹-۱۴)$$

حال اگر VCO را در یک مدار همانند شکل (۱۴-۵) بکار بریم و عرض پالسهای گیت (T_G) معلوم باشد و تعداد پالسهایی که در دوره زمانی $\frac{T_G}{2}$ شمارش خواهند شد n بنامیم خواهیم داشت:

$$n=\frac{T_G}{2T_{VCO}}=\frac{T_G V_x}{2\tau V_{ref}} \qquad (۱۰-۱۴)$$



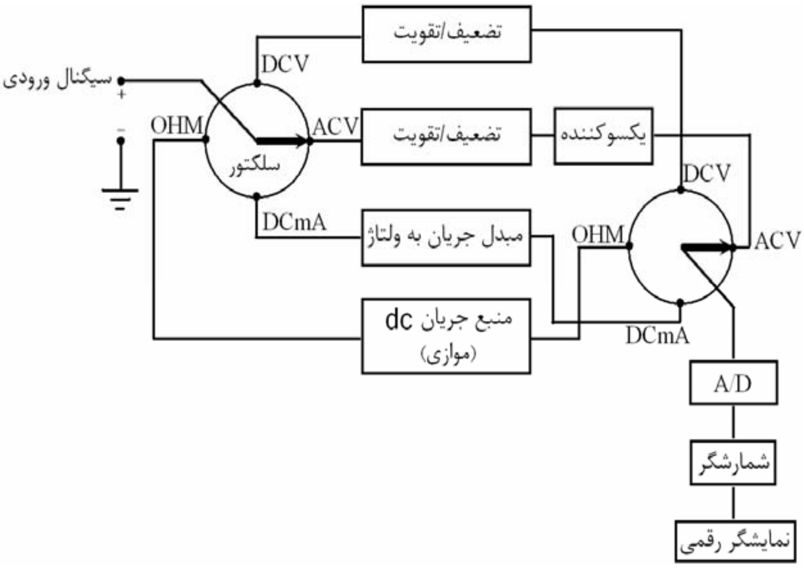
شکل (۱۴-۵)-یک ولتمتر دیجیتال با استفاده از VCO

و چون عرض پالس گیت ثابت و معلوم است. پس شمارش متناسب است با فرکانس خروجی VCO که آنهم متناسب است با ولتاژ مجهول. یعنی:

$n = kV_x$ (۱۱−۱۴)

۷-۱۴) بلوک دیاگرام یک مالتیمتر دیجیتال

همانطور که گفته شد همه کمیتهای الکتریکی مورد سنجش به یک ولتاژ dc آنـالوگ تبـدیل مـی‌شـوند و آن ولتاژ dc بوسیله یک مبدل آنالوگ به دیجیتال (یک شیبی، دو شیبی و یا VCO) به تعـدادی پـالس تبـدیل مـی‌شـود. شمارشگر دیجیتال تعداد پالسها را می‌شمرده از آنجا ولتاژ dc و سپس کمیت اولیه تعیین می‌شود.



شکل (۱۴-۶) بلوک دیاگرام مالتیمتر دیجیتال

فصل پانزدهم – حسگرها و مبدلها

۱۵-۱) معرفی

حسگرها و مبدلها اولین طبقه در یک سیستم اندازه‌گیری الکتریکی هستند. تبدیل کمیات فیزیکی مختلف به سیگنال الکتریکی توسط حسگرها و مبدلها انجام می‌شود. از دیدگاه انرژی، حسگرها، مبدلهای انرژی هستند و ورودی آنها می‌تواند هر یک از انواع انرژی (تشعشعی، مکانیکی، گرمایی، الکتریکی، مغناطیسی و یا شیمیایی) باشد. خروجی حسگر هم می‌تواند هر یک از انرژیهای پیشگفته باشد. در مبحث اندازه‌گیری الکتریکی تنها آن دسته ازحسگرها که خروجی نهایی آنها انرژی الکتریکی است مورد نظر هستند.

۱۵-۲) مبدلهای جابجایی

جابجایی یکی از کمیتهای بسیار مهم و کاربرد جهت اندازه‌گیری بشمار می‌رود. از جمله این کاربردها می‌توان به سیستم‌های سرو کنترل (Servo Control)، سیستمهای کنترل روباتیک حرکت دیسک خوان‌ها و غیره اشاره کرد. همچنین بسیاری از کمیتهای فیزیکی دیگر نظیر نیرو، فشار، دما و ... قابل تبدیل به کمیت جابجایی بوده و لذا اندازه‌گیری این کمیت از اهمیت خاصی برخوردار است. روشهای مختلفی جهت اندازه‌گیری جابجایی وجود دارد که به چند مورد اشاره می‌شود.

۱۵-۲-۱) پتانسیومترها

یک پتانسیومتر یک مبدل با یک سنسور جابجایی است که کمیت ورودی را مستقیماً به یک مقاومت متغیر تبدیل کرده و در صورت وجود یک منبع جریان ثابت با یک منبع ولتاژ ثابت می‌توان ولتاژ یا جریان متغیر را در اثر تغییر در جابجایی بدست آورد.

جابجایی خطی با پتانسیومتر خطی و جابجایی زاویه‌ای با پتانسیومتر دایره‌ای قابل اندازه‌گیری است

شکل (۱۵-۱)-ساختمان داخلی انواع پتانسیومترها

قدرت تفکیک پتانسیومترهای سیم‌پیچی شده بستگی به تعداد دور آنها دارد.

