فصل سوم
دستگاههای اندازه گیری الکترودینامیکی

فصل سوم : دستگاههای اندازه گیری الکترودینامیکی
Electro dynamic Measuring Instrument

- محتوای فصل:

1) معرفی
2) قاب گردان با مغناطیس دائم (PMMC)
3) آهن گردان (MII)
4) دستگاههای الکترودینامیکی
5) دستگاههای فرودینامیکی
6) دستگاههای حرارتی
7) دستگاههای الکترواستاتیکی
8) دستگاههای اندوکسیونی (Induction type)

فصل سوم : دستگاههای اندازه گیری الکترودینامیکی
- معرفی

- گروهی از دستگاههای اندازه گیری الکتریکی که خروجی آنها به صورت حرکت مکانیکی یک قسمت از دستگاه دیده می شود.
- ورودی یک کمیت الکتریکی -------- خروجی کمیت مکانیکی
- دستگاه بین این دو باید ارتباط برقرار نماید.

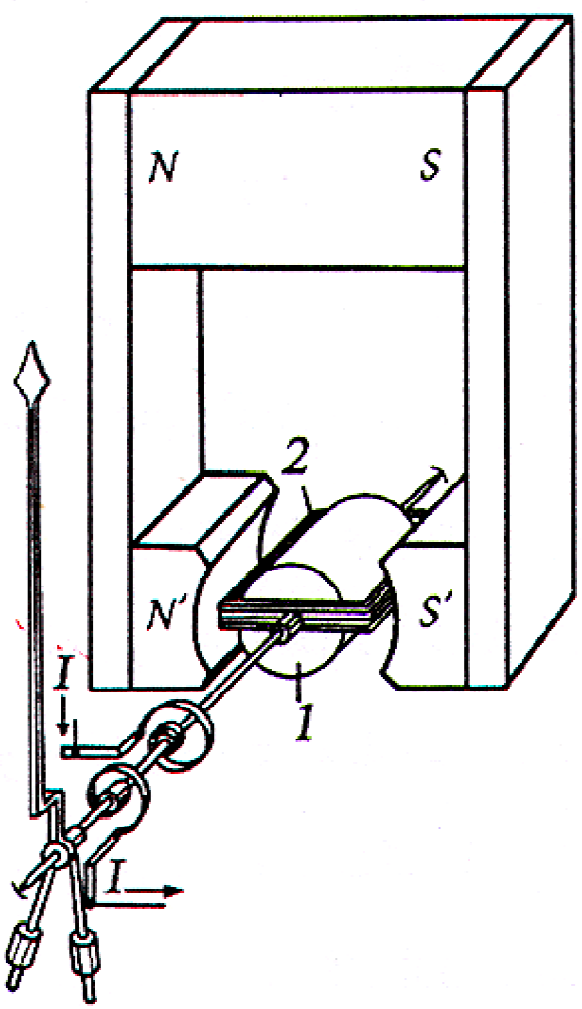
فصل سوم : دستگاههای اندازه گیری الکترودینامیکی
Electro dynamic Measuring Instrument

- محتوای فصل:

1) معرفی
2) قاب گردان با مغناطیس دائم (PMMC)
3) آهن گردان (MII)
4) دستگاههای الکترودینامیکی
5) دستگاههای فرودینامیکی
6) دستگاههای حرارتی
7) دستگاههای الکترواستاتیکی
8) دستگاههای اندوکسیونی (Induction type)

– قاب گردان (گالوانومتر)

- اساس کار نیروی وارد بر سیم حاملل جریان در میدان مغناطیسی است



- یک هسته فرومغناطیس (شماره ۱) بین دو قطب استوانه ای مغناطیس دائم قرار دارد. در صورت زیاد بودن ضریب نفوذ پذیری ماده از فاصله هوایی میتوان صرفنظر نمود تا میدان در فاصله هوایی یکنواخت باشد.

قسمت متحرک:

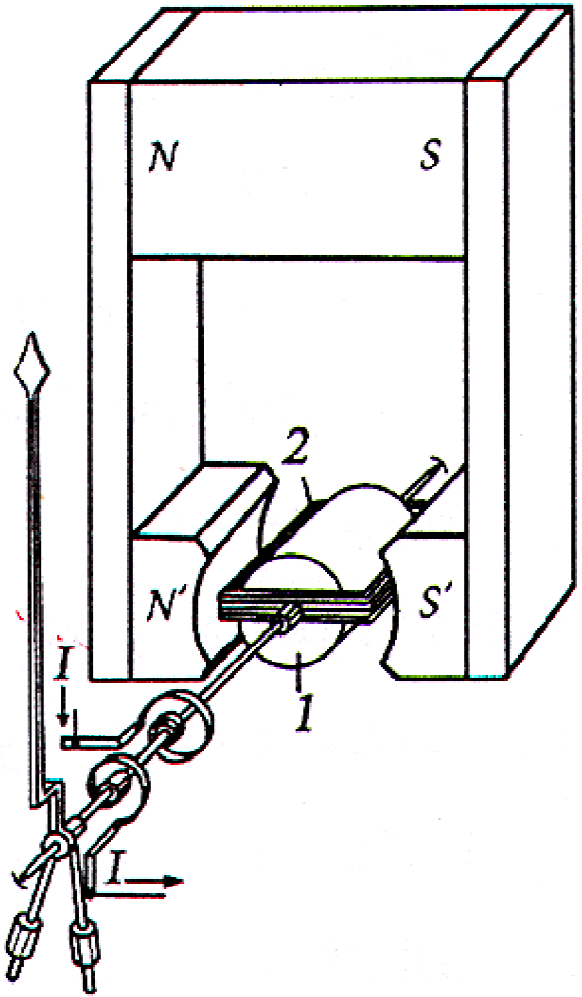
یک سیم پیچ به صورت قاب گردان مستطیلی شکل بر روی محور و دور هسته قرار دارد.

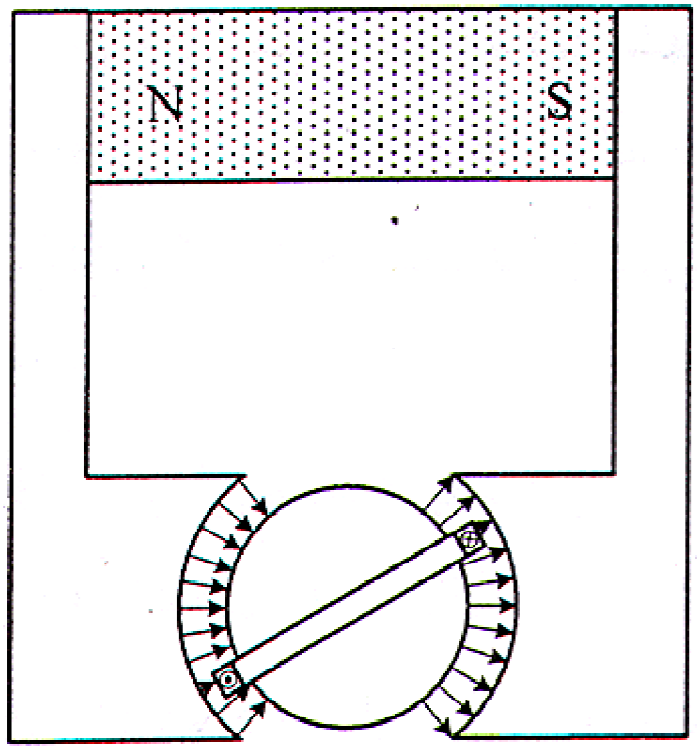
- به عنوان گشتاور مقاوم از دو فنر موازی مارپیچ استفاده شده است.

برای اتصال قاب به مدار فنرها رسانا انتخاب شده و طوری قرار دارند که جریان از یکی وارد، وارد قاب شده و از فنر دیگر خارج می شود.

