

CHƯƠNG 8.

ĐO DÒNG ĐIỆN (2 LT)

8.1. Cơ sở chung.

Trong các đại lượng điện, dòng điện và điện áp là các đại lượng cơ bản nhất. Vì vậy trong công nghiệp cũng như trong các công trình nguyên cứu khoa học người ta luôn quan tâm đến các phương pháp và thiết bị đo dòng điện.

Các phương pháp đo dòng điện phổ biến gồm:

- **Phương pháp đo trực tiếp:** dùng các dụng cụ đo dòng điện như ampemét, mili ampemét, micro ampemét ... để đo dòng và trực tiếp đọc kết quả trên thang chia độ của dụng cụ đo.

- **Phương pháp đo gián tiếp:** có thể dùng vônmet đo điện áp rơi trên một điện trở mẫu (mắc trong mạch có dòng điện cần đo chạy qua); thông qua phương pháp tính toán ta sẽ được dòng điện cần đo.

- **Phương pháp so sánh:** đo dòng điện bằng cách so sánh dòng điện cần đo với dòng điện mẫu, chính xác; ở trạng thái cân bằng của dòng cần đo và dòng mẫu sẽ đọc được kết quả trên mẫu.

Có thể so sánh trực tiếp và so sánh gián tiếp.

8.2. Các dụng cụ đo dòng điện.

8.2.1. Yêu cầu đối với các dụng cụ đo dòng điện:

Các yêu cầu cơ bản bao gồm công suất tiêu thụ và dải tần hoạt động.

a) Công suất tiêu thụ: khi đo dòng điện ampemét được mắc nối tiếp với các mạch cần đo. Như vậy ampemét sẽ tiêu thụ một phần năng lượng của mạch đo từ đó gây sai số phương pháp đo dòng. Phần năng lượng này còn được gọi là công suất tiêu thụ của ampemét P_A , được tính:

$$P_A = I_A^2 \cdot R_A$$

với: I_A là dòng điện qua ampemét (có thể xem là dòng điện cần đo)

R_A là điện trở trong của ampemét.

Trong phép đo dòng điện yêu cầu công suất tiêu thụ P_A càng nhỏ càng tốt, tức là yêu cầu R_A càng nhỏ càng tốt.

b) Dải tần hoạt động: khi đo dòng điện xoay chiều, tổng trở của ampemét còn chịu ảnh hưởng của tần số:

$$Z_A = R_A + X_A$$

với: $X_A \approx \omega L_A$ là thành phần trở kháng của cuộn dây ampemét.

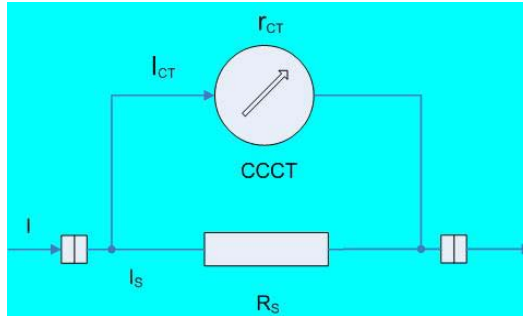
Để đảm bảo cấp chính xác của dụng cụ đo, dụng cụ đo xoay chiều phải được thiết kế chỉ để đo ở các miền tần số sử dụng nhất định (dải tần nhất định). Nếu dùng dụng cụ đo dòng ở miền tần số khác miền tần số thiết kế sẽ gây ra sai số do tần số.

8.2.2. Các ampemét một chiều:

a) Các đặc tính cơ bản: các ampemét một chiều được chế tạo chủ yếu dựa trên cơ cấu chỉ thị từ điện với các đặc tính cơ bản sau:

- Dòng cho phép: thường là $10^{-1} \div 10^{-2} \text{A}$
- Cấp chính xác: 1,5; 1; 0,5; 0,2; cao nhất có thể đạt tới cấp 0,05.
- Điện trở cơ cấu: khoảng từ $20\Omega \div 2000\Omega$.

Vì vậy muốn sử dụng cơ cấu này để chế tạo các dụng cụ đo dòng điện lớn hơn dòng qua cơ cấu chỉ thị, phải dùng thêm một điện trở sun phân nhánh nối song song với cơ cấu chỉ thị từ điện (hình 8.1):



Hình 8.1. Mắc điện trở sun phân nhánh nối song song với cơ cấu chỉ thị từ điện

Sơ đồ cấu tạo của ampemét từ điện trên hình 8.1.

b) Chọn điện trở sun cho ampemét từ điện chỉ có một thang đo: dựa trên các thông số của cơ cấu chỉ thị từ điện và dòng điện cần đo, có thể tính giá trị điện trở sun phù hợp cho từng dòng điện cần đo là:

$$R_S = \frac{r_{ct}}{n-1} \quad (8-2)$$

với: r_{ct} : điện trở trong của cơ cấu chỉ thị từ điện

$n = \frac{I}{I_{ct}}$: hệ số mở rộng thang đo của Ampemét

I : dòng điện cần đo

I_{ct} : dòng cực đại mà cơ cấu chỉ thị chịu được.

