۱ ـ

در مورد میلی آمپرمتر است ← رنج طبیعی دستگاه یعنی جریان [illegible] الف) $I \leq I_m$

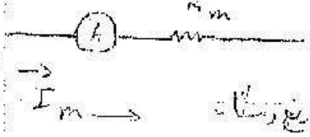
ماکزیمم θ_m دستگاه یعنی انحراف [illegible] ب) $I > I_m$

الف ـ دارای مقیاس خطی کالیبره شده است. چون k ثابت است I_m در جدول داده شده است.

$\overset{mA}{I} = \overset{mA/rad}{k}\,\theta \to rad$

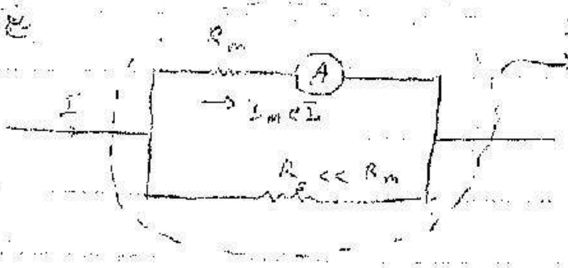
ب ـ افزایش رنج با استفاده از مقاومت شنت (موازی)

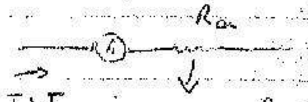
مقاومت داخلی دستگاه



$I_m \longrightarrow$ رنج دستگاه

آمپرمتر با رنج افزایش یافته





$R_a = \frac{R_m R_s}{R_m + R_s}$

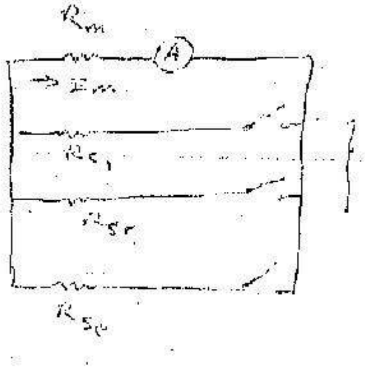
ضریب گسترش رنج دستگاه $n = \frac{I}{I_m} >>$

$$\Rightarrow R_s = \frac{R_m}{n-1} \quad , \quad R_a = \frac{R_m}{n}$$

آمپرمتر چند رنجی (چند حوزه‌ای)

۱ ـ مدار معمولی (برای هر رنج یک مقاومت موازی در نظر گرفته می‌شود)

۲ ـ مدار پیشرفته (مقاومت‌های استفاده شده برابر تعداد رنج‌های دستگاه است که با هم به صورت اشتراکی مورد استفاده قرار می‌گیرند)



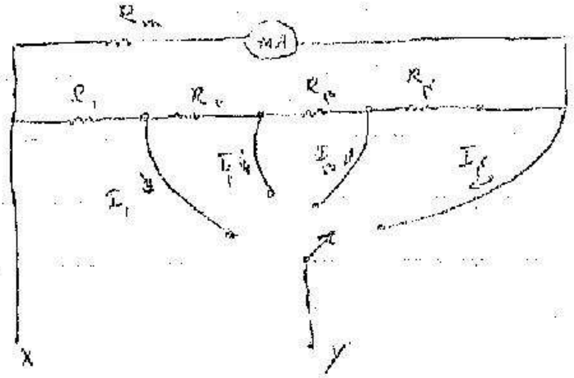
← کلید های چند وضعیتی

$I_1 = n_1 I_m \Rightarrow n_1 = \frac{I_1}{I_m}$ $\quad R_{s_1} = \frac{R_m}{n_1 - 1}$

$I_2 = n_2 I_m \Rightarrow n_2 = \frac{I_2}{I_m}$ $\quad R_{s_2} = \frac{R_m}{n_2 - 1}$

$I_3 = n_3 I_m \Rightarrow n_3 = \frac{I_3}{I_m}$ $\quad R_{s_3} = \frac{R_m}{n_3 - 1}$

روش پیشرفته :



$I_1 > I_2 > I_3 > I_4$ ، حتماً

ضرایب گسترش رنج $\quad n_1 = \frac{I_1}{I_m}$ $\quad n_2 = \frac{I_2}{I_m}$ $\quad n_3 = \frac{I_3}{I_m}$

$n_4 = \frac{I_4}{I_m}$

با فرض اینکه کلید سلکتور در حالت اول باشد

$R_s = \frac{R_m}{n - 1}$

$n_1 > n_2 > n_3 > n_4$

وضعیت کلید → ① $\quad R_1 = \frac{R_m + R_2 + R_3 + R_4}{n_1 - 1}$

② $\quad R_1 + R_2 = \frac{R_m + R_3 + R_4}{n_2 - 1}$

③ $\quad R_1 + R_2 + R_3 = \frac{R_m + R_4}{n_3 - 1}$

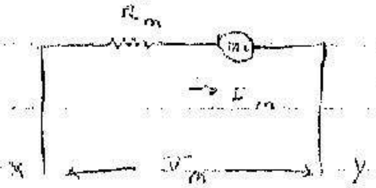
④ $\quad R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = \frac{R_m}{n_4 - 1}$

کاربرد دستگاه:

۱- اندازه‌گیری جریان‌های dc به عنوان آمپرمتر dc
۲- اندازه‌گیری ولتاژهای dc به عنوان ولتمتر dc
۳- اندازه‌گیری مقاومت‌های اهمی به عنوان اهم‌متر
۴- اندازه‌گیری جریان‌های ac با استفاده از یکسوسازها به عنوان آمپرمتر ac
۵- اندازه‌گیری ولتاژهای ac با استفاده از یکسوسازها به عنوان ولتمتر ac

۲ ←

مقاومت داخلی دستگاه (ثابت)



$I = \frac{V}{R_m}$

$I = k\theta$ $\rightarrow$ $V = \underbrace{k R_m}\theta$

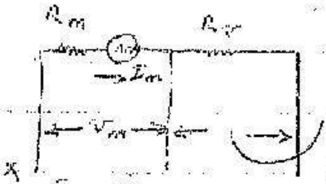
$V = k'\theta$

$\Rightarrow$ (ولتمتر) $V_m = k'\theta$ <<

۵) گسترش رنج ولتمتر
« حوزه عملکرد « } ← با استفاده از مقاومت سری شده با دستگاه

$\underbrace{\quad}_{R_v}$

مدار معادل ←



$\rightarrow (V - V_m) = (n-1)V_m$

رنج مورد نظر
↓
$V = n V_m$

n ↓ ضریب گسترش رنج دستگاه

V_m → حداکثر ولتاژ قابل اندازه‌گیری توسط خود دستگاه

$\Rightarrow \frac{V_m}{R_m} = \frac{(n-1)V_m}{R_v} \Rightarrow R_v = (n-1)R_m$

گسترش آن نامحدود

* اگر رنج یا انحراف دستگاه تغییر کرد (وقتی علامت × را روی دستگاه داریم) حالا دستگاه نیز تغییر می‌کند

چند رنجی بودن یک مسئله است. آن این است که با انتخاب رنج مناسب خطای دستگاه کمتر شود

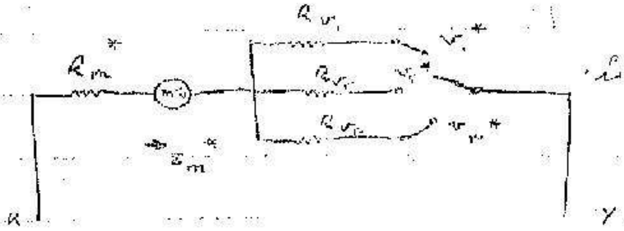
هر چه مقدار نزدیکتر به ماکزیمم باشد خطای نسبی کمتر است ، خطا کمتر است

$\delta_x = \frac{\Delta A}{A}$

ولتمتر چند رنجی :

۱- با استفاده از مقاومت های سری مستقل

۲- با استفاده " " " متوالی


R_m^*
m
I_m^*
R_{v_1}
R_{v_2}
R_{v_3}
v_1^*
v_2^*
v_3^*
X
Y

اگر بخواهیم ولتمتری داشته باشیم که ۳ رنج داشته باشد
مقاومت های سری را بدست آورید ؟

← اگر R_m و I_m معلوم باشند

$V_m = R_m I_m$ ✓

$n_1 = \frac{V_1}{V_m}$ ✓

$n_2 = \frac{V_2}{V_m}$ ✓

$n_3 = \frac{V_3}{V_m}$ ✓

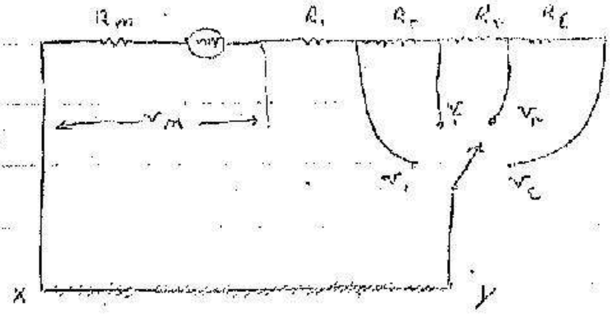
$\Rightarrow$

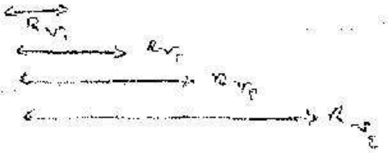
$R_{v_1} = (n_1 - 1) R_m$ ✓

$R_{v_2} = (n_2 - 1) R_m$ ✓

$R_{v_3} = (n_3 - 1) R_m$ ✓

حالت ۲ ام


R_m
m
R_1
R_2
R_3
R_4
V_m
v_1
v_2
v_3
v_4
X
Y


R_{v_1}
R_{v_2}
R_{v_3}
R_{v_4}

$n_1 = \frac{V_1}{V_m}$

$n_2 = \frac{V_2}{V_m}$

$n_3 = \frac{V_3}{V_m}$

$n_4 = \frac{V_4}{V_m}$

$R_1 = R_{v_1} = (n_1 - 1) R_m$

$R_2 = R_{v_2} - R_1 = (n_2 - 1) R_m - R_1$

$R_3 = R_{v_3} - (R_1 + R_2) = (n_3 - 1) R_m - (R_1 + R_2$

$R_4 = R_{v_4} - (R_1 + R_2 + R_3) = (n_4 - 1) R_m - ($

۳- کاربرد دستگاه Ω جهت اهم‌متر

الف - اهم‌متر سری

ب - اهم‌متر موازی

اجزاء اهم‌متر:

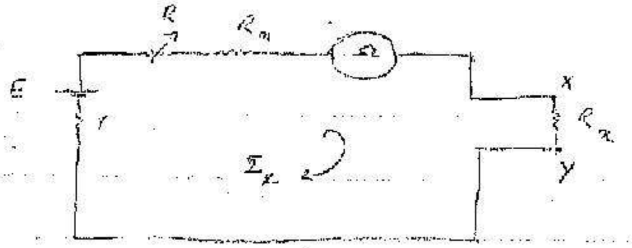
۱- دستگاه Ω

۲- منبع ولتاژ (باطری)

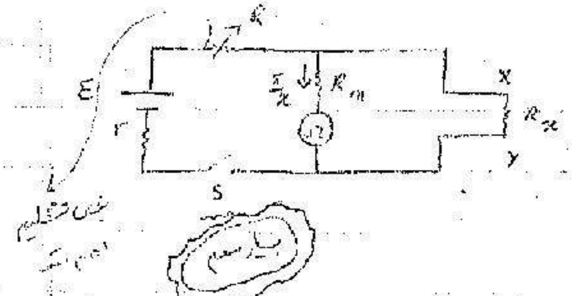
۳- مقاومت متغیر جهت تنظیم دستگاه (جبران افت باطری)

۴- کلید بازبست برای اهم‌متر موازی

اهم‌متر سری که اجزا اهم‌متر با مقاومت مجهول اتصال سری دارند.



اهم‌متر موازی که دستگاه Ω با مقاومت مجهول موازی‌اند جهت انحراف و مقاومت متغیر که جهت تنظیم [illegible]



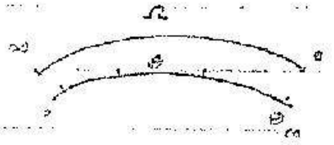
مقاومت متغیر جهت تنظیم دستگاه [illegible]

جبران [illegible] دستگاه برای مقاومت [illegible]

ارتباط زاویه انحراف دستگاه با مقاومت مجهول؟

مثال: اهم‌متر سری

$$I_x = \frac{E}{r+R+R_m+R_x}$$



$$r+R+R_m = R_S = \frac{E}{I_m} = cons$$

$$R_x = 0 \Rightarrow I_x = I_m$$

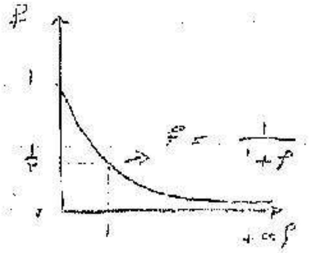
$$R_x = \infty \Rightarrow I_x = 0$$

+ دقت اهم‌متر کم است چون با تغییر R ها [illegible]

تا I در حالت اتصال کوتاه ماکزیمم باشد.

$$I_x = \frac{E}{R_s+R_x} = \frac{\frac{E}{R_s}}{1+\frac{R_x}{R_s}} = \frac{I_m}{1+\frac{R_x}{R_s}} \Rightarrow \underbrace{\frac{I_x}{I_m}}_{f} = \frac{1}{1+\underbrace{\frac{R_x}{R_s}}_{\rho}}$$

حالا در صورت تعریف اهم‌متر سری $\Rightarrow f = \frac{1}{1+\rho}$

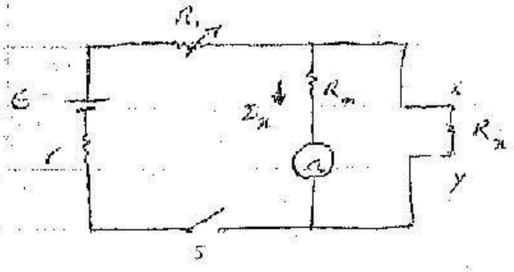


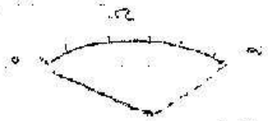
اهم‌متر موازی ؟

۱- ارتباط زاویه انحراف [illegible] مورد سنجش

۲- برای مقاومت اهم‌متر

نکته مهم این است که وقتی از دستگاه استفاده نمی‌کنیم باطری خالی می‌شود ولی در سری این طور نیست. چون در حین استفاده نمی‌کنیم سوئیچ باز است.





$R_x = 0 \Rightarrow I_x = 0 \Rightarrow \theta_x = 0$

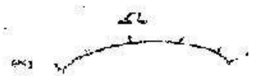
$R_x = \infty \Rightarrow I_x = I_m \Rightarrow \theta_x = \theta_m$

$0 \le R_x \le \infty$

رنج تغییرات R_x

* با توجه به مقدمه مبحث جاری تقسیم‌بندی اهم‌متر موازی به این صورت است:

اهم‌متر موازی →



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

مقاومت معادل اهم‌متر موازی $\Rightarrow$ طبق تعریف $R_p = \frac{(r+R_1)\cdot R_m}{r+R_1+R_m} << R_s$

$$\theta_x = \frac{1}{k} I_x \Rightarrow I_x = f(R_x) \Rightarrow I = \frac{E}{r+R_1+\frac{R_m \cdot R_x}{R_m+R_x}}$$

$$I_x = I\,\frac{R_x}{R_x+R_m} = \frac{E(R_m+R_x)}{(r+R_1)(R_m+R_x)+R_m \cdot R_x}\cdot\frac{R_x}{(R_m+R_x)}$$

$$I_x = \frac{E R_x}{(r+R_1)R_m+(r+R_1)R_x+R_m \cdot R_x} = \frac{E}{\frac{(r+R_1)R_m}{R_x}+r+R_1+R_m}$$

میتوان رابطه‌ی فوق را اثبات کنیم.

$$f = \frac{1}{1+\frac{1}{\rho}}$$

$$\Rightarrow I_x = \frac{\left(\frac{E}{r+R_1+R_m}\right) I_m}{1+\underbrace{\left(\frac{\frac{(r+R_1)R_m}{R_x}}{r+R_1+R_m}\right)}_{R_p}} \Rightarrow I_x = \frac{I_m}{1+\frac{R_p}{R_x}}$$

I_m در دستگاه اندازه‌گیری مقدار ثابتی است یعنی مثلاً بازای این مقدار آمپر رنج دستگاه ماکزیمم است
R_p نیز مقدار ثابتی است ولی R_x مقدار متغیر میباشد.

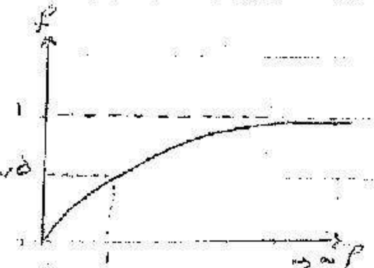
$$\Rightarrow \frac{I_x}{I_m} = \frac{1}{1+\frac{R_p}{R_x}} \qquad \text{فرض} \begin{cases} \frac{I_x}{I_m} = f & 0 \le f \le 1 \\ \frac{R_x}{R_p} = \rho & 0 \le \rho \le \infty \end{cases} \Rightarrow f = \frac{1}{1+\frac{1}{\rho}}$$

$$\rho = \frac{R_x}{R_p}$$

$$R_p = \frac{(r+R_1)R_m}{r+R_1+R_m}$$

فرمول مقاومتی روی دستگاه

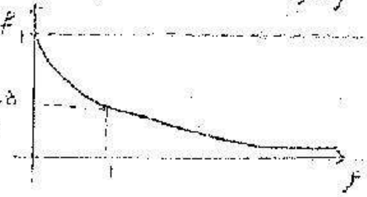
منحنی صفحه مدرج اهم‌متر موازی



$$\rho = \frac{R_x}{R_s}$$

$$R_s = r+R_1+R_m$$

منحنی صفحه مدرج اهم‌متر سری



بررسی اهم‌متر

- هر چه صفر دستگاه بازتر باشد دقت اندازه‌گیری دستگاه بیشتر می‌باشد.

- به علت تغییرات کم شیب در نهایت نشانگر در انتهای دستگاه، برای اندازه‌گیری مقاومت‌های بزرگ مناسب نمی‌باشد.

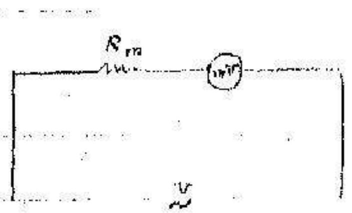
- ۵۰٪ صفحه مدرج اهم موازی مربوط است به R_p و در اهم‌متر سری مربوط است به R_s بنابراین اهم‌متر موازی نسبت به مقاومت‌های خیلی کوچک حساسیت زیادی دارد.

۳۰۰ kΩ
۱۵ kΩ
kΩ
kΩ

$R_p \ll R_s$

خیلی از اوقات صفحه مدرج در هر دو اهم‌متر کاربرد بیشتری دارد.

کاربرد دستگاه D برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان متناوب:



- ولتمتر ac

- آمپرمتر ac

- در سیکل مثبت انحراف مثبت است ⇒ I_{ave} ... (T_e) ... ⇒

- " " منفی " " منفی

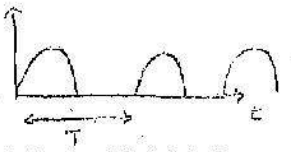
با توجه به اینکه زمان لازم برای حرکت دستگاه در حد ثانیه و زمان هر نیم سیکل در حد میلی ثانیه است تحت ولتاژ و جریان ac عقربه حول نقطه صفر کمی نوسان ضعیف دارد.