– قاب گردان (گالوانومتر)

- دو وزنه به صورت خارج از مرکز در پشت عقربه طوری قرار دارند که محور نسبت گشتاور حاصل از وزن عقربه، وزنه ها و قاب در تعادل قرار دارد.
- در تصویر بالای دستگاه میدان مغناطیسی نشان داده شده است.

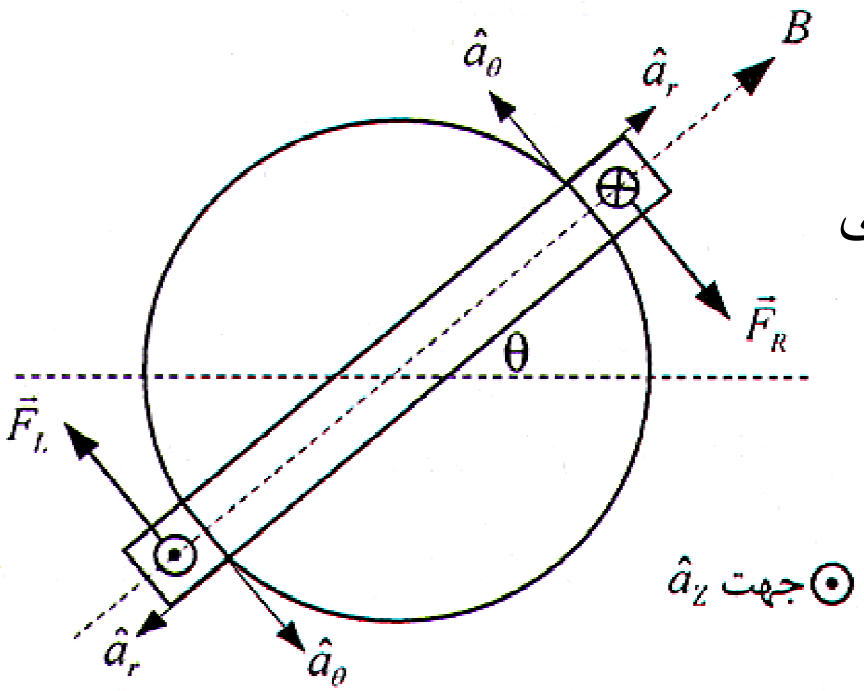




الف– مدار مغناطیسی و نمایش توزیع میدان مغناطیسی

– قاب گردان (گالوانومتر)

- محاسبه گشتاور محرک:



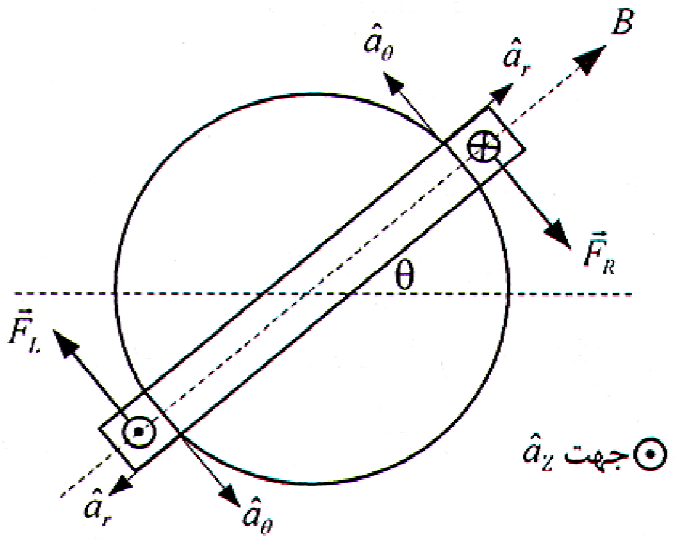
ب- قسمت متحرک دستگاه

- بر اساس شکل نشان داده شده جریان الکتریکی از یک جهت قاب وارد و از جهت دیگر خارج شده
  - جهت میدان همواره B خواهد بود.
  - پس بر اساس قانون لنز بر دو ضلع چپ و راست قاب، حامل جریان بوده و به آنها نیرو وارد می شود. و آن نیرو برای سمت راست:

$$\vec{F}_R = Ni\left(-l\hat{a}_Z\right)\times\left(B\hat{a}_r\right)$$
$$= -\left(Ni_c l\, B\right)\hat{a}_\theta$$

i جریان ورودی، l طول صلع داخل میدان، B میدان مغناطیسی، N تعداد حلقه

– قاب گردان (گالوانومتر)



ب- قسمت متحرک دستگاه

- محاسبه گشتاور محرک:
- برای نیروی سمت چپ:

$$\vec{F}_L = Ni\left(l\hat{a}_z\right)\times\left(-B\hat{a}_r\right) = -\left(Ni_c lB\right)\hat{a}_\theta$$

- پس گشتاور حول مرکز هسته بدین صورت خواهد بود:

$$\vec{T}_d = r\hat{a}_r \times \vec{F}_R + r\hat{a}_r \times \vec{F}_L = -\left(2Nri_c lB\right)\hat{a}_Z$$

$$T_d = \left(2NlrB\right)i_c = \left(NBA\right)i_c$$

- یعنی مقدار گشتاور:
- پس با تبدیل ثابتها به یک ضریب k:

$$NBA = K_d \Rightarrow T_d = K_d i_c$$

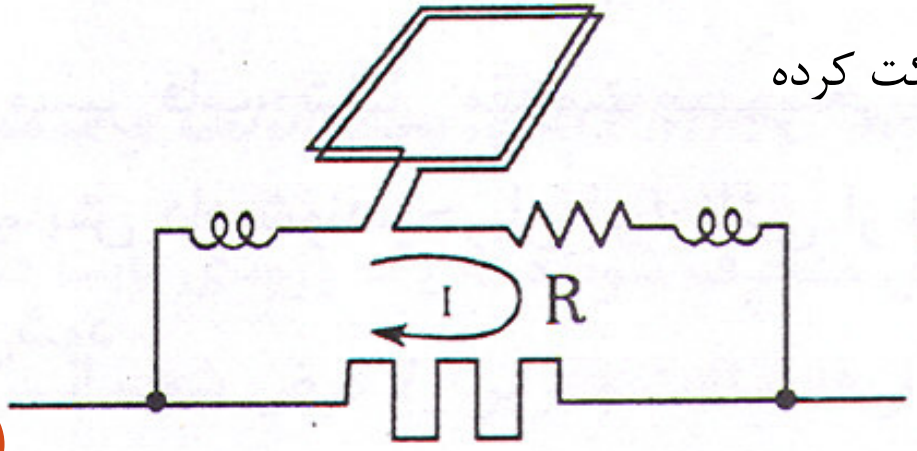
– قاب گردان (گالوانومتر)

- گشتاور مقاوم در دستگاه PMMC:

- این گشتاور توسط دو فنر موازی که جمعا معادل یک فنر خواهد بود ایجاد میشود. این گشتاور معمولا خطی است.

$$T_C = K_C \theta$$

- گشتاور مستهلک کننده در PMMC:
- گشتاور مستهللک کننده در PMMC از نوع الکترومغناطیسی است به طوری که یا به صورت القا در قاب ایجاد میشود و یا به صورت القا در سیم پیچ مجزا.
- برای القا در قاب :
  - یک مدار حلقه بسته همراه قسمت گردان حرکت کرده و نیروی محرکه ای متناسب با سرعت چرخش ایجاد میکند که این نیرو محرکه یک جریان در همان مدار برقرار کرده که طبق قانون لنز با حرکت مخالفت مینماید.