مثال ۱۵-۱- قرار است موفقیت یک متحرک که دارای جابجایی حداکثر 0.8m می‌باشد با دقت 0.1Cm اندازه‌گیری شود. جسم متحرک حرکت خود را از یک محور می‌گیرد، بطوریکه با چرخش 250 درجه‌ای محور، حداکثر جابجایی انجام می‌شود. جهت اندازه‌گیری فوق یک پتانسیومتر سیمی 1000 دوری که دارای تغییر زاویه‌ای حداکثر 300 درجه است، در اختیار داریم. آیا می‌توان با این پتانسیومتر خواسته‌های مسئله را تحقق داد؟

حل – نسبت تبدیل شفت برابر است با:

$$\frac{250^\circ}{0.8m} = 3.125 {}^\circ\!/_{cm}$$

(یعنی 3.125° چرخش شفت معادل با 1Cm جابجایی است. حال، می‌بینیم که قدرت تفکیک 0.1Cm برابر است با:

$$0.1Cm \times 3.125 {}^\circ\!/_{cm} = 0.3125^\circ$$

عدد فوق، قدرت تفکیک مورد نیاز برای پتانسیومتر را می‌دهد. از طرفی قدرت تفکیک پتانسیومتر موجود برابر است با:

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

این پتانسیومتر قادر به اندازه‌گیری تغییرات 0.3 درجه است که از مقدار مورد نیاز کمتر بوده و بنابراین، برای کاربرد فوق قابل استفاده می‌باشد.

تبصره – پتانسیومتر (اعم از خطی یا زاویه‌ای) را می‌توان طوری ساخت که رابطه جابجایی میله لغزنده آن با مقاومت حاصله یک رابطه غیرخطی و دقیقاً کنترل شده باشد. به عنوان مثال، می‌توان پتانسیومتر را طوری ساخت که ولتاژ خروجی نسبت به ورودی یک تابع سینوسی از موقعیت زاویه‌ای سر لغزنده دستگاه باشد.

علاوه بر پتانسیومترهای با سیم‌پیچ مقاومتی که خروجی ناپیوسته دارند، پتانسیومترهای پیوسته از جنس فیلم کربنی یا فیلم فلزی، فیلم پلاستیک هادی و یا سرامیک متال (Cermet) ساخته می‌شوند – قدرت تفکیک بسیار بالا (در تئوری قدرت تفکیک ∞) و عدم ایجاد نویز و جهش در ولتاژ خروجی و امکان حرکت سریع لغزنده بر روی مقاومت از مزایای این پتانسیومترها است.

راههای مختلفی جهت اتصال پتانسیومترها به سیستم کنترل وجود دارد. در شکل (۱۵-۲-a) ساده‌ترین اتصال‌های متفاوتی با استفاده از یک منبع ولتاژ dc نشان داده شده است. در این حالت ولتاژ خروجی می تواند بین صفر تا V_s تغییر کند. در شکل (۱۵-۲-b) با استفاده از دو منبع ولتاژ یکسان، می‌توان ولتاژ صفر را هنگامی که لغزنده در موقعیت وسط قرار گرفته ایجاد نمود.

شکل (۱۵-۲)-روشهای استفاده از پتانسیومتر در کنترل موقعیت

یکی از محدودیتهای استفاده از مبدلهای پتانسیومتری، اثر بارگذاری ولتمتری است که V_{out} را (در شکلهای ۱۵-۲-a و b) می‌سنجد. بدیهی است که این ولتمتر باید دارای مقاومت داخلی بسیار بالاتر از مقاومت پتانسیومتر باشد.

۱۵-۲-۲) مبدلهای خازنی

یک خازن ساده متشکل از دو صفحه موازی با مساحت a و یک فاصله d که با عایق با ضریب دی‌الکتریک ε پر شده است، دارای ظرفیت زیر است:

$$C = \varepsilon A/_{d} \qquad (۱۵-۱)$$

بنابراین ظرفیت C با تغییر هر یک از پارامترهای سه‌گانه ε، A و d قابل تغییر است. این ایده به صورت شماتیک در شکل (۱۵-۳) ارائه شده است.

شکل (۱۵-۳) روشهای تبدیل جابجایی به ظرفیت خازنی متغیر

بدیهی است اگر جابجایی x باعث جدایی صفحات گردد در اینصورت $C=\varepsilon\dfrac{A}{d+x}$ خواهد شد. یعنی رابطه بین C و x غیرخطی است. برای حل این مشکل از روش تفاضلی استفاده می‌شود. این روش در شکل (۱۵-۴) دیده می‌شود.

شکل (۱۵-۴)-روش تفاضلی برای تبدیل جابجایی به ظرفیت خازنی متغیر با رعایت نسبت خطی

a- سنسور خازنی تفاضلی b- مدار پل انحرافی جهت تبدیل تغییرات C به ولتاژ الکتریکی

با توجه به شکل (a-۴-۱۵) می‌توان نوشت:

$$C_1=\varepsilon\frac{A}{d+x} \quad \text{و} \quad C_2=\varepsilon\frac{A}{d-x} \qquad (۱۵-۲)$$

و می‌توان ثابت نمود که با استفاده از پل تعادلی شکل (b-۴-۱۵):

$$V_{out}=\frac{V_{in}}{2d}x \qquad (۱۵-۳)$$

تمرین – رابطه فوق را اثبات کنید.

در حالت کلی صفحات خازن را می‌توان با هر شکلی ساخت و توابع مختلفی بین ظرفیت و جابجایی را ایجاد نمود.

۱۵-۲-۳) مبدلهای رلوکتانسی

رلوکتانس (یا مقاومت مغناطیسی) بیانگر رابطه بین نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) و شار (ϕ) در یک مدار مغناطیسی است.

$$R=\frac{Ni}{\phi} \qquad (۱۵-۴)$$

مقاومت مغناطیسی یک سیستم مغناطیسی شامل هسته آهنی و فاصله هوایی، با تغییر فاصله هوایی به شدت تغییر می‌کند.