راه‌کار ممکن: یکسو کردن جریان ورودی دستگاه به صورت:
- الف- نیم موج
- ب- تمام موج

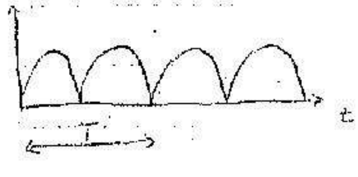
$\Rightarrow I_{ave} \neq 0 \Rightarrow (T_e)_{ave} \neq 0$

شکل موج یکسو شده:
- الف- یکسوسازی نیم موج
- ب- یکسوسازی تمام موج

به ابزار صرفاً نیاز یک دیود است

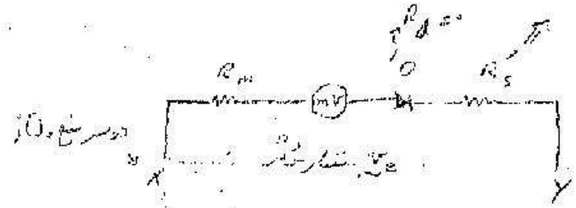


به چهار دیود



مقاومت گسترش حوزه سنجش دستگاه

ولتمتر a.c
- با یکسوساز نیم موج
- آمپرمتر a.c



V_m رنج ذاتی دستگاه

V_e رنج موردنیاز دستگاه
مطالعه شده

ضریب گسترش حوزه سنجش دستگاه: $n = \frac{V_e}{V_m}$

در حالت سینوسی $\Rightarrow I_{ave} = \frac{I_{peak}}{\pi}$ $\quad i = I_{peak}\sin\omega t \Rightarrow I_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T i\,dt$

$V_{av} = I_{av}(R_m + R'_s)$

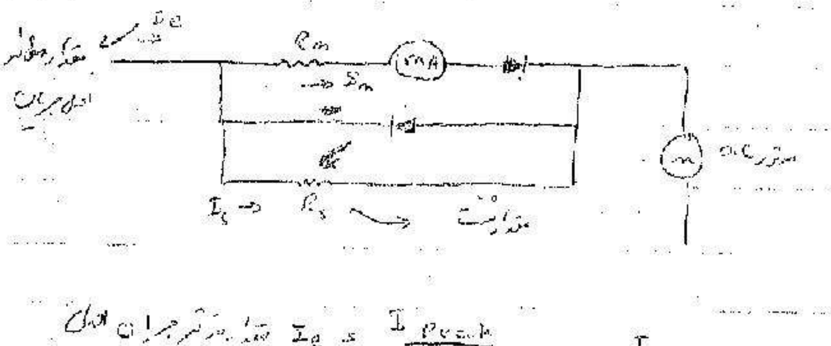
$V_e = n V_m = \frac{V_{peak}}{\sqrt{2}}$ از منبع ac اصلی
با فرض اینکه دستگاه $\Rightarrow \frac{V_e}{V_{av}} = \frac{\frac{V_{peak}}{\sqrt{2}}}{\frac{V_{peak}}{\pi}} = 2{,}22$

مقدار مؤثر ولتاژ مورد اندازه‌گیری $V_e = 2{,}22\, V_{ave} \Rightarrow$ مقدار متوسط یکسو شده از ولتاژ مورد اندازه‌گیری $\Rightarrow n' = \frac{V_{ave}}{V_m} = \frac{\frac{V_e}{2{,}22}}{V_m} = \frac{n}{2{,}22}$
V_m رنج ذاتی دستگاه

$\Rightarrow R'_s = (n'-1)R_m$ با استفاده از دیود ایده‌آل

$R'_s = (n'-1)R_m - R_d$ → مقاومت دیود واقعی
دیود واقعی

آمپرمتر a.c



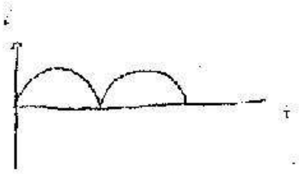
$I_e = \frac{I_{peak}}{\sqrt{2}}$ مقدار مؤثر جریان اصلی

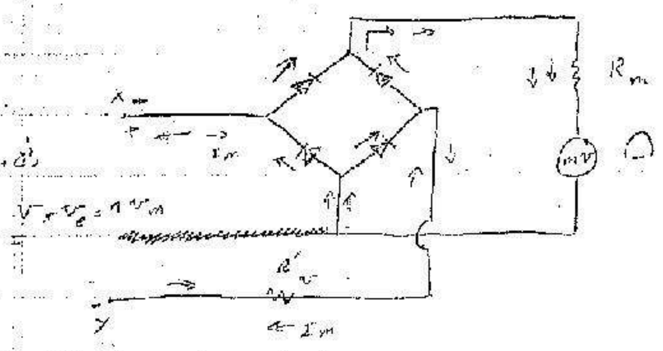
$I_{ave} = \frac{I_{peak}}{\pi}$ مقدار متوسط جریان اصلی

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{I_e}{I_m} = n \\ \frac{I_{peak}}{I_{av}} = n' \end{cases} \Rightarrow n' = \frac{n}{2{,}22} \Rightarrow \begin{cases} R'_s = \frac{R_m}{n'-1} \text{ دیود ایده‌آل} \\ R'_s = \frac{R_m + R_d}{n'-1} \text{ دیود واقعی} \end{cases}$$

ولتمتر ac با یکسوساز تمام موج :

آمپرمتر



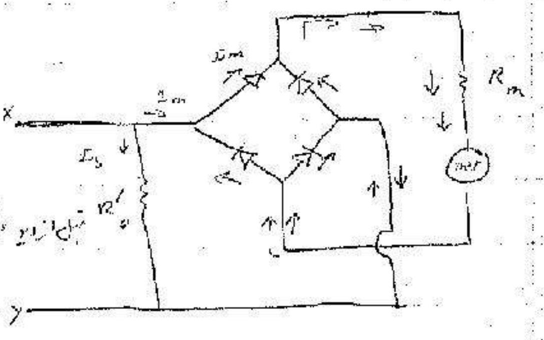


مقاومت سری [illegible]

$$\begin{cases} V_{av} = \dfrac{2V_{peak}}{\pi} \\ V_e = \dfrac{V_{peak}}{\sqrt{2}} \end{cases} \Rightarrow V_e = 1.11\, V_{av} \Rightarrow \begin{cases} V_{av} = n' V_m \\ n' = \dfrac{n}{1.11} \end{cases} \Rightarrow R'_s = (n'-1)R_m - 2R_d$$

در آمپرمتر [illegible]

$$I = I_e = n I_m$$



جریان زیر [illegible]

$$R'_s = \frac{R_m + 2R_d}{n' - 1}$$

روش خنثی کردن تاثیرات دما :

در عملکرد دستگاه Ω :

الف - حالت آمپرمتری : [illegible] :

$$nBSI = C\theta$$

$$\begin{cases} \theta = \dfrac{nBS}{C} \cdot I & \text{افزایش دما} \\ \theta_t = \dfrac{N_t \cdot B_t \cdot S_t}{C_t} \cdot I_t \end{cases} \Rightarrow \Delta\theta = \theta_t - \theta$$

خطای دمایی

اثرات دما [illegible] :

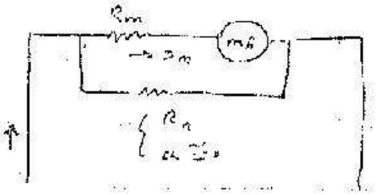
$$\begin{cases} B_t = (1 - \beta \Delta T) B \\ C_t = (1 - \delta \Delta T) C \\ S_t \simeq S \simeq \text{const} \\ R_{m_t} = (1 + \alpha \Delta T) R_m \end{cases} \Rightarrow$$

[illegible]

جبران خطای ناشی از تغییر دما :

الف - حالت آمپرمتری :

قراردادن یک مقاومت شنت R_n با ضریب افزایش حرارتی تقریباً صفر به صورت موازی با دستگاه



$$I = \text{const} \Rightarrow \Delta\theta = 0 \Rightarrow R_n = ?$$

$$\begin{cases} I_m = I \dfrac{R_n}{R_m + R_n} \\ I_{m_t} = I \dfrac{R_n}{R_n + R_{mt}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \theta = \dfrac{nBS}{C} \cdot I_m = \dfrac{nBS}{C} \dfrac{R_n}{R_m + R_n} \cdot I \\ \theta_t = \dfrac{n B_t S}{C_t} \cdot I_{mt} \end{cases}$$

$$= \frac{nB(1 - \beta\Delta T) S}{C(1 - \delta\Delta T)} \cdot \frac{R_n}{R_n + R_m(1 + \alpha\Delta T)} \cdot I$$

$$\Delta\theta = 0 \Rightarrow \theta = \theta_t$$

$$\Rightarrow \frac{nBS}{C} \cdot \frac{R_n}{R_n + R_m} \cdot I = \frac{nB(1 - \beta\Delta T) S}{C(1 - \delta\Delta T)} \cdot \frac{R_n}{[R_n + R_m(1 + \alpha\Delta T)]} I$$

$$\Rightarrow (R_n + R_m)(1 - \beta\Delta T) = (1 - \delta\Delta T)[R_n + R_m(1 + \alpha\Delta T)]$$

$(\alpha\delta <<)$

$$R_n - R_n\beta\Delta T + R_m - R_m\beta\Delta T = R_n + R_m + R_m\alpha\Delta T - R_n\delta\Delta T - R_m\delta\Delta T - \cancel{R_m\alpha\delta\Delta T}$$

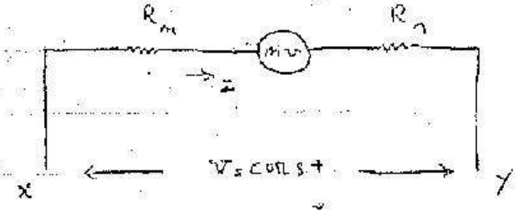
$$\Longrightarrow R_n = \left(\frac{\alpha}{\delta - \beta} - 1\right) R_m \qquad \delta > \beta$$

$$\xrightarrow{\text{[illegible]}} \frac{\alpha}{\delta - \beta} = 1 \Rightarrow R_n = 0$$

یعنی اثر مقاومت منگانین [illegible] کنیم

ب - حالت ولتمتری :

قراردادن یک مقاومت شنت R_n با ضریب افزایش حرارتی تقریباً صفر به صورت سری با دستگاه