- برای نیروی محرکه داریم :

$$e = 2N\,(Blu) \rightarrow 2NBl\,(r\omega) \rightarrow (2nBlr)\frac{d\theta}{dt}$$

- مقاومت کل مسیر برابر مجموع مقاومتهای قاب و فنرها (Rc) + مقاومت شنت (Rsh)

$$I_D = \frac{e}{R_C + R_{sh}}$$

- و برای گشتاورمستهلک کننده خواهیم داشت:

$$F_D = NBLI_D = \frac{2N^2B^2L^2r}{R_C + R_{sh}}\frac{d\theta}{dt}$$

$$T_D = 2(r \times F_D) = \ldots = K_D\frac{d\theta}{dt}$$

– قاب گردان (گالوانومتر)

- در صورت نبودن مقاومت شنت، میتوان از یک حلقه اتصالل کوتاه شده استفاده کرد و مقدار مقاومت شنت را صفر در نظر گرفت: $Rsh=0$ و $N=1$

- نکته : در اینجا از Ldi/dt به دلیل کم بودن L و نیز کم بودن سرعت حلقه صرف نظر شده است.

- e حاصله در حالت پایدار صفر است و فقط در رفتار دینامیکی موثر است و ایجاد میرایی می کند.

- پاسخ دستگاه به ورودی ثابت و ورودی متغیر :

- اگر جریان ثابت از دستگاه عبور کند (Ic ثابت):

$$T_d = K_d I_C$$

$$\theta = \frac{T_d}{K_C} = \frac{K_d}{K_C} I_C$$

- که S_I را حساسیت به جریان میگوییم:

$$S_I = \frac{K_d}{K_C}$$

- برای ورودی متغیر:

$$T_d = 2NlrB(\theta) i_c$$
$$= k(\theta) i_c$$

$$\theta = \frac{1}{k_c}[T_d(t)]_{av}$$
$$= \frac{k(\theta)}{k_c}[i_c(t)]_{av}$$

- خطاهای PMMC:
  - اصطکاک ، میدان مغناطیسی خارجی ، خطای حرارتی و ...
  - هرکجا که یک قطعه متحرک در کنار قطعه ثابت باشد حتما اصطکاک وجود دارد.
  - میزان اصطکاک بر حسب FSD بر وزن متحرک بیان میگردد (Full scale Deflection Torque) : که هر چه وزن / FSD بیشتر باشد، اثر اصطکاک کمتر خواهد بود.

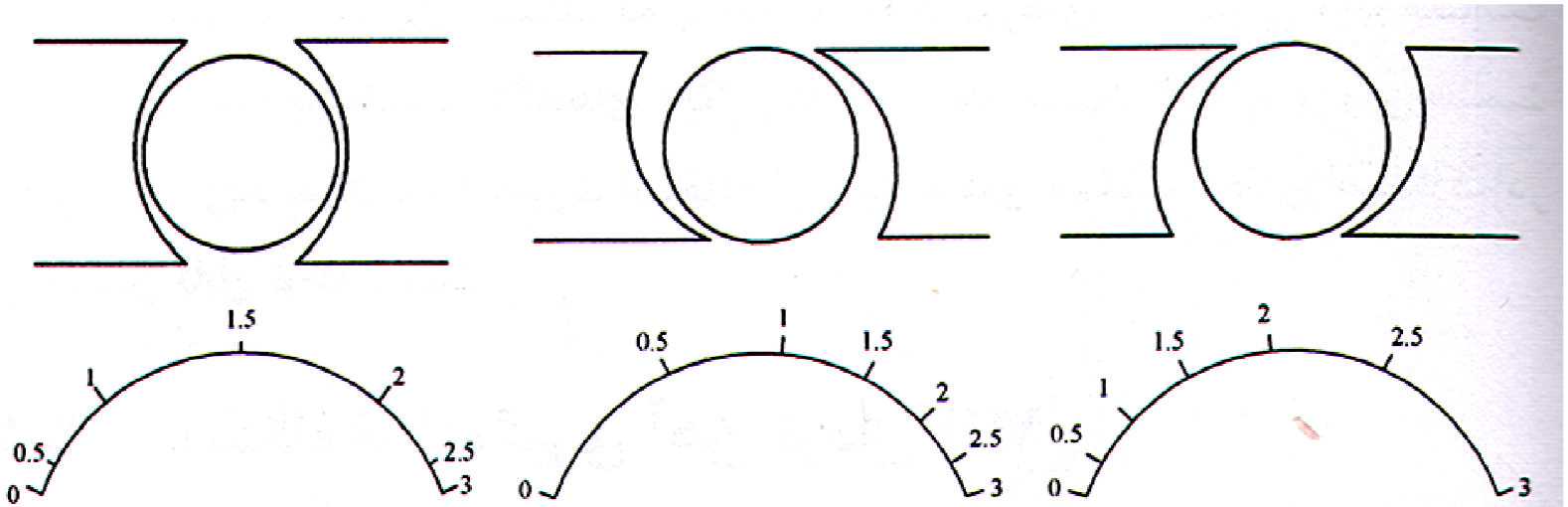
  - پس هر چه وزن بیشتر، اثر اصطکاک بیشتر
  - هرچه گشتاور FSD بیشتر اثر اصطکاک کمتر
- منبع خطا در PMMC معمولا خطای حرارتی است:
  - هرچه دما بیشتر باشد => سختی فنرها، کمتر / Kc کمتر / جهت این خطا مثبت است!!
  - گرم شدن مغناطیس دائم : کاهش B => جهت این خطا منفی

  - به دلیل B قوی موجود تقریبا میدان مغناطیسی خارجی اثری ندارد!!
  - به دلیل نسبت گشتاور بر وزن زیاد، اصطکاک نیز ناچیر است.

– قاب گردان (گالوانومتر)

- گاها نیاز است تا درجه بندی دستگاه خطی نباشد.

- برای این کار فاصله هوایی را به صورت غیر خطی ایجاد مینمایند:



شکل۳-۴ ایجاد میدان غیریکنواخت در فاصله هوایی برای کنترل شکل درجه‌بندی

فصل سوم : دستگاههای اندازه گیری الکترودینامیکی
Electro dynamic Measuring Instrument

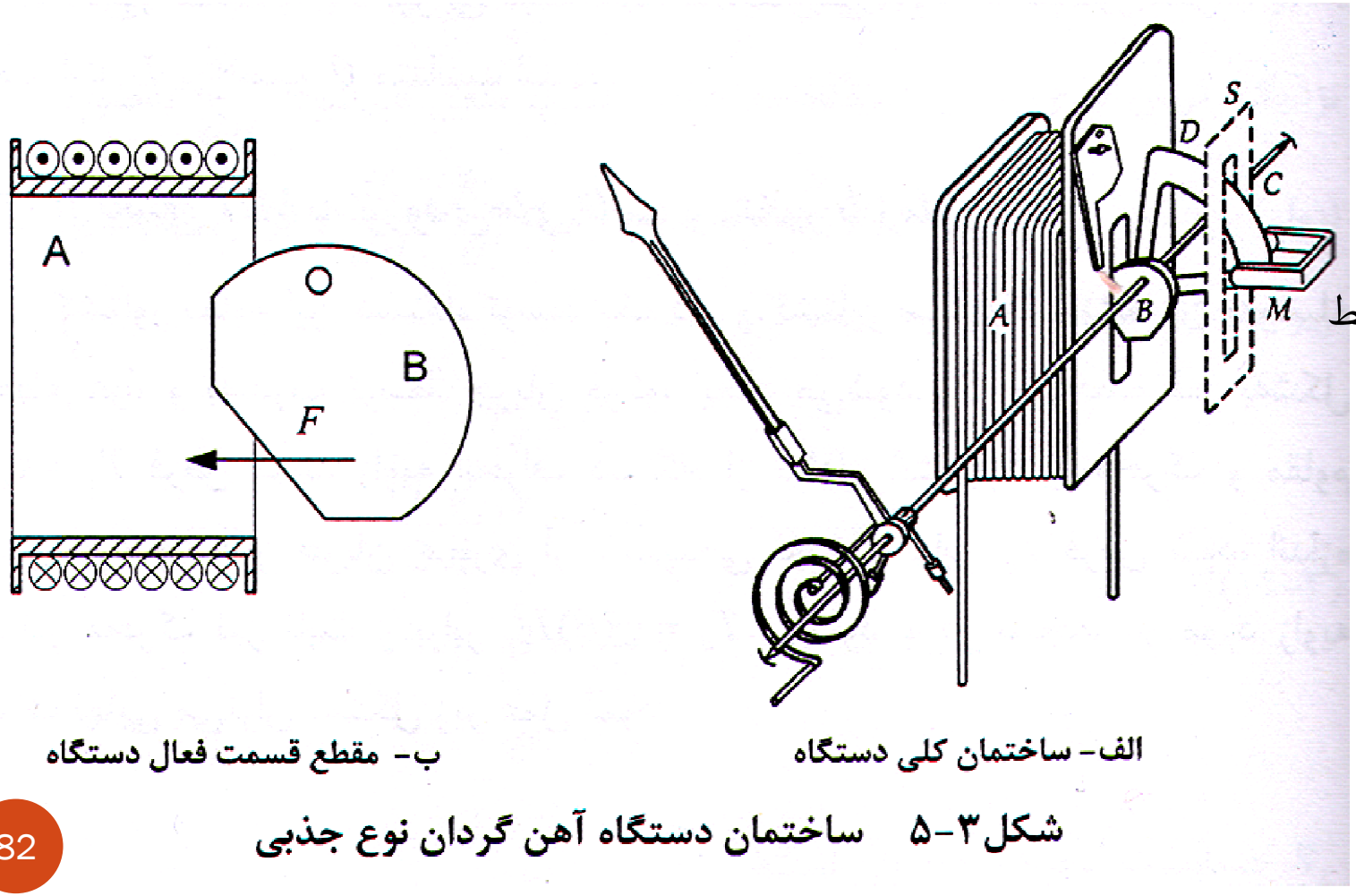
- محتوای فصل:

1) معرفی
2) قاب گردان با مغناطیس دائم (PMMC)
3) آهن گردان (MII)
4) دستگاههای الکترودینامیکی
5) دستگاههای فرودینامیکی
6) دستگاههای حرارتی
7) دستگاههای الکترواستاتیکی
8) دستگاههای اندوکسیونی (Induction type)

فصل سوم : دستگاههای اندازه گیری الکترودینامیکی
- آهن گردان

- این دستگاه بر اثر یک یا چند قطعه فلز فرومغناطیس که در میدان قرار دارند کار میکند. این اثر میتواند به صورت جذبی و یا دفعی باشد.
- در نتیجه دو نوع دستگاه: نوع جذبی و نوع دفعی

- در نوع جذبی یک پولک آهنی به صورت خارج از مرکز روی محور نصب شده و توسط میدان حاصل از جریان داخل سیم پیچ جذب میشود.



ب- مقطع قسمت فعال دستگاه

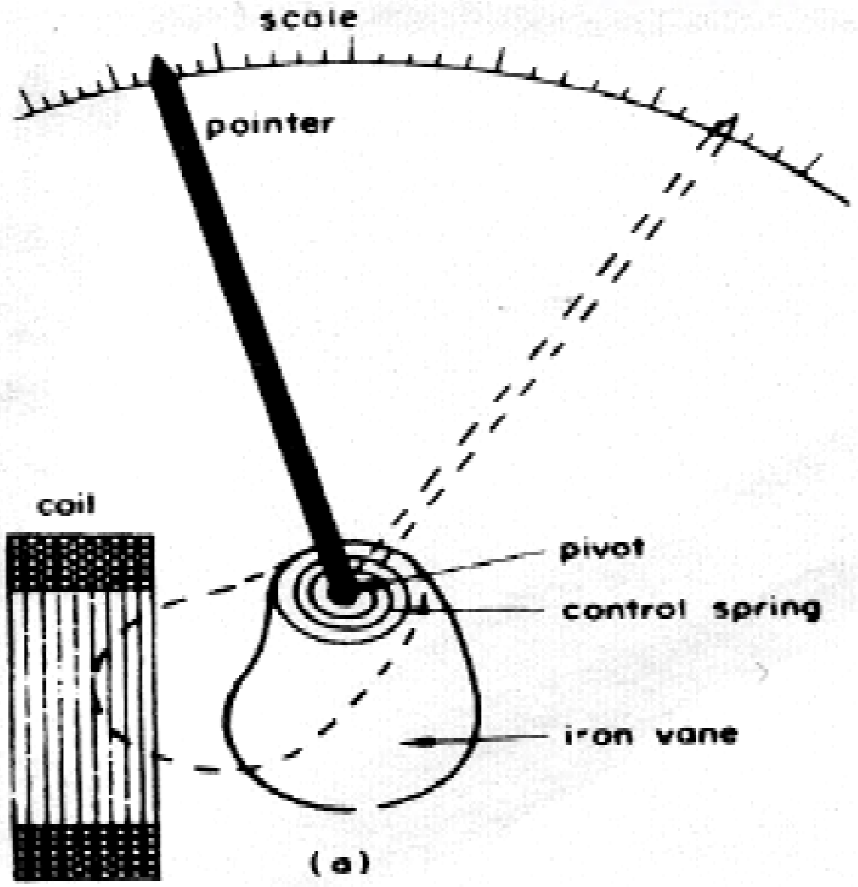
الف- ساختمان کلی دستگاه

شکل۳-۵ ساختمان دستگاه آهن گردان نوع جذبی

- جهت نیروی تولید شده مستقل از جهت جریان است.
- گشتاور محرک :

کار مجازی آن (کو انرژی) :

$$W_f'(\theta,i)=\frac{1}{2}L\,i^2$$



پس گشتاور :

$$T_d=\frac{\partial W_f'(\theta,i)}{\partial\theta}=\frac{1}{2}\frac{dL}{d\theta}i^2$$

I جریان عبوری

L اندوکتانس سیم پیچ و تتا زاویه محور

- پاسخ MII به ورودی ثابت و ورودی متغیر:

- نکته : گشتاور مقاوم در این دستگاه به وسیله فنر ایجاد می شود.
- گشتاور مستهلک کننده به وسیله هوا ایجاد می شود.
- برای ایجاد تعادل در آخرین زاویه گشتاور محرک باید با گشتاور مقاوم برابر باشد.

$$T_C = K_C \theta$$

$$T_d = g(\theta) {I_C}^2$$

$$T_d = T_C$$

$$\frac{1}{2}\frac{dL}{d\theta} {I_C}^2 = K_C \theta$$

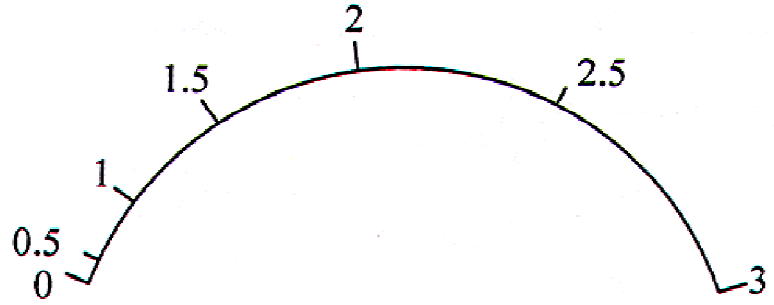
- پس خواهیم داشت: $$\theta = f\ ({I_C}^2)$$
- گشتاور محرک و زاویه انحراف تابعی از جریان به توان دو و مستقل از جهت آن!!