Đối với các ampemét đo dòng điện nhỏ hơn 30A thì sun đặt trong vỏ của ampemét. Còn các ampemét dùng đo dòng điện lớn hơn hoặc bằng 30A thì sun đặt ngoài vỏ (coi như một phụ kiện kèm theo ampemét; phần này sẽ nghiên cứu trong mục đo dòng điện lớn).

c) Chọn điện trở sun cho ampemét từ điện có nhiều thang đo: trên cơ sở mắc sun song song với cơ cấu chỉ thị có thể chế tạo ampemét từ điện có nhiều thang đo.

Hình 8.2 là sơ đồ ampemét từ điện 4 thang đo (I_1, I_2, I_3, I_4). Các điện trở sun $R_{S1}, R_{S2}, R_{S3}, R_{S4}$ mắc nối tiếp với nhau rồi nối song song với r_{ct} . Tính các điện trở sun $R_{S1}, R_{S2}, R_{S3}, R_{S4}$ bằng cách lập hệ phương trình ứng với các dòng khác nhau:

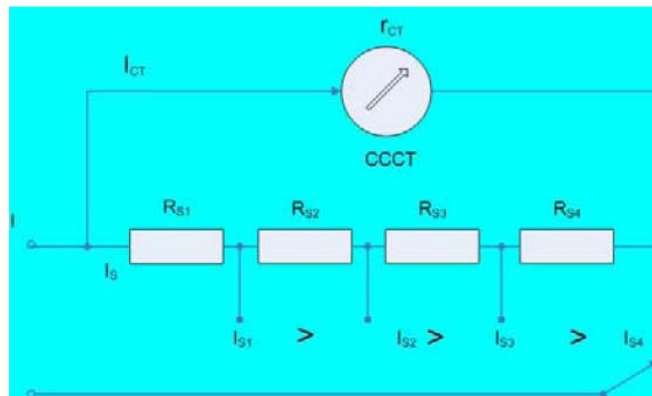
$$R_{\Sigma S4} = \frac{r_{CT}}{n_4 - 1} = R_{S1} + R_{S2} + R_{S3} + R_{S4} ; \quad n_4 = \frac{I_4}{I_{CT}}$$

$$R_{\Sigma S3} = \frac{r_{CT} + R_{S4}}{n_3 - 1} = R_{S1} + R_{S2} + R_{S3} ; \quad n_3 = \frac{I_3}{I_{CT}}$$

$$R_{\Sigma S2} = \frac{r_{CT} + R_{S4} + R_{S3}}{n_2 - 1} = R_{S1} + R_{S2} ; \quad n_2 = \frac{I_2}{I_{CT}}$$

$$R_{\Sigma S1} = \frac{r_{CT} + R_{S4} + R_{S3} + R_{S2}}{n_1 - 1} = R_{S1} ; \quad n_1 = \frac{I_1}{I_{CT}}$$

Ta có 4 phương trình với 4 ẩn số, giải ra tìm được R_{S1} , R_{S2} , R_{S3} , R_{S4} .



Hình 8.2. Mắc điện trở sun trong ampemét có nhiều thang đo.

Để giữ cho cấp chính xác của ampemét từ điện không thay đổi ở các giới hạn đo khác nhau, phải chế tạo sun với độ chính xác cao hơn độ chính xác của cơ cấu từ điện ít nhất là một cấp.

Ví dụ cơ cấu từ điện có cấp chính xác 0,5 thì sun phải có cấp chính xác 0,2. Thường chế tạo sun bằng mangannin và chỉnh định rất chính xác.

d) Sai số do nhiệt độ ampemét: thường sun được chế tạo bằng các vật liệu có điện trở suất ít thay đổi theo nhiệt độ như mangannin, do đó điện trở của sun không thay đổi theo nhiệt độ. Trong khi đó khung quay của cơ cấu chỉ thị làm bằng đồng có điện trở thay đổi theo nhiệt độ theo qui luật:

$$r_{ct} = r_{cto}(1 + \alpha t)$$

với: r_{ct} : điện trở của cơ cấu ở nhiệt độ $t^{\circ}\text{C}$

r_{cto} : điện trở của cơ cấu ở 0°C

α : hệ số nhiệt độ của dây quấn trên khung quay (đối với đồng $\alpha = 0,04\%/^{\circ}\text{C}$)

- Tính sai số do nhiệt độ của ampemét từ điện:

Gọi: I : dòng điện chạy qua Ampemét

I_{cto} , I_{ct} : dòng điện chạy qua cơ cấu chỉ thị ở nhiệt độ 0°C , $t^{\circ}\text{C}$

R_{A0} : điện trở của Ampemét ở nhiệt độ 0°C

R_{At} : điện trở của Ampemét ở $t^{\circ}\text{C}$

R_S : điện trở sun của ampemét tương ứng với dòng điện I .