با ولتاژ ثابت دما روی انحراف دستگاه اثر نگذارد

$$\theta = \frac{nBS}{C} \cdot I = \frac{nBS}{C} \cdot \frac{V}{R_m + R_n}$$

$$\theta_t = \frac{n \cdot B_t \cdot S}{C_t} \cdot I_t = \frac{nB(1-\beta\Delta T)}{C(1-\delta\Delta T)} \cdot \frac{V}{[R_n + R_m(1+\alpha\Delta T)]}$$

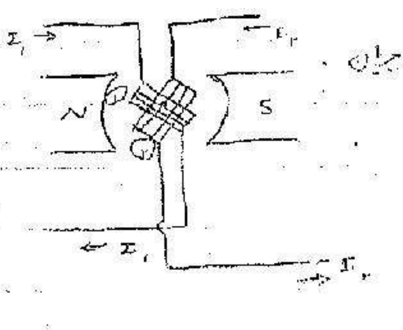
$$\Delta\theta = 0 \Rightarrow \theta = \theta_t \Rightarrow$$

$$R_n = \left(\frac{\alpha}{\delta - \beta} - 1\right) R_m$$

$$\xrightarrow{\text{ایده‌آل}} \frac{\alpha}{\delta - \beta} = 1 \rightarrow R_n = 0$$

دستگاه اندازه‌گیری با دو سیم پیچ متحرک و آهنربای دائم (X) :
(دستگاه نسبت سنج)

تفاوت دستگاه با دستگاه معمولی ← وجود دو سیم پیچ با مدارهای الکتریکی جدا که بصورت مکانیکی به هم متصل می‌باشند.

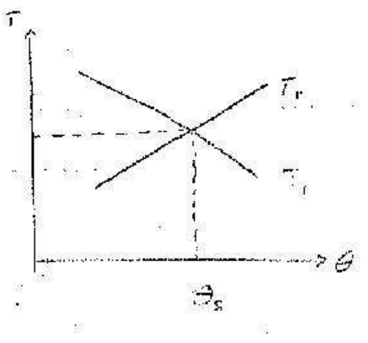


گشتاور در جهت عکس عقربه‌های ساعت (جریان I_1 در سیم پیچ اول)

$$\begin{cases} T_1 = n_1 B_1 S_1 I_1 = N_1 I_1 S_1 f_1(\theta) \\ B_1 = f_1(\theta) \end{cases}$$

← میدان غیریکنواخت است

$$\begin{cases} T_2 = n_2 B_2 S_2 I_2 = N_2 I_2 S_2 f_2(\theta) \\ B_2 = f_2(\theta) \end{cases}$$



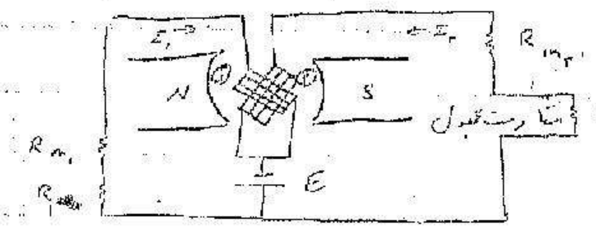
$T_1 = T_2$ (تعادل) ← عدم نیاز به فنر و مقاومت مکانیکی (اصطکاکی)
(اتصال)

k=1 فرض
ثابت

$$N_1 S_1 I_1 f_1(\theta) = N_2 S_2 I_2 f_2(\theta)$$

$$\Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{N_2 S_2}{N_1 S_1}\right) \frac{f_2(\theta)}{f_1(\theta)} = f_3(\theta)$$

$$\Rightarrow \theta = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$ ← دستگاه نسبت سنج



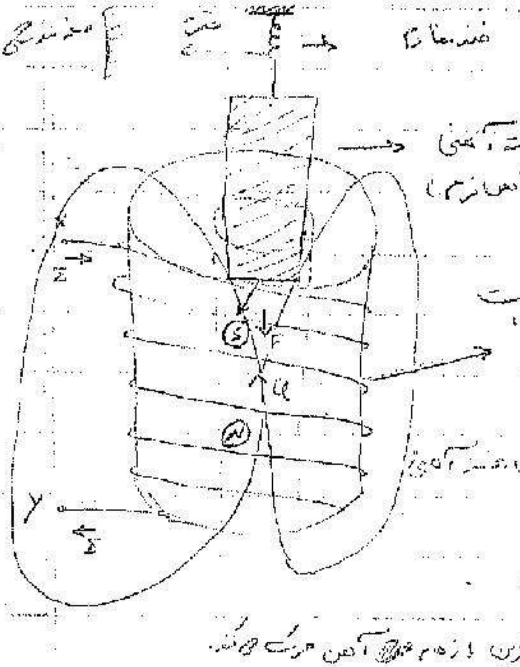
I_1
I_2
R_{m_2}
N
S
θ
θ
مقاومت مجهول
R_x
R_{m_1}
R_1
E

$$\begin{cases} I_1 = \dfrac{E}{R_{m_1}+R_1} \\ I_2 = \dfrac{E}{R_{m_2}+R_x} \end{cases} \Rightarrow \theta = f\left(\frac{\frac{E}{R_1+R_{m_1}}}{\frac{E}{R_x+R_{m_2}}}\right)$$

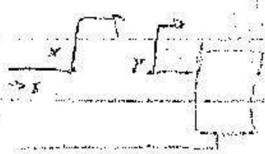
$$\Rightarrow \theta = f\left(\frac{R_{m_2}+R_x}{R_{m_1}+R_1}\right) \Rightarrow \theta \equiv R_x$$

اهم متر با درجه بندی گذاشته برای مقاومت های در رنج خیلی کم یا خیلی زیاد می‌شود : میگر (megger)

دستگاه اندازه گیری با آهن نرم گردان :



مغناطیسی
فنر
فنرهای
هسته آهنی
(آهن نرم)
X
I
S
F
u
N
Y
I
سیم پیچ ثابت
نیروی وارده به هسته آهنی

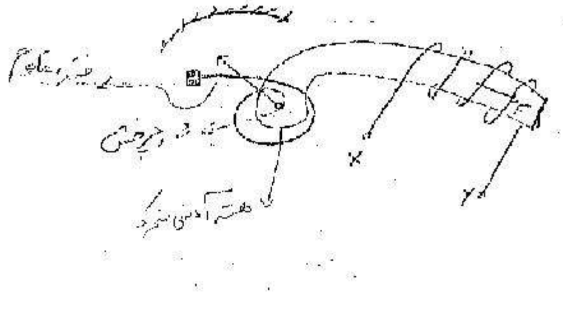


$F = kI^2$ ← متناسب با مربع جریان عبوری از سیم پیچ

با به وجود آمدن قطب های S و N هسته کشیده می‌شود .

اگر جهت جریان عوض شود باز در سیم پیچ قطب ها عوض می‌شود بنابراین باز هم آهن حرکت می‌کند .

برای به وجود آوردن حرکت دورانی داریم ←

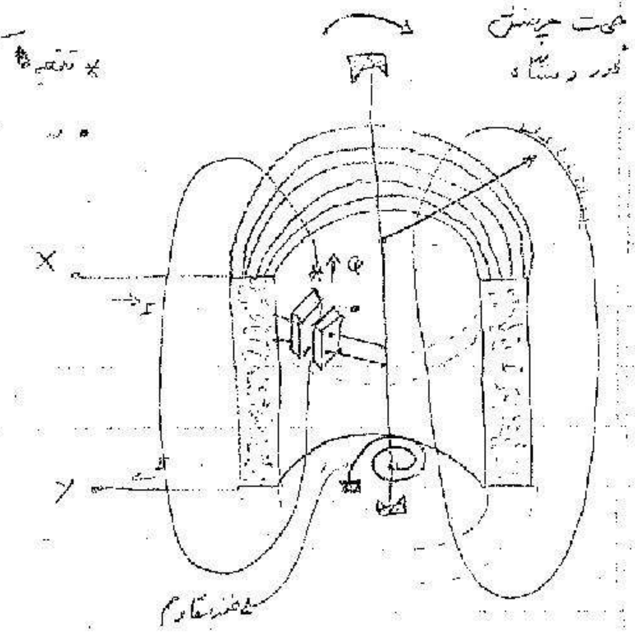


فنر
عقربه
محور چرخش
X
Y
هسته آهنی متحرک

هر دوی این عناصر [illegible] امکان فیزیکی دارند .

* تیغه آهنی ثابت (متصل به بدنه دستگاه) که دو تیغه آهنربای مغناطیسی (در جهت)
« « متحرک (« « محور چرخش دستگاه)

دو تیغه یکدیگر را دفع کرده و باعث چرخش محور دستگاه می‌شوند.



محاسبه گشتاورها :

الف - گشتاور مقاوم : $T_r = c\theta$

ب - گشتاور محرک : $T_e = \frac{dW}{d\theta}$ ← انرژی ذخیره شده در سیم پیچ W

پس تعریف کلی

$\frac{dW}{d\theta}$ تغییرات انرژی ذخیره شده در سیم پیچ به تغییر زاویه انحراف

(ضریب خودالقایی سیم پیچ) $L = f(\theta) \neq const$ (متغیر)

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \Rightarrow \frac{d(W)}{d\theta} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\theta} + \frac{1}{2} L \frac{d(I^2)}{d\theta}$$ ← اگر [illegible] صفر می‌شود

$$\Rightarrow T_e = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\theta}.$$

در حالت تعادل

$$\begin{cases} T_e = T_r \\ \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\theta} = c\theta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{فرض میکنیم} \\ \frac{dL}{d\theta} = const. \end{cases} \Rightarrow \theta = k I^2$$

* در این رابطه I مقدار مؤثر جریان می‌باشد.