- پاسخ MII به ورودی ثابت و ورودی متغیر: ادامه ...
- شکل تابع به $dL/d\theta$ بستگی دارد. اگر $dL/d\theta$ عدد ثابت باشد:

$$\frac{1}{2}\frac{dL}{d\theta}I_C^{\,2} = K_C\theta \qquad \Rightarrow \frac{1}{2}KI_C^{\,2} = K_C\theta$$

$$\Rightarrow \theta = \frac{K}{2K_C}I_C^{\,2}$$

- یعنی درجه بندی دستگاه به صورت مجذوری خواهد بود !! $\theta = kI^2$



شکل۳-۶ مقیاس دستگاه آهن گردان در حالت مجذوری

- همیشه سعی میشود درجه بندی دستگاهها به صورت خطی باشد:

- پس بهتر است dL/dθ متغیری از θ باشد که توان Ic حذف گردد:

$$\frac{dL}{d\theta} = \frac{k}{\theta} \Rightarrow \frac{1}{2}\frac{k}{\theta} I_C{}^2 = K_C \theta$$

$$\frac{k}{2k_C} I_C{}^2 = \theta^2$$

- پس اگر حساسیت دستگاه S1 باشد : (S1 یک عدد ثابت است.)

$$\theta = S_1 I_C$$

- که :

$$S_1 = \frac{\Delta\theta}{\Delta I_C} = \frac{d\theta}{dI_C}$$

- یادآوری: تعریف حساسیت، $S = \frac{d\theta}{dI}$
- که با فرض ثابت بودن $dL/d\theta$ مشتق گرفتن از رابطه : $\frac{1}{2}\frac{k}{\theta} I_C{}^2 = K_C \theta$
- خواهیم داشت: $S = \frac{d\theta}{dI_C}$
- یعنی : $S = \frac{k}{K_C} I_C$
- پس حساسیت دستگاه با جریان متناسب است.
- یعنی هرچه جریان بیشتر شود، حساسیت بیشتر
- یعنی هرچه زاویه دستگاه بیشتر، فاصله درجات بیشتر !!

- حال اگر : $\frac{dL}{d\theta} = k$
- حساسیت عددی ثابت خواهد بود!!

- اگر جریان متناوب باشد :
- با فرض : $\frac{dL}{d\theta} = \frac{k}{\theta}$

$$\theta = \frac{1}{k_c}\left[T_d(t)\right]_{av}$$

$$= \frac{1}{k_c}\left[\frac{1}{2}\frac{k}{\theta} i^2(t)\right]_{av}$$

$$\theta = \frac{1}{\theta}\frac{k}{2k_c}\left[i^2(t)\right]_{av} \qquad \theta^2 = \frac{k}{2k_c}\left[i^2(t)\right]_{av}$$

- یعنی :

$$\theta = \sqrt{\frac{k}{2k_C}}\sqrt{[i^2(t)]_{av}} = k\,I_{rms}$$

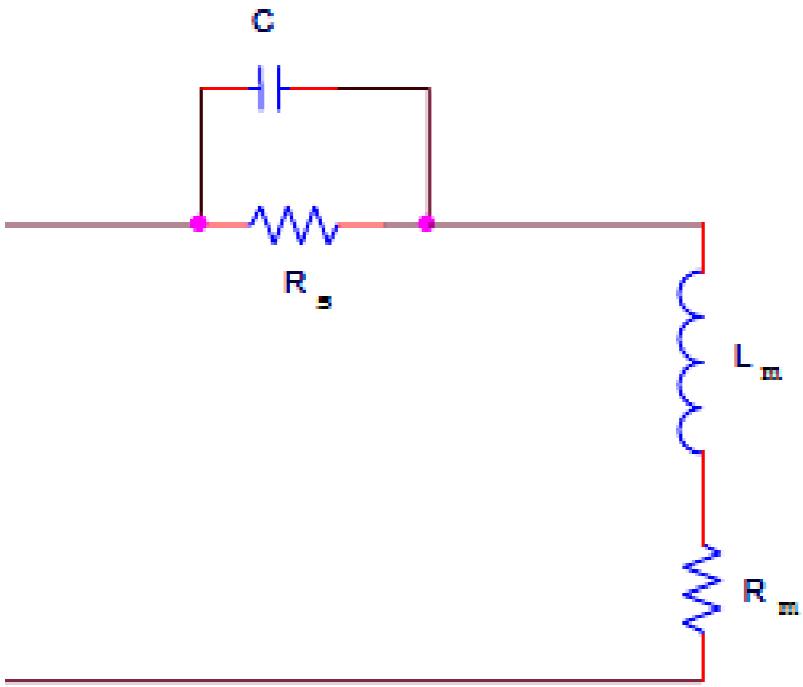
پس true rms meter است.

نکات:

۱- به دلیل تغییرات μ هسته با فرکانس، تلفات هیسترزیس و فوکو (تابع فرکانس) با وجود اینکه روابط نشان نمی دهند، قرائت این دستگاه به فرکانس وابسته است. لذا برای 50Hz (یا 60Hz) آن را کالیبره می کنند و فقط برای فرکانسهای همان حوالی(25-100Hz)قابل استفاده است.

۲- صحت خوبی ندارد ولی ارزان قیمت است و لذا در تابلوهای برق معمولاً از آن استفاده می شود. خیلی جان سخت هست (بر خلاف گالوانومتر دارسونوال) .

۳- برای تبدیل آن به ولت متر، به نظر می رسد سری کردن یک مقاومت با آن مناسب باشد ولی درفرکانسهای حدود 50Hz ، اندوکتانس سلف قابل ملاحظه است و لذا اگر مقاومت با آن سری کنیم، امپدانس مجموعه درفرکانسهای مختلف متفاوت است و $V = R_s I$ نخواهد بود. برای رفع این مشکل یک خازن هم با مقاومت ضرب کننده موازی می کنند.



- با فرض آنکه: $R_S >> R_m , R_S >> \frac{1}{C\omega}$
- میتوان نشان داد امپدانس با Rs برابر است:

$$|Z| = R_S$$

- پس باید :