Ta có sai số của dòng điện qua cơ cấu chỉ thị:

$$\Delta I_{ct} = I_{cto} - I_{ct} = \frac{I}{n_0} - \frac{I}{n_t}$$

$$\text{với:} \quad n_0 = \frac{r_{cto} + R_S}{R_S}; \quad n_t = \frac{r_{ct} + R_S}{R_S}; \quad r_{ct} = r_{cto}(1 + \alpha t)$$

$$\Rightarrow \Delta I_{ct} = I \cdot \frac{R_S}{r_{cto} + R_S} - I \cdot \frac{R_S}{r_{ct} + R_S}$$

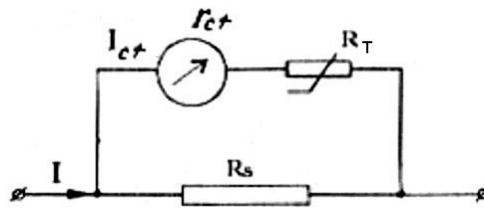
$$\Delta I_{ct} = I \cdot \frac{R_S}{(r_{cto} + R_S)} \cdot \frac{r_{cto} \cdot \alpha \cdot t}{[r_{cto}(1 + \alpha t) + R_S]}$$

vậy sai số tương đối của ampemét do nhiệt độ là:

$$\begin{aligned}\gamma_t \% &= \frac{\Delta I_{ct}}{I_{ct}} \cdot 100(\%) \\ &= \frac{r_{ct0} \cdot \alpha \cdot t}{r_{cto} + R_S} \cdot 100(\%) \approx \frac{r_{ct0} \cdot \alpha \cdot t}{r_{cto}} \cdot 100 = \alpha \cdot t \cdot 100(\%)\end{aligned}$$

- **Khắc phục sai số do nhiệt độ của ampemét từ điện:** ở những dụng cụ đo có độ chính xác thấp sai số nhiệt độ γ_t thường nhỏ hơn sai số của cơ cấu. Ở những dụng cụ đo cấp chính xác cao, γ_t thường lớn hơn sai số cơ cấu. Để khắc phục nhược điểm này người ta phải tìm cách loại trừ hoặc giảm sai số do nhiệt độ.

Biện pháp đơn giản nhất là nối tiếp vào mạch cơ cấu chỉ thị một điện trở R_T (như hình 8.3):



Hình 8.3. Mạch điện trở phụ để bù sai số do nhiệt độ.

Theo sơ đồ này, sai số nhiệt độ được tính:

$$\gamma_t = \frac{r_{ct} \cdot \alpha \cdot t + R_T \cdot \beta \cdot t}{r_{ct} + R_T}$$

với: β : hệ số nở nhiệt của nhiệt điện trở R_T .

Để bù hoàn toàn sai số nhiệt độ ($\gamma_t = 0$) phải thỏa mãn điều kiện:

$$r_{ct} \cdot \alpha \cdot t = -R_T \cdot \beta \cdot t$$

như vậy điện trở R_T phải có hệ số nhiệt điện β âm. Giá trị R_T được tính :

$$R_T = \frac{r_{ct} \cdot \alpha}{-\beta}$$

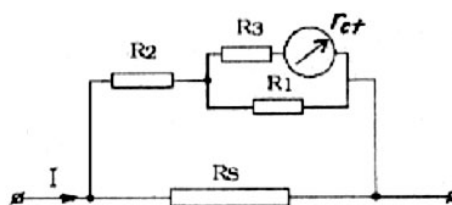
khi đó điện trở sun của ampemét được tính là:

$$R_S = \frac{r_{ct} + R_T}{n - 1}$$

Nhiệt điện trở có hệ số nhiệt độ β càng lớn thì giá trị R_T càng nhỏ và R_S sẽ nhỏ, sai số hệ thống đo ampemét gây ra sẽ nhỏ.

Thường dùng R_T là nhiệt điện trở bán dẫn. Nhiệt điện trở bán dẫn là phần tử phi tuyến đối với nhiệt độ. Vì vậy nó chỉ bù hoàn toàn ở một nhiệt độ nhất định. Điều này khó thực hiện.

Thực tế trong các ampemét từ điện chính xác cao, thường bù nhiệt độ bằng nhiệt điện trở đồng, phối hợp với điện trở manganin, bố trí mạch theo sơ đồ hình 8.4:



Hình 8.4. Mạch bù sai số do nhiệt độ trong các ampemét từ điện chính xác cao

Trong sơ đồ này: R_S , R_1 , R_2 bằng Manganin. Còn r_{ct} và R_3 bằng đồng. Các điện trở này phải phối hợp với nhau sao cho khi dòng I không đổi; nhiệt độ thay đổi nhưng vẫn giữ dòng qua cơ cấu không đổi.

8.2.3. Các ampemét xoay chiều:

Tùy theo phạm vi và mục đích sử dụng mà có các loại ampemét xoay chiều cơ bản sau:

- Để đo dòng điện xoay chiều miền tần số công nghiệp: thường dùng các ampemét điện từ, điện động và sắt điện động.
- Đo dòng điện ở miền tần số âm tần và có thể dùng ở nhiều thang đo khác nhau: thường sử dụng ampemét vòng từ điện chỉnh lưu.
- Đo dòng xoay chiều có tần số cao và siêu cao: thường dùng ampemét nhiệt điện.