حل تمرین

۱- چنانچه از دستگاهی که روی آن ۲٫۵ درج شده به عنوان ولتمتر استفاده شود و رنج آن ۱۵۰ ولت باشد اندازه‌گیری ۱۲۰ با این دستگاه چه خطایی دارد؟

۲٫۵ : کلاس دقت

$$\frac{2.5}{100} = \frac{x}{150} \Rightarrow x = 3.75 = \Delta P$$

$$\%\varepsilon_p = \frac{3.75}{120} \times 100 = 3.125\ \%$$

انحراف مناسب برای اندازه‌گیری‌ها توسط دستگاه مذکور برای اینکه خطای اندازه‌گیری ۵٪ باشد چقدر است؟

چه ثابت است:

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta P}{P_a} \Rightarrow \frac{5}{100} = \frac{3.75}{P_a} \Rightarrow P_a = 75\ [V]$$

اگر P_a بین ۷۵ و ۱۵۰ باشد هرچه بیشتر باشد خطای اندازه‌گیری کمتر است.

۳- گشتاور محرکه آمپرمتر با جریان طوری است که متناسب می‌باشد. به ازای جریان ۵A به میزان ۸۰° منحرف می‌شود. دستگاه به ازای جریان ۴A اگر گشتاور مقاوم فنری ثابت باشد انحراف چقدر است؟

$$T_e = kI$$

$$\begin{cases} 5\,A \\ 80^\circ \end{cases} \quad \begin{cases} 4\,A \\ \theta_m = ? \end{cases}$$

$$T_r = k'\sin\theta, \quad kI = k'\sin\theta \Rightarrow \frac{T_e}{T_r} = \frac{5k}{k'\sin 80^\circ} = \frac{4k}{k'\sin\theta_2}$$

$$\Rightarrow \theta_2 = 52.06^\circ \xrightarrow{\times \frac{\pi}{180}} 0.92\ [Rad]$$

۴- یک گالوانومتر با مشخصات زیر در دست است.

$B = 0.1\ Wb/m^2$ ، $N = 400$ ، $l = 40\ mm$ ، $d = 20\ mm$ ، $C = 5 \times 10^{-7}\ N.m/rad$

$J = 5 \times 10^{-8}\ kg\,m^2$ ، $A = 5 \times 10^{-8}\ \frac{N.m}{rad\,s^{-1}}$ ، $R_g = 100\,\Omega$ ، $I_m = 1\ \mu A$

مطلوب است محاسبه:

۱- انحراف ماکزیمم دستگاه ۲- حساسیت جریانی دستگاه ۳- مقاومت مدار بحرانی دستگاه ۴- ضریب میرایی نوسانات دستگاه در حالت میرایی بحرانی.

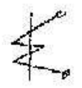
انحراف ماکزیمم ⇐ $T_e = T_r \Rightarrow NBdl\,I_m = C\theta_m \Rightarrow \theta_m = 1.5 \times 10^{-2}\ [rad]$

$= 8.6 \times 10^{-1}\ [degree]$

$S_i = \frac{\theta}{I} = \frac{150 \times 10^{-2}}{10^{-2}} = 150 \left[\frac{rad}{A} \right]$ حساسیت جریانی

$\Delta = A_c^2 - 4JC = 0 \Rightarrow A_c = 2\sqrt{JC} = 4{,}9\times10^{-4}$

$A_c = A_r + \frac{G^2}{kS_iR_c} \Rightarrow R_c = \frac{G^2}{kA_c}$, $k = \frac{1}{S_i} \Rightarrow R_c = \frac{G^2 S_i}{A_c} = 0{,}44\ [\Omega]$

کاربرد دستگاه : 

اندازه‌گیری جریان های dc و ac به عنوان آمپرمتر

ولتمتر ... ولتاژهای

$\theta = kI^2$

بازای تغییر دستگاه

جریان عبوری

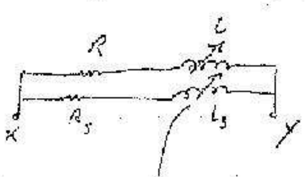
صورت ثابت

$k = \frac{\frac{1}{2}\frac{dL}{d\theta}}{C} = \frac{\left(\frac{dL}{d\theta}\right)}{2C}$ بصورت ...

الف - در رفع جریان های کمتر از حدود ۰.۱ A بدون نیاز به گسترش حوزهٔ سنجش

ب - رفع های خیلی زیاد با گسترش حوزهٔ سنجش دستگاه از طریق ؟

مدار معادل دستگاه



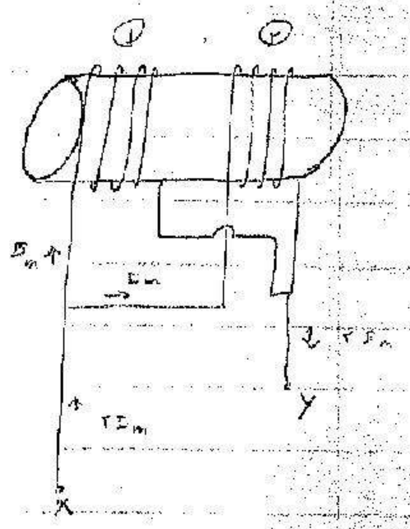
I_m: جریان ماکزیمم دستگاه

$I = nI_m$ جریان مورد نظر

چرا ؟

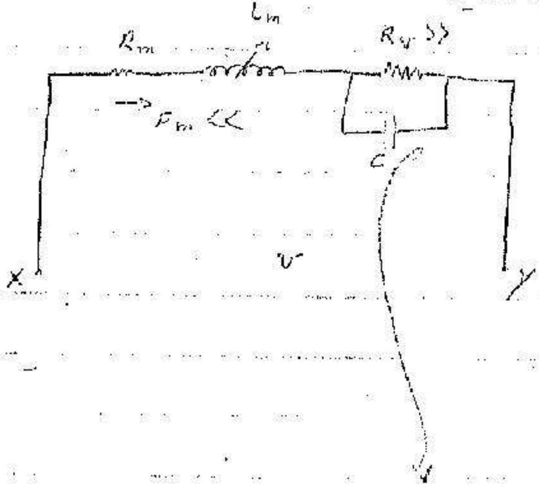
تقسیم جریان ... ... $\left\{ \begin{array}{l} Z = Z_s \\ \frac{R_m}{L_m} = \frac{R_s}{L_s} \end{array} \right.$

ثابت زمانی ... برابر



۲-

استفاده از یک مقاومت اهمی با رزیستانس خارج بار زیر



$\theta = kI^2 \Rightarrow \theta_m = kI_m^2$

$V_m = Z I_m \Rightarrow Z = \sqrt{(R_m+R_V)^2+(L\omega)^2}$

$R_m+R_V \gg L\omega \Rightarrow Z \cong R_L+R_V$

$$\begin{cases} \omega = 2\pi f = \text{const} \\ Z = \text{const} \Rightarrow \theta = k\left(\frac{V}{Z}\right)^2 \Rightarrow \theta = \frac{k}{Z^2}\cdot V^2 \Rightarrow \theta = K'V^2 \end{cases}$$

سؤال: خطای ناشی از تغییر فرکانس در حالت ولتمتر چگونه حذف می‌شود؟

خازن است می‌شود که تغییرات فرکانس تأثیر نداشته باشد:

$C = \frac{L_m}{R_V^2}$ ← !!! ثابت شود (حفظ!)

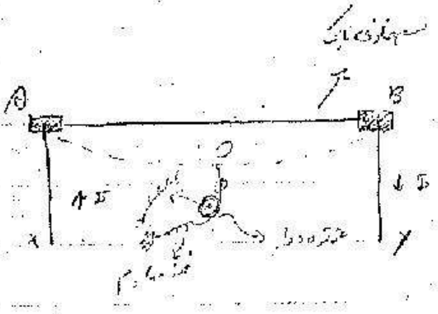
دستگاه اندازه‌گیری حرارتی:

↓

اصول عملکردی این دستگاه:

مبتنی بر انبساط حرارتی می‌باشد.

انواع دستگاه‌های حرارتی:
- ۱- دستگاه سیم حرارتی
- ۲- — — ترموکوپل
- ۳- — — بی‌متال



گرمای ایجاد شده در سیم

ظرفیت گرمایی سیم

$Q = kRI^2t = mc\Delta T = mc(T_2 - T_1)$

ضریب تبدیل ژول به کالری [illegible]

[illegible]

$\overline{AB}$: طول سیم در دمای اولیه (T_1) : l_1

$\overline{AO'B}$: (T_2) در دمای " " : l_2

$$\begin{cases} kRI^2t = mc\Delta T & ① \\ l_2 - l_1 = \Delta l = l_1\alpha\Delta T & ② \end{cases}$$

ضریب انبساط خطی (α) طول سیم نازک

در مثلث قائم الزاویه $AO' = \frac{1}{2}l_2$

و $AO = \frac{1}{2}l_1$

$\Delta l = \frac{1}{2}\sqrt{l_2^2 - l_1^2} = OO'$

$OO' = r.\theta$ → زاویه چرخش عقربه برحسب rad

شعاع قرقره

$\Rightarrow r\theta = \boxed{k'\Delta l}$

ثابت تناسب

از روابط ① و ② و ③

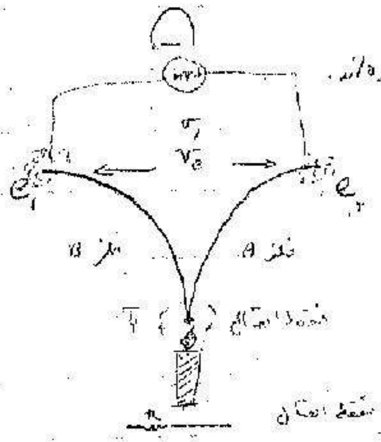
$$\Delta T = \frac{kRI^2t}{mc} = \frac{\Delta l}{l_1\alpha} = \frac{r.\theta}{k'l_1\alpha} \Rightarrow \theta = \frac{k'l_1\alpha \cdot kRI^2t}{mcr} = a.I^2$$

زاویه انحراف عقربه دستگاه با مجذور جریان عبوری از آن متناسب است $\Longrightarrow$ $\theta = aI^2$

$\theta = aI^2\, F(\Delta l)$

دستگاه ترموکوپل:

ترموکوپل: دو سیم از دو فلز متفاوت که در یک نقطه به هم متصل شده‌اند.