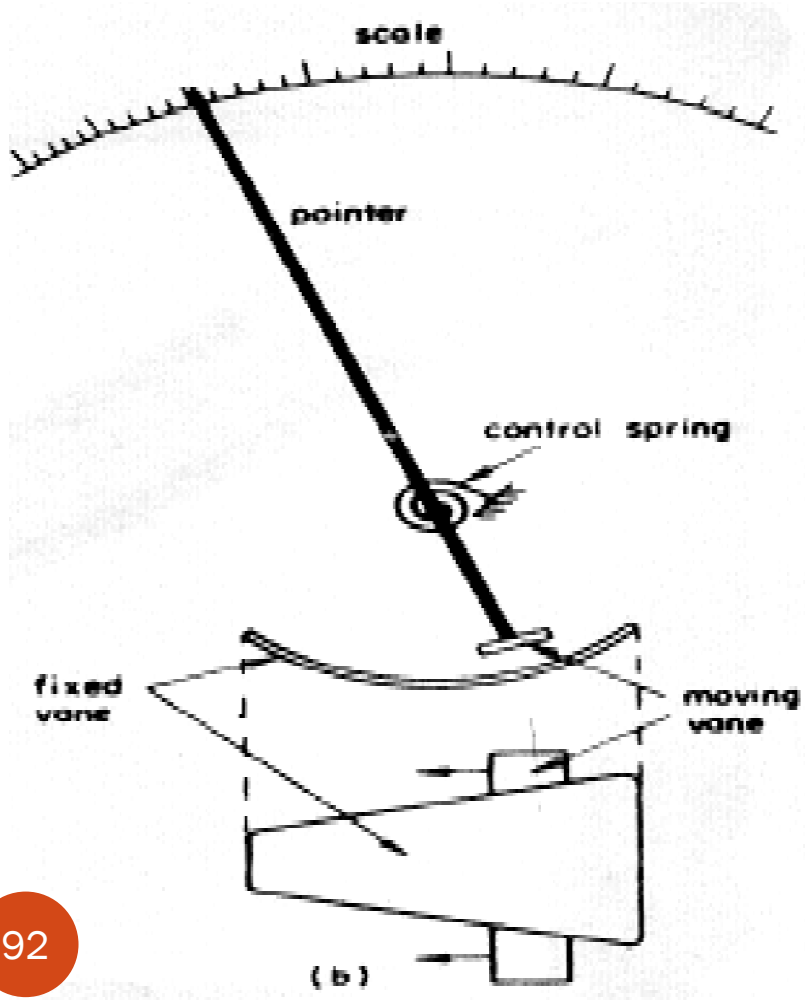
$$C = 0.41\frac{L}{R_s^{\,2}}$$

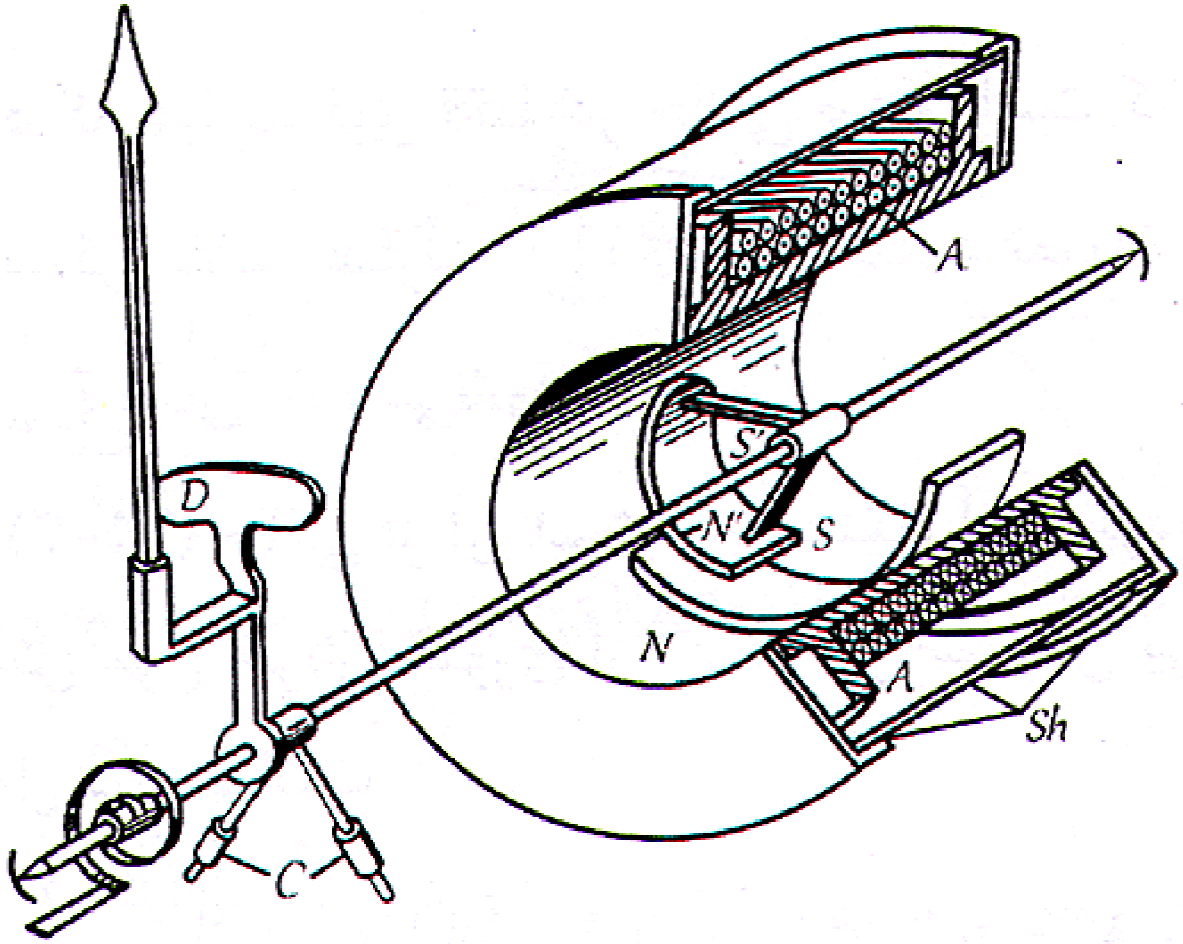
- ۴- حتما باید عقربه ثابت گردد.
- شکل موج جریان عبوری در پاسخ بی اثر است!! ما فقط مقدار موثر را میبینیم.
- سعی میشود پولک آهنی به صورت K/θ ساخته شود.
- ظاهرا در حوالی $\theta=0$ باید $\frac{dL}{d\theta}=\infty$ ولی این غیر ممکن است.

اگرچه حساسیت دستگاه به شدت حوالی صفر کاهش می یابد.

– آهن گردان

- نوع دفعی:
- دو قطعه آهن در میدان معناطیسی مشابه خاصیت مغناطیسی پیدا کرده به طوری که بین آنها نیروی دافعه پدید می آید. این نیرو به صورت خارج از مرکز ایجاد شده و گشتاور محرک را ایجاد می نماید.





- خطاهای دستگاه MII:
- ۱- خطای هسترزیس

اگر آهن به کار رفته دارای هیسترزیس باشد، دستگاه دارای حافظه خواهد بود (چرا؟) در نتیجه : باید از آهن نرم با مشخصه خطی استفاده نمود!!

- ۲- خطای میدان مغناطیسی خارجی

بیشتر مسیر جریان مغناطیسی هواست، در نتیجه میدان مغناطیسی ضعیف !!

در صورت وجود میدان خارجی، دستگاه تحت تاثیر!! (جهت خطا بستگی به جهت میدان دارد).

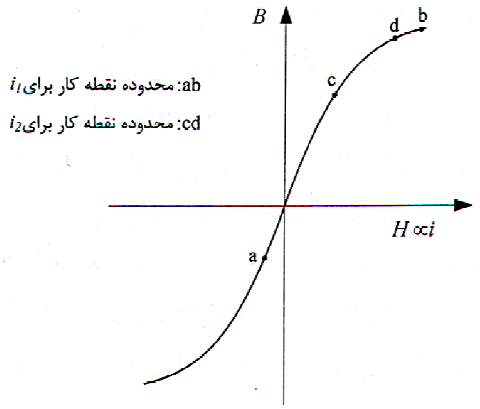
برای کاهش خطا، قسمت فعال دستگاه در محفظه مغناطیسی.

- ۳- خطای حرارتی و اصطکاک

افزایش دما موجب نرمی فنر و کاهش Kc، در نتیجه خطا با جهت مثبت. (چرا؟)

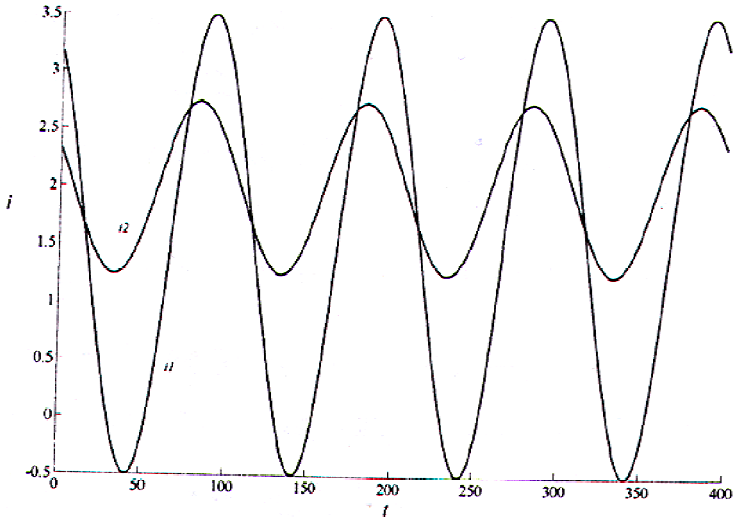
نسبت گشتاور بر وزنِ قسمت متحرک کوچک است!! پس خطای اصطکاک در MII بیشتر از PMMC است.