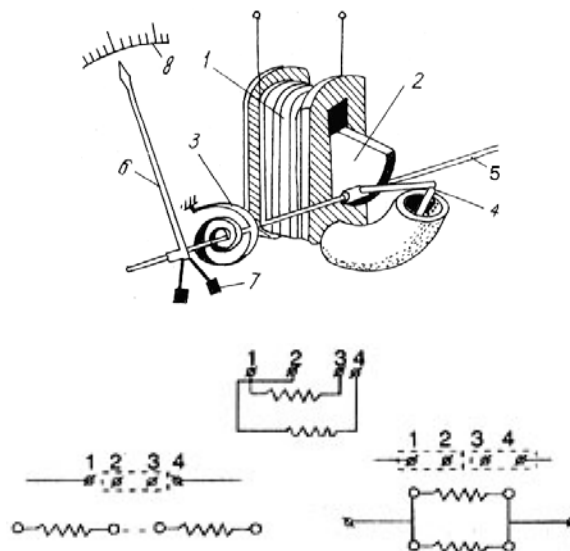
a) Ampemét điện từ : được chế tạo dựa trên cơ cấu chỉ thị điện từ. Mỗi cơ cấu điện từ được chế tạo với số ampe.vòng nhất định (I.W):

- Cơ cấu cuộn dây tròn: thường có I.W = 200A vòng
- Cơ cấu cuộn dây dẹt: thường có I.W = 100 ÷ 150A vòng
- Cơ cấu có mạch từ khép kín: I.W = 50 ÷ 1000A vòng

Như vậy để mở rộng thang đo của ampemét điện từ chỉ cần thay đổi thể nào để đảm bảo $I.W = \text{const}$.

- **Mở rộng thang đo của ampemét điện từ bằng phương pháp phân đoạn cuộn dây tĩnh của cơ cấu điện từ:** ampemét điện từ nhiều thang đo được chế tạo bằng cách chia cuộn dây tĩnh thành nhiều phân đoạn bằng nhau, thay đổi cách nối ghép các phân đoạn (song song hoặc nối tiếp) để tạo các thang đo khác nhau.

Ví dụ ampemét điện từ có hai thang đo: ta chia cuộn dây tĩnh thành hai phần bằng nhau. Nếu nối tiếp hai phân đoạn với nhau ta sẽ đo được dòng điện là $2I$ (h.8-5).



Hình 8.5. Mở rộng thang đo của ampemét điện từ:

a) Đo được dòng điện I

b) Đo được dòng điện $2I$

Tuy nhiên phương pháp này cũng chỉ áp dụng để chế tạo ampemét điện từ có nhiều nhất là ba thang đo, vì khi tăng số lượng thang đo việc bố trí mạch chuyển

thang đo phức tạp không thể thực hiện được.

- **Mở rộng thang đo của ampemét điện từ bằng cách dùng biến dòng:** khi muốn tăng số lượng thang đo lên nhiều thường kết hợp biến dòng với ampemét điện từ để mở rộng giới hạn đo dòng xoay chiều.

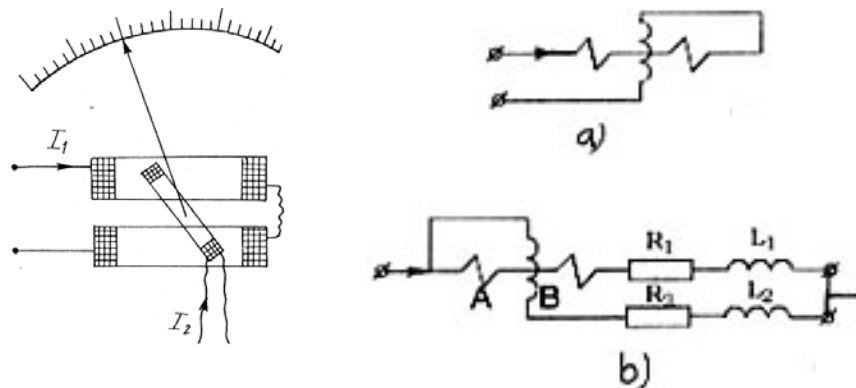
b) Ampemét điện động: thường dùng để đo dòng điện ở miền tần số cao hơn tần số công nghiệp (cỡ $400 \div 2000\text{Hz}$). Do cơ cấu điện động là cơ cấu chính xác cao đối với tín hiệu xoay chiều vì vậy ampemét điện động cũng có chính xác cao ($0,2 \div 0,5$) nên thường được sử dụng làm dụng cụ mẫu.

Có hai loại sơ đồ mạch của ampemét điện động :

- *Khi dòng điện cần đo nhỏ hơn hoặc bằng $0,5\text{A}$:* thì trong mạch của ampemét cuộn dây động và cuộn dây tĩnh ghép nối tiếp với nhau (H.8.6a).

- *Khi dòng điện cần đo lớn hơn $0,5\text{A}$:* thì trong sơ đồ mạch của ampemét cuộn dây động và cuộn dây tĩnh ghép song song với nhau (H.8.6b).

Các phần tử R và L trong sơ đồ này dùng để tạo mạch bù sai số do tần số và làm cho dòng điện trong cuộn dây động và trong cuộn dây tĩnh cùng pha với nhau.



Hình 8.6. Cách sắp xếp mạch ampemét điện động:

a) *Mắc nối tiếp;*

b) *Mắc song song*

A: *cuộn dây tĩnh;*

B: *cuộn dây động*

Cách mở rộng thang đo và chế tạo ampemét điện động nhiều thang giống như ở ampemét điện từ.

Sai số do tần số của các ampemét điện từ và điện động ở tần số vài kHz đến vài chục kHz khá lớn. Vì vậy để đo dòng điện âm tần người ta thường dùng các ampemét từ điện chỉnh lưu.

c) Ampemét chỉnh lưu: là ampemét kết hợp cơ cấu chỉ thị từ điện và mạch chỉnh lưu bằng điốt hoặc chỉnh lưu bằng cặp nhiệt ngẫu (gọi là ampemét nhiệt điện).