$\Rightarrow e_1 \neq e_2 \Rightarrow V_{Te} \neq 0$

برحسب ولت

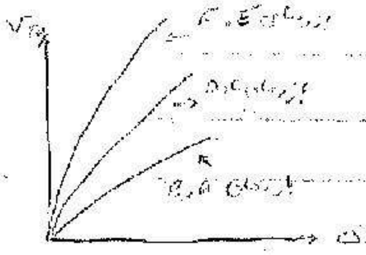
اختلاف پتانسیل تولید شده بین دو سر آزاد ترموکوپل

T_2 = دمای نقطه اتصال

T_1 = دمای محیط

$\Rightarrow T_2 - T_1 \neq 0 \Rightarrow V_{Te} \neq 0$

$V_{Te} = f(\underbrace{\text{جنس رساناها}}_{\text{مقدار ثابت}}, \text{اختلاف دما}) \Rightarrow V_{Te} = k f(\Delta T)$



$Q = k R I^2 t = m c \Delta T$

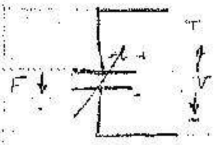
$\Delta T = k' I^2$

$\Rightarrow V_{Te} = k f(\Delta T) = k_1 f(k' I^2)$

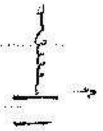
ولتاژ ترموکوپل با جریان متغیر حرارتی (مقاومت R) متناسب است.

دستگاه اندازه‌گیری الکترواستاتیکی:

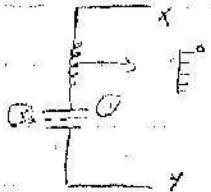
اساس کار دستگاه مبتنی بر ایجاد نیروی الکترواستاتیکی در یک خازن متغیر باشد.



$F = k \frac{Q^2}{d^2}$
$\downarrow$
نیرو متغیر است که فاصله صفحات را جابجا می‌کند.

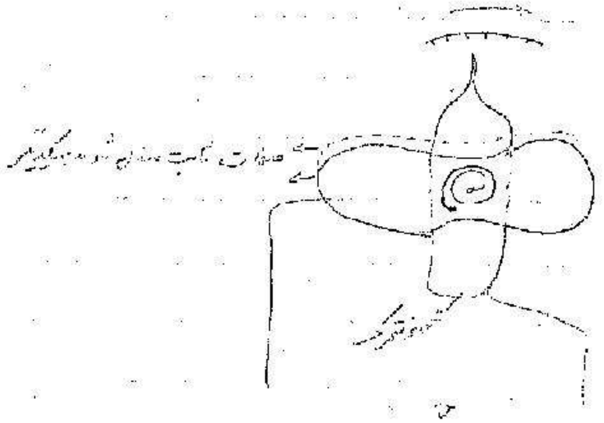


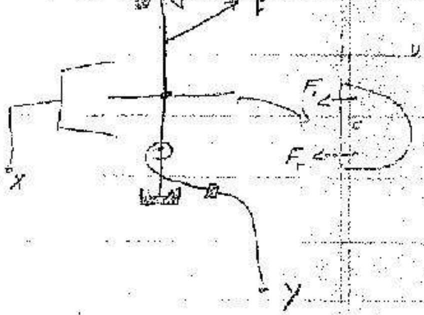
صفحه‌ی متحرک (جوشن A)
〃 〃 ثابت (〃 B)



① موقعیت صفر متحرک قبل از اعمال ولتاژ
② 〃 〃 〃 بعد از 〃 〃

$Q = CV \rightarrow$ هرگاه ولتاژ تغییر کند Q تغییر کرده و F تغییر کرده و θ تغییر می‌کند.





دستگاه نوع فوق ولتاژ AC و DC جواب می‌دهد.

محاسبه گشتاورها :

ضریب ثابت فنر مقاوم

الف - گشتاور مقاوم : $T_r = c\,\theta$

ب - گشتاور محرک : $T_e = \frac{dw}{d\theta}$

W : انرژی ذخیره شده در دستگاه

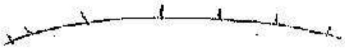
$\Rightarrow \underbrace{w = \frac{1}{2} C_m v^2}_{}$, $C_m = f(\theta)$ متغیر

مقدار موثر ولتاژ اعمال شده به دستگاه (ثابت)

$$\Rightarrow T_e = \frac{1}{2} v^2 \frac{dC_m}{d\theta}$$

در حالت تعادل : $T_r = T_e \Rightarrow c\theta = \frac{1}{2} v^2 \frac{dC_m}{d\theta} \xrightarrow{\text{فرض می‌کنیم}} \frac{dC_m}{d\theta} = k_1 = const$

$$\Rightarrow \theta = \underbrace{k}_{\text{ضریب ثابت}} v^2$$



(درجه بندی غیرخطی است)

کاربرد دستگاه :

۱- اندازه گیری ولتاژ از DC و AC به عنوان ولتمتر

X ۲- " " بار الکتریکی (Q) به عنوان کولمب سنج

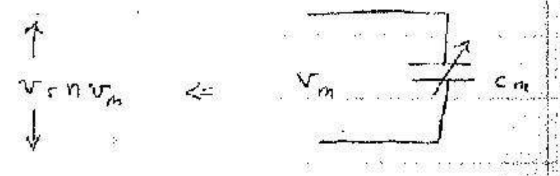
۱- مزایا و معایب ولتمتر الکترواستاتیکی ؟

۲- گسترش حوزه سنجش ولتمتر الکترواستاتیکی ؟

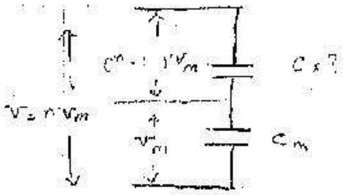
گسترش حوزه سنجش ولتمتر الکترواستاتیکی :

الف ـ استفاده از یک خازن سری

ب ـ استفاده از دو خازن سری ـ موازی



$\theta_m = kV_m^2$



$\Rightarrow (n-1)\ V_m = V_m C_m \Rightarrow C = \dfrac{C_m}{n-1}$

اشکالات موجود :

۱ـ متغیر بودن خازن C_m باعث مشکل جدی می‌باشد.

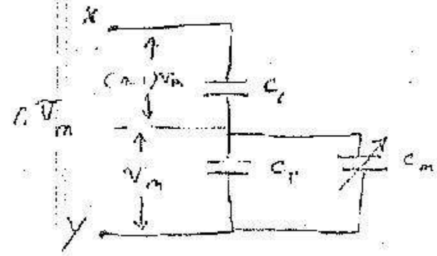
۲ـ کوچک بودن ظرفیت C باعث افزایش خطای دستگاه می‌شود.

$n >> \Rightarrow C <<$

راه حل جبران اشکالات مذکور :

استفاده از روش دوم ←

خازن نسبتاً بزرگی را با خود دستگاه موازی کرده، مجموعه را با خازنی سری ترکیب می‌دهیم.



$$\Rightarrow \begin{cases} C_1 = \dfrac{C_2 + C_m}{n-1} \\ C_2 >> C_m \end{cases}$$

عدم (تناسب با پارامتر دستگاه)

$$\Rightarrow C_1 \approx \frac{C_2}{n-1}$$

دستگاه اندازه‌گیری الکترودینامیکی :

تقریباً مشابه دستگاه‌های ∩ است با این تفاوت که به جای آهنربای دائم از یک میدان مغناطیسی سیمپیچی استفاده می‌شود.

اجزای مهم دستگاه :

۱- سیم پیچ ثابت (سری ، سیم پیچ جریان ، سیم پیچ جریان)

۲- " " متحرک : سیم پیچ ولتاژ ، سیم پیچ موازی ، سیم پیچ ولتاژ

۳- محور چرخش متصل به سیم پیچ متحرک

۴- عقربه متصل به محور چرخش

۵- فنر مارپیچ جهت ایجاد گشتاور مقاوم

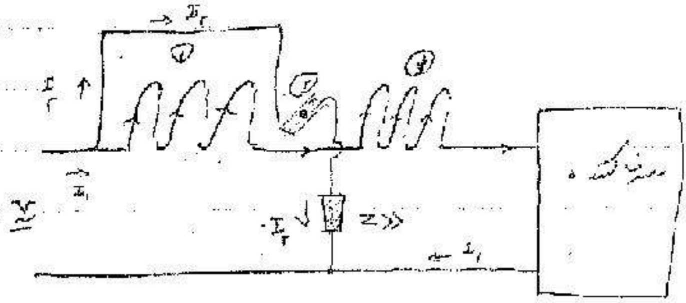
۶-

مشخصات اصلی دستگاه : I_1 ، R_1 ، L_1 : جریان ، مقاومت و ضریب خود القایی سیم پیچ اول (مستقل از زاویه انحراف دستگاه)

I_2 ، R_2 ، L_2 : " " " دوم " (" " ")

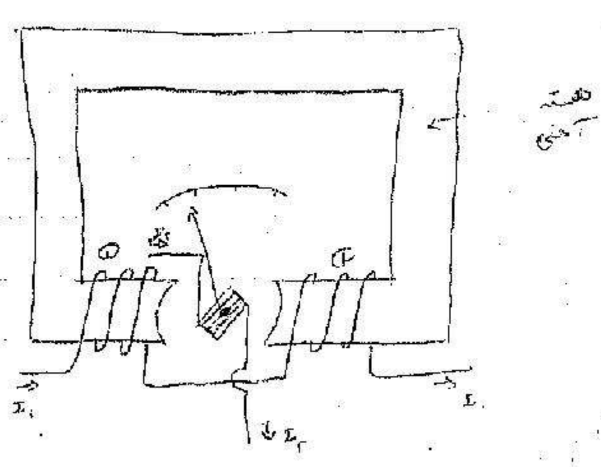
M : ضریب القای متقابل دستگاه بین دو سیم پیچ (تابع زاویه انحراف دستگاه است $M=f(\theta)$)

مدار معادل دستگاه :


I_2
①
②
③
I_2
V
I_1
I_2
$Z\gg$
I_1
مصرف کننده

مشابه دستگاه الکترودینامیکی

دارای هسته آهنی ← فرودینامیکی


هسته آهنی
①
②
③
I_1
I_1
I_2

هسته آهنی ← شار مغناطیسی را جمع می‌کند (برای رنج های پایین)