فصل سوم : دستگاههای اندازه گیری الکترودینامیکی
- آهن گردان

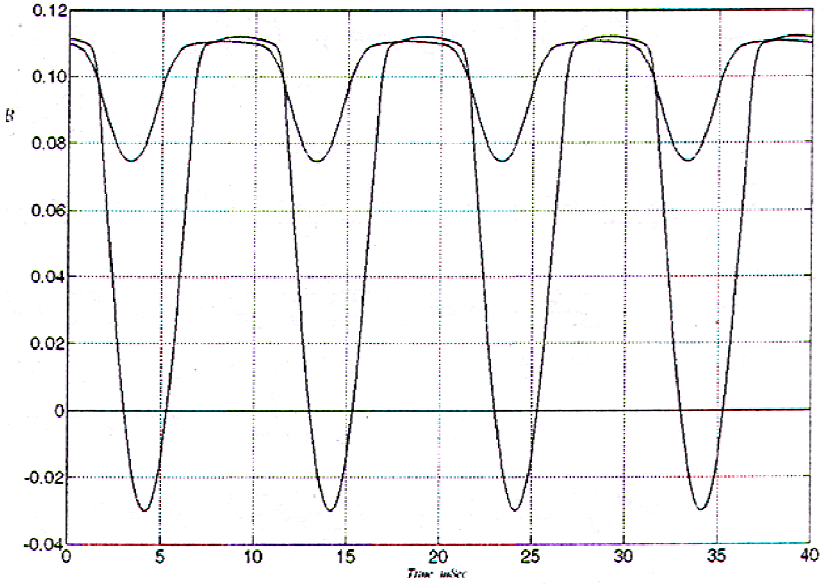


الف: محدوده نقطه کار برای جریان‌های شکل(۳-۹)

- خطاهای دستگاه MII که فقط در جریان متناوب وجود دارند:
- ۱- خطای شکل موج
  - اگر دستگاه ایده آل باشد: مدار مغناطیسی خطی => شکل موج اثری ندارد.
  - اگر مطاب شکلل زیر دو شکل موج متفاوت با RMS یکسان به دستگاه با مشخصه مغناطیسی زیر بدهیم:
    - در نتیجه شکل موجهای میدان حاصله همشکل جریانهای خود نیستند. هرچه پیکها بیشتر، میدان بیشتر به اشباع رفته و مقدار موثر کمتر میشود.



شکل۳-۹ دو شکل موج جریان متفاوت با مقادیر مؤثر یکسان



ب: شکل موج Bهای حاصل از جریان‌های شکل(۳-۹)

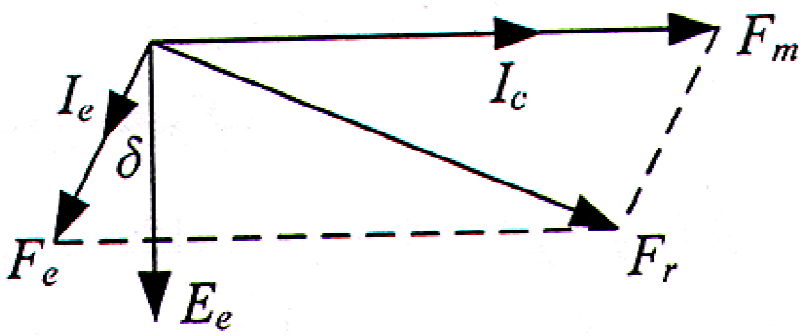
برای جبران نمودن از شکل موج خاص استفاده شده و درجه بندی AC و DC متفاوت خواهد بود.

- خطاهای دستگاه MII که فقط در جریان متناوب وجود دارند:
- ۲- خطای ناشی از جریان فوکو (Eddy Current)
  - اگر جریان ورودی (گذرنده از سیم پیچ) متغیر با زمان باشد، در نتیجه میدان متغیر با زمان می شود و در نتیجه یک جریان فوکو در قطعات آهنی ایجاد می شود. که :
    - ۱) موجب اتلاف انرژی
    - ۲) یک آمپر دور اضافی در مدار تزریق می شود و موجب خطا !!

جریان سیم پیچ و میدان مغناطیسی همفاز نخواهد بود و این تابع شکل موج و فرکانس ورودی است.

چگونه این خطا بروز می یابد؟

- خطاهای دستگاه MII که فقط در جریان متناوب وجود دارند:
- ۲- خطای ناشی از جریان فوکو (Eddy Current) ادامه ...
- چگونه این خطا بروز می یابد؟
- اگر مدار مغناطیسی خطی فرض شود و جریان سینوسی:
  - همه پارامترها سینوسی هستند پس به صورت فازور رسم. (فازور، رسم مقادیر هم فرکانس در اختلاف فازهایشان)
  - I_C جریان سیم پیچ
  - F_m آمپردور ناشی از I_C
  - E_e نیرومحرکه القا شده در قسمت آهنی در میدان
  - I_e جریان فوکوی ناشی از E_e
  - F_e آمپردور ناشی از I_e
  - F_r آمپردور نهایی که فلوی میدان را تولید می کند.
  - نکته: در جریان DC یا فرکانس کوچک $F_e = F_r$
  - اما اگر دستگاه برای اندازه گیری فرکانس خاصی به کار رود، می توان آن را برای آن فرکانس کالیبره نمود.



شکل۳-۱۱ دیاگرام فازوری بررسی جریان فوکو

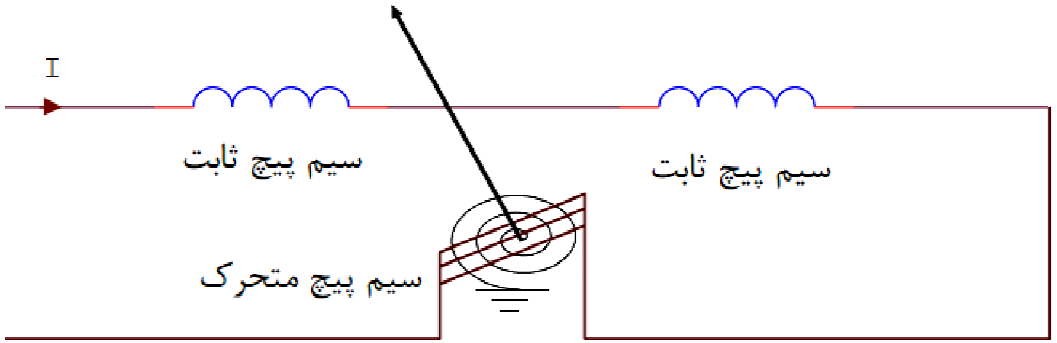
فصل سوم : دستگاههای اندازه گیری الکترودینامیکی
Electro dynamic Measuring Instrument

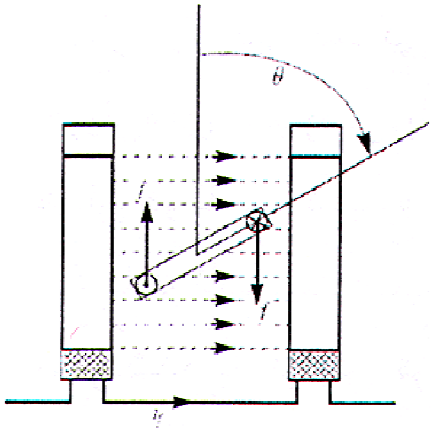
- محتوای فصل:

1) معرفی
2) قاب گردان با مغناطیس دائم (PMMC)
3) آهن گردان (MII)
4) دستگاههای الکترودینامیکی (الکترودینامومتر)
5) دستگاههای فرودینامیکی
6) دستگاههای حرارتی
7) دستگاههای الکترواستاتیکی
8) دستگاههای اندوکسیونی (Induction type)

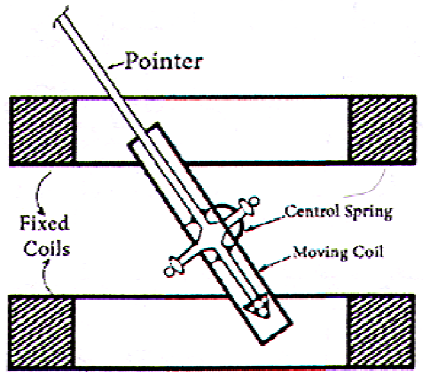
– الکترودینامومتر

- این دستگاه بر اساس خاصیت الکترودینامیکی بین دو سیم پیچ حامل جریان کار می کند.
- یکی از سیم پیچها ثابت و دیگری به صورت قاب گردان بر محور سوار است.