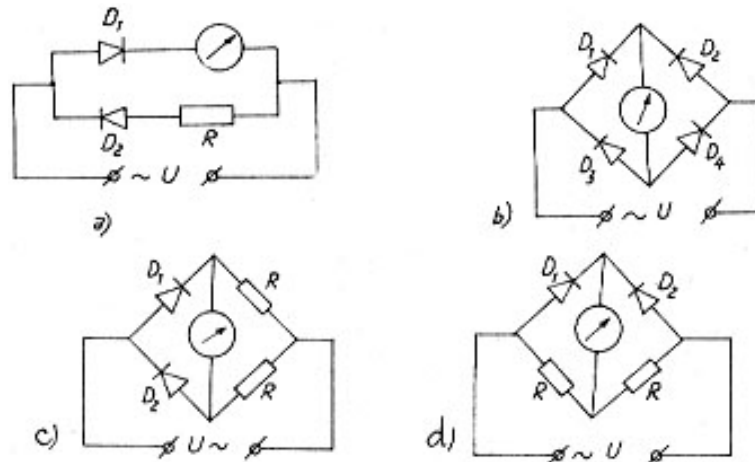
Các mạch chỉnh lưu thường gặp trong các ampemét chỉnh lưu bao gồm: chỉnh lưu nửa chu kì: hình 8.7a; chỉnh lưu hai nửa chu kì: hình 8.7b,c,d. Trong các mạch chỉnh lưu này dùng điốt dòng (Si hoặc Ge).

- *Mạch theo hình 8.7b:* dòng điện được chỉnh lưu hoàn toàn và qua cơ cấu chỉ thị, vì vậy hệ số chỉnh lưu cao.

- *Mạch theo hình 8.7c:* một phần dòng điện được chỉnh lưu và qua cơ cấu chỉ thị, phần còn lại ở điện trở R, hệ số chỉnh lưu của mạch không cao.

- *Mạch theo hình 8.7d:* một phần dòng điện được chỉnh lưu và qua cơ cấu chỉ thị, phần còn lại qua điện trở R, hệ số chỉnh lưu của mạch không cao.

- Nói chung các ampemét chỉnh lưu chính xác không cao vì hệ số chỉnh lưu thay đổi theo nhiệt độ, trong đó khi nhiệt độ thay đổi, điện trở thuận và ngược của điốt thay đổi không như nhau (cụ thể khi nhiệt độ tăng, điện trở ngược của điốt giảm nhiều hơn so với điện trở thuận). Dẫn đến hệ số chỉnh lưu của điốt sẽ giảm.



Hình 8.7. Các dạng ampemét chỉnh lưu

- **Cách biến đổi để khắc độ Ampemét chỉnh lưu theo trị hiệu dụng:** với cách bố trí các sơ đồ chỉnh lưu, các ampemét chỉnh lưu sẽ chỉ giá trị trung bình của dòng xoay chiều, nhưng thông thường các dụng cụ điện từ, điện động... đo dòng xoay chiều được khắc độ theo giá trị hiệu dụng vì vậy để thống nhất về khắc độ các dụng cụ đo xoay chiều thì các ampemét chỉnh lưu cũng phải khắc độ theo trị hiệu dụng.

Cách biến đổi để khắc độ Ampemét chỉnh lưu theo trị hiệu dụng như sau:

Phương trình đặc trưng của cơ cấu từ điện:

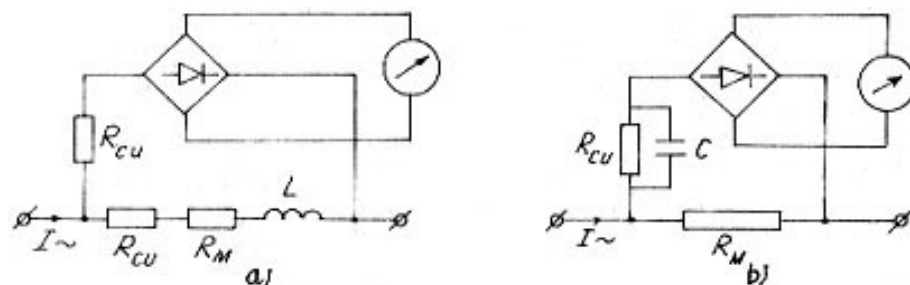
$$\alpha = \frac{B.S.W}{D} \cdot I_{tb} = \frac{B.S.W}{D} \cdot I_{tb} \cdot \frac{I}{I} = \frac{B.S.W}{D} \cdot \frac{I}{(I/I_{tr.b})}$$

gọi: $I/I_{tr.b} = k_d$ là hệ số hình dáng của dòng điện

$$\Rightarrow \alpha = \frac{B.S.W.I}{D.k_d}$$

Như vậy khi khắc độ để lấy giá trị hiệu dụng thì thang đo phải chia cho hệ số k_d . Nếu dòng điện có dạng sin thì $k_d = 1,11$

- **Một số sơ đồ Ampemét từ điện chỉnh lưu (H.8.8a,b)**



Hình 8.8. Bù tần số ở ampemét chỉnh lưu:

a) Bù bằng cuộn cảm trong ampemét chỉnh lưu đo dòng nhỏ.

b) Bù bằng điện dung trong ampemét chỉnh lưu đo dòng lớn.