محاسبه گشتاورهای متغیر

الف - گشتاور مقاوم

c : ضریب پیچش فنر مقاوم

$T_r = c\theta$

ب - گشتاور محرک

$T_e = \frac{dw}{d\theta}$, $w = \frac{1}{2}L_1 i_1^2 + \frac{1}{2}L_2 i_2^2 + M i_1 i_2$

$\Rightarrow \frac{dw}{d\theta} = I_1 I_2 \left(\frac{dM}{d\theta}\right)$ $\xrightarrow{\text{فرض می‌کنیم}}$ $\begin{cases} M = a\theta \\ \frac{dM}{d\theta} = a = const \end{cases}$

$\Rightarrow \underline{T_e = a I_1 I_2}$

در حالت تعادل $T_e = T_r \Rightarrow \underline{a I_1 I_2 = c\theta}$ $\xrightarrow{DC \quad I_2 , I_1}$ $\underline{\theta = k I_1 I_2}$, $k = \frac{a}{c}$

$\xrightarrow{AC \quad I_2 , I_1}$ $\begin{cases} i_1 = \hat{I}_1 \sin\omega t \\ i_2 = \hat{I}_2 \sin(\omega t - \varphi) \end{cases}$

$\varphi = (\hat{I}_1 , I_2)$ $\Rightarrow$ $\underline{\theta = k I_1 I_2 \cos\varphi}$

$\hat{I}_2$ ، $\hat{I}_1$ مقادیر مؤثر جریان های

$I_1 = I_{e_1} = \frac{\hat{I}_1}{\sqrt{2}}$

$I_2 = I_{e_2} = \frac{\hat{I}_2}{\sqrt{2}}$

$T_e = \int_0^T i_1 i_2 \, dt$

کاربرد دستگاه :

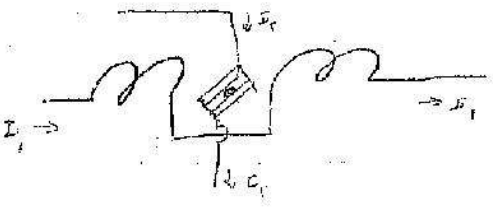
1- اندازه گیری جریان به عنوان آمپرمتر
2- " ولتاژ " ولتمتر } امکان پذیر ولی توصیه نمی شود
3- " توان اکتیو " واتمتر
4- " توان راکتیو " وارمتر } اکثراً به همین منظور [illegible]
5- " ضریب توان (cos φ) به عنوان کسینوس فی متر
6- " فرکانس (f) به عنوان فرکانس متر } از طریق اتصالات خاص [illegible] امکان [illegible]

آمپرمتر الکترودینامیکی

$$\overset{\text{زاویه انحراف [illegible]}}{\theta} = \underset{\text{ضریب ثابت}}{k}\ \overset{\text{جریان سیم پیچ اول}}{I_1}\ \overset{\text{جریان سیم پیچ دوم}}{I_2} \cos\varphi$$

$$\varphi = (\widehat{I_1, I_2})$$

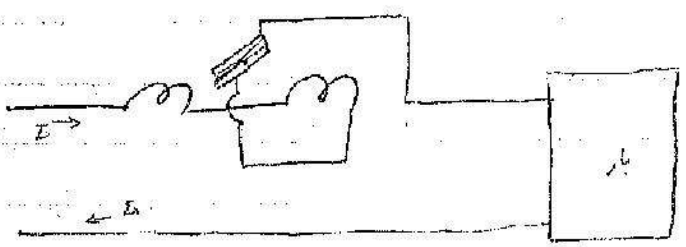
زاویه اختلاف فاز بین جریان‌های I_1 و I_2



I: جریان مورد نظر

۱) I_1 و I_2 با جریان مورد نظر ارتباط خطی داشته باشد:

۲) $\cos\varphi = cte$ ← راه حل: دو سیم پیچ با هم اتصال سری داشته باشند



$$I_1 = I_2 = I$$

$$\varphi = (\widehat{I_1, I_2}) = 0$$

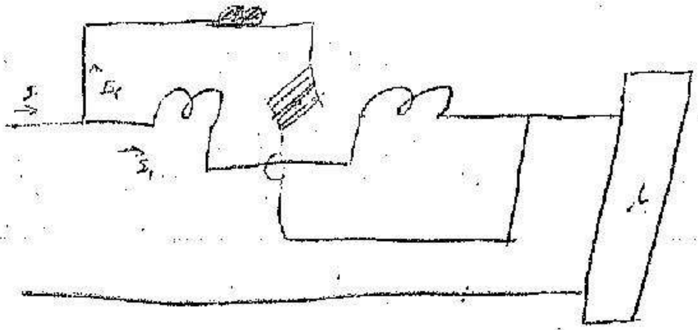
اشکالات موجود:

۱- بالا بودن امپدانس آمپرمتر

۲- کم بودن رنج آمپرمتر (کمتر از ۰/۵ آمپر)

راه حل مشکل: موازی کردن سیم پیچ‌ها به شرط هم برقراری رابطه زیر:

$$\frac{L_1}{R_1} = \frac{L_2}{R_2}$$



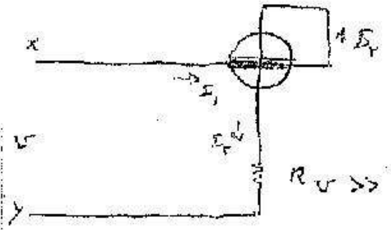
$$I_1 = k_1 I_\phi$$

$$I_2 = (1-k_1) I_\phi = k_2 I \quad \Rightarrow \quad \theta = k k_1 k_2 I^2 = k_i I^2$$

$$\varphi = 0 \Rightarrow \cos\varphi = 1$$

۲- ولتمتر الکترودینامیکی :

اتصال سری دو سیم پیچ دستگاه به همراه یک مقاومت اهمی خیلی بزرگ



x
y
V
I_2
I_1
I_2
$R_V >>$

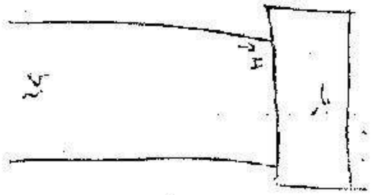
$$\begin{cases} I_1 = I_2 = I_2 \approx \dfrac{V}{R} \\ \cos\varphi = 1 \end{cases} \Rightarrow \theta = k\frac{V^2}{R_V^2} = \underbrace{k_V \cdot V^2}$$

ولتمتر

۳- واتمتر الکترودینامیکی :

* * * *

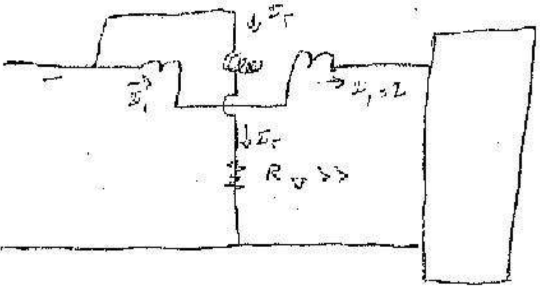
⇐ مدل اصلی (از تست الکترودینامیکی)



$\tilde{V}$
I
بار

$$P = V I \cos\varphi'$$

$$\varphi' = (\hat{V, I})$$

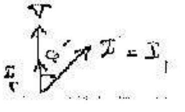


I_2
I_1
$I_2 = I$
I_2
$R_V >>$

دیاگرام برداری

* *

* *



V
φ'
$I = I_1$
I_2

$$\begin{cases} I_2 \approx \dfrac{V}{R_V} \\ (\hat{I_2, V}) \approx 0 \end{cases}$$ بار اهمی ⇐ $\varphi = \varphi'$

درجه‌های صفحه مدرج خطی جریان نسبت به ولتاژ همیشه خطی است

$\theta = k I_1 I_2 \cos\varphi$

$I_1 = I$

$I_2 = \frac{V}{R_V}$

$\varphi = \varphi'$

$\Rightarrow \theta = \frac{k}{R_V} \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi' \Rightarrow \theta = k' P$

رابطه خطی ← با رسم نمودار نشان

فرض می‌کنیم $(\hat{I_2, V}) = \delta \neq 0$

در این صورت

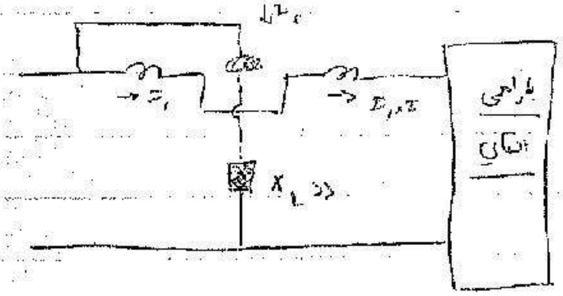
۱- خطای مربوطه چقدر است؟

۲- چگونه می‌توان این خطا را حذف کرد؟

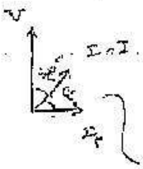
۴- وارمتر الکترودینامیکی:

$Q = VI\sin\varphi'$

$\sin\varphi' = \cos(\frac{\pi}{2} - \varphi)$



$$\begin{cases} I_2 \simeq \frac{V}{X_L} << \\ (\hat{I_2, V}) \simeq \frac{\pi}{2} \end{cases}$$



$$\begin{cases} \varphi = (\hat{I_1, I_2}) \\ \varphi = \frac{\pi}{2} - \varphi' \end{cases}$$

$\Rightarrow \theta = k\frac{V}{X_L} I \cos(\frac{\pi}{2} - \varphi') = \frac{k}{X_L} Q$ وارمتر

اگر دستگاه را مستقیماً به DC ببریم دستگاه صفر را (به خاطر X_L)

در حالت واقعی $(\hat{V, I_2}) = \frac{\pi}{2} - \gamma$ ، $\gamma <<$

۱- خطای مربوطه چقدر است؟

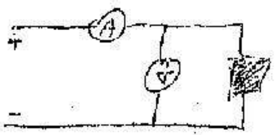
۲- راه حل حذف این خطا چیست؟

روش‌های اندازه‌گیری:

۳- ضریب خودالقایی L_x $\Rightarrow$ ۳-۱- روش ولت‌آمپرمتری
۳-۲- " " " واتمتری
۳-۳- روش ۳ ولتمتری
۳-۴- " ۳ آمپرمتری
۳-۵- روش پل

۳-۱ ۱- تحت ولتاژ dc
۲- " " ac

1-dc



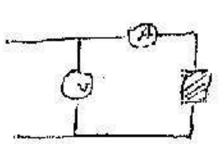
$\Rightarrow r_x = \frac{V_{dc}}{I_{dc}}$

2- ac

روش ۱ مناسب‌تر است یا ۲؟

$R_x \ll Z_x$

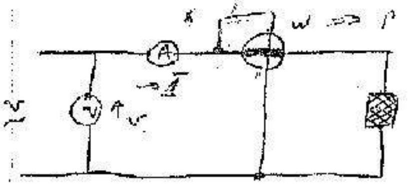
Z_x را بدست آورده سپس محاسبه می‌کنیم



$Z_x = \sqrt{R_x^2 + (L\omega)^2}$

$$\Rightarrow L_x = \frac{1}{2\pi f}\sqrt{\left(\frac{V_{ac}}{I_{ac}}\right)^2 - \left(\frac{V_{dc}}{I_{dc}}\right)^2}$$

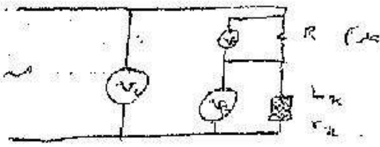
۳-۲



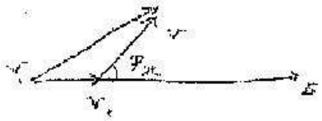
$W \Rightarrow P = r_x \cdot I^2 \Rightarrow R_x = \frac{P \longrightarrow \text{قرائت واتمتر}}{I^2 \longrightarrow \text{قرائت آمپرمتر}}$

$$L_x = \frac{1}{2\pi f}\sqrt{\left(\frac{V}{I}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2}$$

۲-۲ اندازه‌گیری سه ولتاژ متفاوت V_1 , V_2 , V_3


~
V_1
V_2
V_3
R معلوم
↓I
L_x
r_x

بداشتن V_1 ، V_2 و V_3 ، $\cos$ بدست


V_1
V_3
φ_x
V_2
I

$$V_1^2 = V_2^2 + V_3^2 - 2V_2V_3\cos(180-\varphi_x)$$

$$= V_2^2 + V_3^2 + 2V_2V_3\cos\varphi_x$$

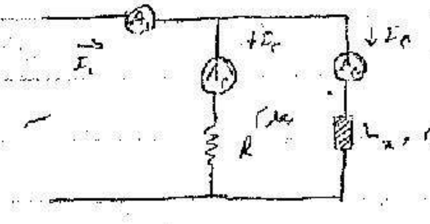
$$\cos\varphi_x = \frac{V_1^2 - V_2^2 - V_3^2}{2V_2V_3}$$

$$\frac{r_x}{Z_x} = \cos\varphi_x \quad ①$$

$$Z_x = \frac{V_3}{I} \quad , \quad I = \frac{V_2}{R} \quad \Rightarrow \quad Z_x = \frac{V_3}{V_2}\cdot R \quad ②$$

$$①\,,\,② \Rightarrow L_x = \frac{1}{2\pi f}\sqrt{Z_x^2 - r_x^2}$$

۳-۲ روش سه آمپرمتری

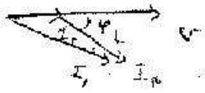

A_1
$\vec{I_1}$
A_2
I_2
A_3
I_3
~
R معلوم
L_x , r_x

$$\vec{I_1} = \vec{I_2} + \vec{I_3}$$

$R_A \simeq 0$

I_3 نسبت به V پس‌فاز

$$I_1^2 = I_2^2 + I_3^2 + 2I_2I_3\cos\varphi_L$$


V
φ_L
I_2
I_1
I_3

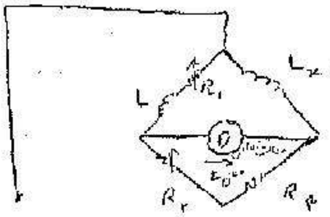
$$\Rightarrow \cos\varphi_L = \frac{I_1^2 - I_2^2 - I_3^2}{2I_2I_3} = \frac{r_x}{Z_x} \quad (1)$$

$$Z_x = \frac{V}{I_3} = \frac{RI_2}{I_3} \quad (2)$$

$r_x =$ [illegible] $\Rightarrow r_x = Z_x \cos\varphi_L$

$$\begin{cases} L_x = \frac{1}{\omega}\sqrt{(Z_x)^2 - (r_x)^2} \\ w = 2\pi f \end{cases}$$

۳-۴- روش پل



$\Rightarrow R_2(r_x + jL_x w) = R_4(R_1 + jLw)$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_2 r_x = R_1 R_4 \\ R_2 L_x = R_4 L \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} r_x = \frac{R_1 R_4}{R_2} \\ L_x = \frac{R_4}{R_2} . L \end{cases}$$

۴- روش های اندازه گیری ضریب القاء متقابل دو سیم پیچ :

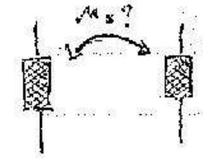
۱- روش ولتمتر آمپرمتری

۲- ۱ انتقال سری در دو حالت موافق و مخالف

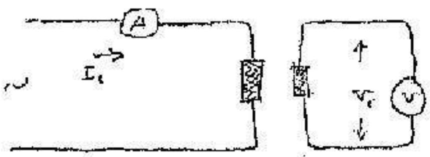
بر اساس جهت شارها

۳- ۱ پل

کمترین [illegible] مستقیم



۴-۱ ←



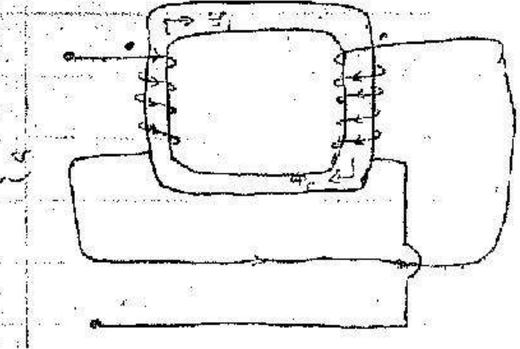
بهترین ولتمتر الکترواستاتیکی

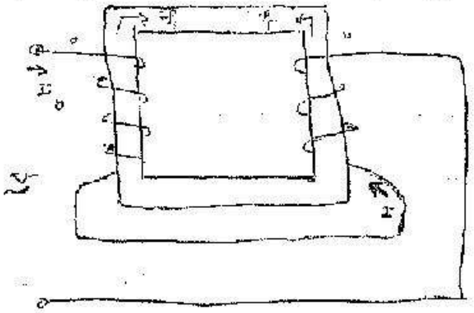
$R_V \cong \infty$ (خیلی خیلی زیاد) $\Rightarrow I_2 \cong 0$

$V_2 = M w I_1 \Rightarrow M = \frac{V_2}{w I_1}$

۳-۴

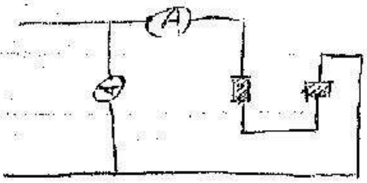
موافق





$$Z_a = r_1 + r_2 + j\omega(L_1 + L_2 + 2M)$$

$$Z_b = r_1 + r_2 + j\omega(L_1 + L_2 - 2M)$$



اتصال
موافق

فرض مکان

$$L_a = L_1 + L_2 + 2M = \frac{1}{\omega}\sqrt{\left(\frac{V_a}{I_a}\right)^2 - (r_1 + r_2)^2} \quad (1)$$

← جمع مقاومت ها [illegible] (۲۰۱۰)

$$L_b = L_1 + L_2 - 2M = \frac{1}{\omega}\sqrt{\left(\frac{V_b}{I_b}\right)^2 - (r_1 + r_2)^2} \quad (2)$$

$$\Rightarrow M = \frac{L_a - L_b}{4}$$

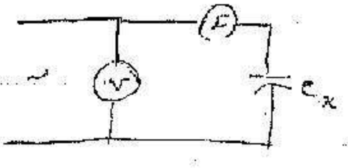
۴ - روش های اندازه گیری ظرفیت خازن . ۱- روش ولتمتر آمپرمتری

۲- روش مقایسه جریان

۳- " " ولتاژ

۴ " پل [illegible] ۴ [illegible] هست

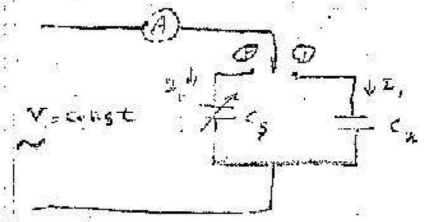
۱-۴



$$X_c = \frac{1}{C_x \omega} = \frac{V}{I}$$

$$C_x = \frac{I}{V\omega}$$

۳-۴



$(1) \Rightarrow I_1 = V \cdot C_x \cdot \omega$

$(2) \Rightarrow I_2 \cong V \cdot C_s \cdot \omega$

$$\Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{C_x}{C_s}$$

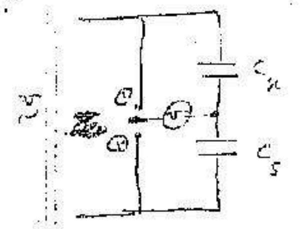
$$\Rightarrow C_x = \frac{I_1}{I_2} C_s$$

اگر ابتدا [illegible] I_1 [illegible] تغییر [illegible]

C_s تغییر $I_1 = I_2 \Leftarrow$

[illegible] $\Rightarrow C_x = C_s$

۳-۴



$(1) \quad V_1 = \frac{I}{C_x \omega}$

$(2) \quad V_2 = \frac{I}{C_s \cdot \omega}$

$$\Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{C_s}{C_x} \Rightarrow C_x = \frac{V_2}{V_1} C_s$$

اگر با تغییر $C_s \leftarrow V_1 = V_2 \Leftarrow C_x = C_s$ ؛ [illegible]