(ب)



(الف)

شکل۳-۱۲ دیاگرام شماتیک دستگاه اندازه‌گیری الکترودینامیکی

- محاسبه گشتاور محرک:
- ۱) از روش کار مجازی:
  - در این دستگاه قطعه آهنی نداریم، پس میدان مغناطیسی خطی است.
  - رابطه ی کو انرژی (کار مجازی) برای این دستگاه:

$$W_f' = \frac{1}{2} L_f i_f^2 + M i_f i_c + \frac{1}{2} L_c i_c^2$$

  - L_f اندوکتانس سیم پیچ ثابت
  - L_C اندوکتانس سیم پیچ قاب گردان
  - M اندوکتانس متقابل
  - نکته : چون هسته آهنی نداریم، L_f و L_C مستقل از θ هستند و M نیز فقط تابعی از θ است (چرا؟).

  - همانطور که جلسه قبل اشاره شد، مشتق کوانرژی = نیرو یا گشتاور !!
  - پس :

$$T_d = \frac{\partial W_f'(i_f, i_c, \theta)}{\partial \theta} = i_f i_c \frac{\partial M}{\partial \theta} = i_f i_c \frac{dM}{d\theta}$$

– الکترودینامومتر

$$T_d = \frac{\partial W_f'(i_f, i_c, \theta)}{\partial \theta} = i_f i_c \frac{\partial M}{\partial \theta} = i_f i_c \frac{dM}{d\theta}$$

- اگر میدان مغناطیسی در محدوده قاب یکنواخت باشد، اندوکتانس متقابل تابعی سینوسی از θ خواهد بود (چرا؟). در نتیجه خواهیم داشت:

$$M = k_m N_f N_c \cos\theta$$

- که با مشتق گیری از M خواهیم داشت:
  - N_f تعداد دور سیم پیچ ثابت
  - N_C تعداد دور سیم پیچ قاب گردان

$$T_d = -k_m N_f N_c i_f i_c \sin\theta$$

و برای روش دوم گشتاور را به صورت مستقیم محاسبه می نماییم.

- ۲) محاسبه گشتاور محرک به طور مستقیم
- اگر میدان در فضای بین دو سیم پیچ ثابت و یکنواخت باشد:

$$F = N_c B_f L_c i_c$$

- نیروی وارد شده بر قاب:
- که میتوان میدان حاصل از سیم پیچ ثابت را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$B_f = K_f i_f$$

- پس نیرو خواهد بود:

$$F = (k_f N_c L_c) i_f i_c$$

- برای قاب داشتیم که دو نیرو به دو ضلع آن وارد میشوند که ایجاد کوپل می نمودند. که گشتاور حاصل از آنها :

گشتاور = یکی از نیروها * فاصله عمودی دو نیرو

- که فاصله عمودی خواهد بود:

$$d = 2r \sin\theta$$

- در نتیجه خواهیم داشت:

$$T_d = (k_f N_c L_c) i_f i_c \times 2r \sin\theta = K i_f i_c \sin\theta$$

- پاسخ دستگاه الکترودینامومتر به ورودی ثابت و متغیر با زمان:
  - گشتاور مقاوم ====> مشابه PMMC نوسط فنر
  - گشتاور مستهلک کننده ===> محفظه هوا یا جریان فوکو

- ابتدا برای جریان متغیر داریم:

$$\theta = \frac{1}{k_c}[T_d(t)]_{av} = \frac{1}{k_c}[k_f\, i_f\, i_c \sin\theta]_{av}$$

- از آنجایی که پس از تعادل عقربه ثابت می شود:
- پس زاویه نهایی به مقدار متوسط جریانها بستگی دارد.
- یعنی درجه بندی خطی نیست.

$$\theta = \frac{k \sin\theta}{k_c}[i_f\, i_c]_{av}$$

به عبارت دقیقتر می توان مشابه آهن گردان نشان داد که در الکترودینامومتر $T = \frac{dM}{d\theta} I_1 I_2$ که با سری بستن سیم پیچ متحرک و ثابت داریم $T = \frac{dM}{d\theta} I^2$ لذا

$$\theta = \frac{1}{s}\frac{dM}{d\theta} I^2$$

- مثال : اگر $x=[i_f i_c]_{av}$ ورودی دستگاه الکترودینامیکی باشد، حساسیت انحراف آن؟
  - برای بیان حساسیت داشتیم : $S=\frac{d\theta}{dx}$
  - رابطه خروجی بر حسب ورودی برای دستگاه الکترودینامیکی:

$$\theta=\frac{k\sin\theta}{k_c}[i_f\ i_c]_{av}=\frac{k\sin\theta}{k_c}x$$

  - از رابطه ی بالا مشتق می گیریم:

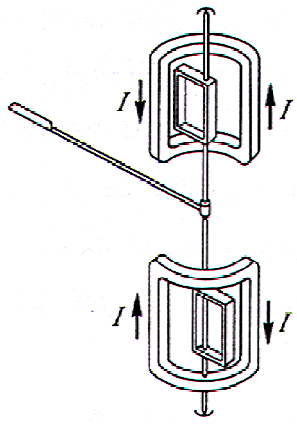
$$S_x=\frac{d\theta}{dx}=\frac{k\sin\theta}{k_c-kx\cos\theta}$$

  - حساسیت در طول درجه بندی ثابت نیست و در نتیجه درجه بندی خطی نیست.
  - حساسیت حول صفر ====> صفر
  - حساسیت حول ۹۰ درجه ===> ماکزیمم

- خطای دستگاههای الکترودینامیکی:
- ۱) اثر میدانهای خارجی :
  - به دلیل نداشتن هسته، چگالی میدان کم است در نتیجه میدانهای خارجی موثر هستند.
  - برای حل این مشکل، قسمت فعال را داخل محفظه ی آهنی می گذارند.
  - اما ... به دلیل ایجاد جریان فوکو به دلیل ابعاد محفظه ی آهنی جریان فوکو ایجاد میشود.

و در نتیجه حد فرکانسی دستگاه محدود خواهد بود.

- در دستگاههای خیلی دقیق ======= محفظه به صورت دو جهت مختلف قرار دارد به طوری که میدان در دو جهت مختلف اثر کرده و اثر میدان خارجی حذف گردد. به این دستگاهها " سیستم آستاتیک Astatic system " می گویند.



- ۲) خطای حرارتی و اصطکاک شبیه آهن گردان MII

- مزایا و معایب دستگاه الکترودینامومتر:
  - ۱) عدم وجود هسته موجب عدم وجود خطای شکل موج و هسترزیس می گردد.
  - ۲) به دلیل بالا فرکانس کاری وسیع، آستاتیک تا 10kHZ کار می کند.
  - ۳) برای اندازه گیری توان، ضریب توان، فرکانس و آمپر و ولتاژ و نیز سنکروسکوپ مفید است.
  - ۴) به طور کلی دستگاه یک True rms meter است.
  - ۵) نسبت به PMMC حساسیت کمتری دارد ولی از آن گرانتر و محکمتر است.
  - ۶) برای اندازه گیری مقاومت میتوان مقاومت بزرگی با آن سری کرد.
  - ۷) نسبت گشتاور بر وزن آن کوچک است، پس اصطکاک می تواند زیاد باشد.