- Đo dòng nhỏ (bằng hoặc nhỏ hơn dòng qua cơ cấu chỉ thị một ít): mắc

mạch chỉnh lưu nối tiếp với cơ cấu chỉ thị và mắc trực tiếp vào mạch đo, không cần sun.

- *Đo dòng lớn hơn dòng qua cơ cấu chỉ thị:* mắc cơ cấu song song với sun (H.8.8). Ở đây sun làm nhiệm vụ mở rộng giới hạn đo dòng, đồng thời vừa để bù sai số do nhiệt độ và tần số.

Trong sơ đồ hình 8.8a: R_{CU} để bù nhiệt độ, còn L để bù tần số.

Trong sơ đồ hình 8.8b: dùng C để bù sai số do tần số.

Ngày nay thường chế tạo các dụng cụ chỉnh lưu tổng hợp: vừa đo dòng, áp một chiều, xoay chiều và điện trở nhờ bộ đổi nối. Các dụng cụ này có nhiều thang đo về dòng, áp, điện trở nhờ có sử dụng các sun; điện trở phụ nhiều giá trị khác nhau.

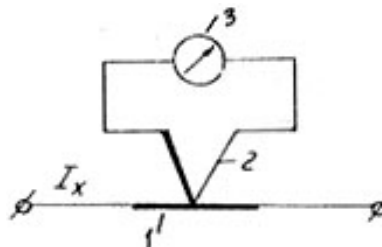
Ví dụ thang đo về dòng điện từ 3mA đến 6A; về điện áp từ 75mV đến 600V (thang 75mV chỉ đo áp một chiều); về điện trở từ 500Ω đến 5MΩ...

Thang đo của dụng cụ chỉnh lưu với điện xoay chiều và điện một chiều khác nhau. Do đặc tính V.A của ở dòng điện xoay chiều nhỏ là phi tuyến nên phần đầu thang đo (10 ÷ 15%) không đều.

- *Ưu điểm cơ bản của dụng cụ chỉnh lưu bằng điốt:* là độ nhạy cao, tiêu thụ công suất nhỏ, có thể làm việc ở tần số cao (không có mạch bù tần số có thể dùng ở tần số 500 đến 2000Hz); có mạch bù tần số có thể dùng đến 50kHz vẫn đảm bảo chính xác.

- *Nhược điểm:* là chính xác không cao (khoảng cấp 1,5 ÷ 2,5), các ampemét chỉnh lưu thường khắc độ theo tín hiệu sin. Nếu dùng các ampemét này đo dòng điện không sin thì sẽ xuất hiện sai số hình dáng.

d) Ampemét nhiệt điện: cũng là ampemét chỉnh lưu vì nhờ cặp nhiệt ngẫu đã biến dòng điện xoay chiều thành một chiều cấu tạo như hình 8.9:



Hình 8.9. Ampemét nhiệt điện.

- *Nguyên lý làm việc của Ampemét nhiệt điện:* khi có dòng điện xoay chiều I_x chạy qua sợi dây dẫn làm dây này bị đốt nóng. Nhiệt độ của dây dẫn là:

$$T^0 = k_0 I_x^2$$

với k_0 là hằng số, phụ thuộc nhiệt dung dây dẫn.

Nhiệt độ này làm nóng đầu công tác của cặp nhiệt ngẫu, ở đầu tự do của nó sẽ xuất hiện sức điện động nhiệt:

$$E_t = k_1 \cdot T^0 = k_1 k_0 I_x^2 = k_2 I_x^2$$

(k_1 cũng là hằng số phụ thuộc vật liệu và một số tính năng của cặp nhiệt ngẫu).

Hai đầu tự do của cặp nhiệt ngẫu được nối với cơ cấu chỉ thị từ điện nên suất điện động E_t được đặt lên cơ cấu này sinh ra dòng điện qua cơ cấu làm kim chỉ lệch một góc α :

$$\alpha = \frac{B.S.W}{D} . I_0 = \frac{B.S.W}{D} . \frac{E_t}{r_{ct} + R_n}$$

với: I_0 : dòng điện qua cơ cấu chỉ thị

R_n : điện trở cặp nhiệt ngẫu

r_{ct} : điện trở của cơ cấu chỉ thị.

Từ đó có quan hệ giữa góc quay (độ chỉ của chỉ thị) và dòng điện cần đo:

$$\alpha = \frac{B.S.W}{D} . \frac{k_2 . I_X^2}{r_{ct} + R_n} = K . I_X^2$$

Để tăng sức điện động nhiệt E_t nhằm dễ dàng nhận biết kết quả đo bằng chỉ thị từ điện, người ta thường mắc nối tiếp các cặp nhiệt ngẫu với nhau hoặc thông qua một bộ khuếch đại một chiều.

- *Ưu điểm của ampemét nhiệt điện*: là cho phép đo dòng điện ở tần số cao; dải tần làm việc rộng (từ một chiều đến hàng trăm MHz).

- *Nhược điểm của ampemét nhiệt điện*: có sai số lớn, khả năng qua tải kém, công suất tổn hao lớn.

8.3. Đo dòng điện nhỏ.

Đo dòng điện nhỏ tức là dòng $I_X \ll I_{ct}$ (dòng qua cơ cấu chỉ thị); thường I_X cỡ $10^{-5} \text{ A} \div 10^{-10} \text{ A}$. Để đo được dòng này cần phải có các thiết bị có độ nhạy cao. Hiện nay việc nâng cao độ nhạy, hạ thấp ngưỡng nhạy và khuếch đại ổn định, chính xác cao cũng còn gặp nhiều khó khăn.

Thường gặp các dụng cụ đo dòng điện nhỏ như:

- Điện kế cơ điện
- Điện lượng kế
- Các dụng cụ điện tử mà thành phần cơ bản là các bộ khuếch đại một chiều, xoay chiều, chỉnh lưu... kết hợp với chỉ thị cơ điện (từ điện).

8.3.1. Điện kế từ điện có khung quay:

Dùng để đo dòng điện rất nhỏ; có độ nhạy cao.

Dựa vào cơ cấu và phương trình đặc trưng của cơ cấu chỉ thị từ điện:

$$\alpha = \frac{B.S.W}{D} . I$$

có thể nâng độ nhạy bằng các biện pháp sau:

- *Tăng từ cảm B*: bằng cách dùng nam châm có kích thước lớn làm bằng vật liệu có từ dư và năng lượng từ lớn (B đạt đến 0,4 Tesla).
- *Giảm hệ số xoắn của lò xo (giảm D)*: bằng cách dùng dây treo mảnh, kích thước dài.

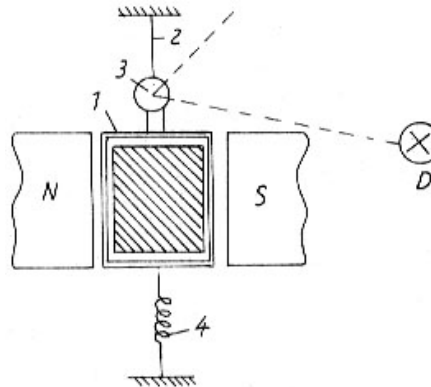
Tuy nhiên khi D giảm thì tần số dao động của khung dây sẽ giảm; thời gian đo sẽ bị kéo dài, khó thực hiện phép đo. Trong trường hợp này cần phải quan tâm đến đặc tính động của phần động cơ cấu. Đặc tính này được xác định bởi tương quan giữa hằng số dụng cụ (nghịch đảo của độ nhạy) với điện trở điện ngoài.

Thường chọn độ nhạy đảm bảo sao cho điện trở mạch ngoài ở giá trị tới hạn thì thời gian dao động sẽ ngắn nhất.

- *Dùng hệ thống quang học*: để tăng khoảng cách từ bộ phận động đến thang chia độ để tăng độ nhạy của dụng cụ đo.

Bằng cách sử dụng các biện pháp trên đây mới đạt được độ nhạy của điện kế cỡ $10^{-12} \div 10^{-14} \text{ A/m}$.

Ví dụ về điện kế từ điện có khung quay (H.8.10):



Hình 8.10. Điện kế từ điện có khung quay dùng hệ thống quang học:

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. Khung dây; | 2. Dây treo |
| 3. Gương phản chiếu; | 4. Dây không mômen |

Dòng điện cần đo được dẫn vào khung dây (1) trực tiếp nhờ dây treo (2) và dây không mômen (4).

Dùng dây treo (2) và gương (3) cùng hệ thống quang học (gương, đèn chiếu sáng) để tăng độ nhạy. Hệ thống đèn chiếu sáng phát ra chùm tia sáng chiếu lên gương (3) và phản chiếu lên thang chia độ để lấy số đo - đây là nguyên lý của điện kế gương.

Hằng số của điện kế gương với cấu trúc loại này phụ thuộc vào khoảng cách giữa gương và thang chia độ. Thường tính khoảng cách từ gương đến thang chia độ là 1m.

8.3.2. Tăng độ nhạy bằng khuếch đại điện tử:

Trường hợp này chủ yếu dùng các mạch khuếch đại bán dẫn, vi điện tử...

Trong đo lường các mạch khuếch đại được dùng với các mục đích :

- Tăng độ nhạy về dòng, áp, tức là giảm điện trở vào trường hợp đo dòng và tăng điện trở vào trường hợp đo áp.
- Nâng cao đặc tính tần của các thiết bị đo.

Đầu ra của các dụng cụ có khuếch đại điện tử được nối với các cơ cấu từ điện (ở dạng microAmpemét $50 \div 100 \mu\text{A}$). Vì vậy vấn đề chủ yếu ở đây không phải là hệ số khuếch đại mà là biện pháp giảm ngưỡng nhạy tức là phải sử dụng các mạch có các đặc tính: ít nhiễu, ít trôi điểm không, có quan hệ vào ra tuyến tính...

Nhược điểm của khuếch đại bán dẫn là nhiều đầu vào lớn, không hạ thấp được ngưỡng nhạy của dòng hoặc áp vào.

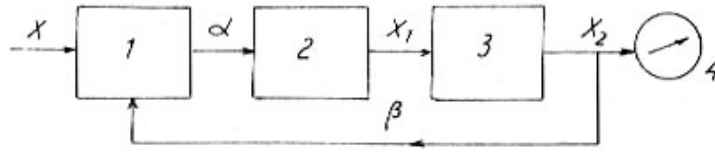
Thường dùng các bộ khuếch đại vi sai bằng vi điện tử vì công nghệ vi điện tử bảo đảm hai bán dẫn đồng nhất. Ngoài ra còn dùng khuếch đại một chiều có điều chế (với nhiều đầu vào cỡ 5-10 microvôn hoặc nanoampe) cũng có thể điều chế bằng bán dẫn trường để tăng điện trở đầu vào.

8.3.3. Khuếch đại điện kế:

Khuếch đại điện tử và vi điện tử có ngưỡng nhạy cao và ổn định thấp, vì vậy để

giảm ngưỡng nhảy và tăng độ ổn định người ta dùng khuếch đại điện kế kiểu bù. Đây là thiết bị kết hợp giữa khuếch đại điện tử và điện kế cơ điện.

Sơ đồ khối của khuếch đại điện kế kiểu bù như hình 8.11:



Hình 8.11. Sơ đồ khối của khuếch đại điện kế kiểu bù:

1. Cơ cấu sơ cấp (điện kế)
2. Chuyển đổi đo lường
3. Khuếch đại điện tử
4. Cơ cấu thứ cấp (thường là cơ cấu chỉ thị từ điện dưới dạng microAmpemét)

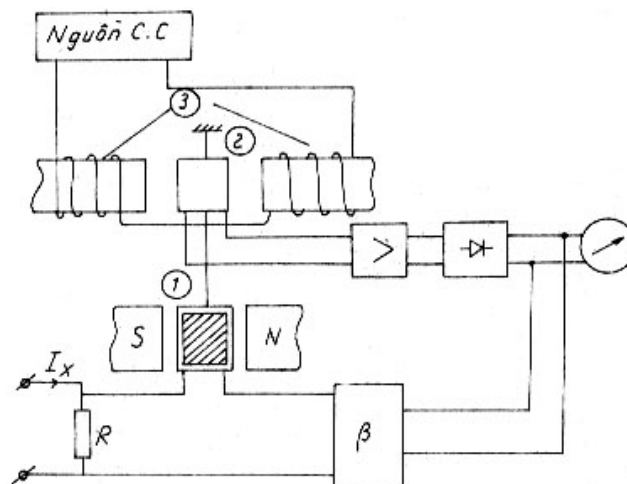
a) Nguyên lý làm việc: đại lượng điện cần đo (X) được đưa vào khuếch đại điện kế; đầu tiên qua cơ cấu sơ cấp, cơ cấu này thường là một điện kế có độ nhạy cao, biến đổi đại lượng điện (X) thành di chuyển góc (α); qua bộ biến đổi đo lường, chuyển α thành đại lượng điện (X_1) đưa vào khuếch đại điện tử rồi đến bộ phận chỉ thị kết quả đo (4).

Để nâng cao ổn định của hệ thống đo, người ta dùng phản hồi (β) từ đầu ra về cơ cấu sơ cấp.

Trong khuếch đại điện kế, bộ chuyển đổi đo lường đóng vai trò khá quan trọng. Vì vậy theo các loại chuyển đổi ta chia khuếch đại điện kế thành: khuếch đại điện kế cảm ứng, khuếch đại điện kế quang nhiệt, khuếch đại điện kế nhiệt điện, khuếch đại điện kế tĩnh điện...

Sau đây xét một số ví dụ về cấu tạo, nguyên lý của khuếch đại điện kế:

b) Khuếch đại điện kế cảm ứng (H.8.12):



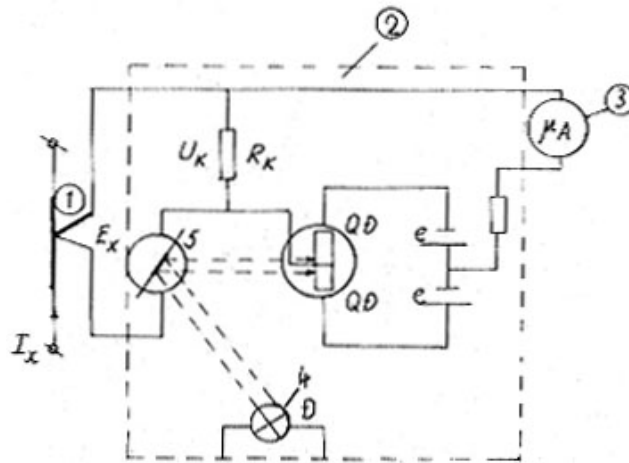
Hình 8.12. Khuếch đại điện kế cảm ứng:

1. Điện kế từ điện
2. Cuộn dây cảm ứng
3. Chuyển đổi cảm ứng

Dòng điện I_X cần đo được đưa vào điện kế từ điện làm cho khung quay của điện kế lệch so với vị trí ban đầu một góc α ; cuộn dây cảm ứng (2) của chuyển đổi cảm

ứng (3) được nối với khung quay điện kế nên cũng lệch một góc α . Đồng thời cuộn dây cảm ứng khi dịch chuyển sẽ cắt đường sức của chuyển đổi cảm ứng làm sinh ra sức điện động cảm ứng trong cuộn dây (2). Sức điện động cảm ứng này được chuyển đến khuếch đại điện tử, chỉnh lưu và đến cơ cấu chỉ thị. Một phần áp ở đầu ra chỉnh lưu được đưa về bù lại ở đầu vào để tăng độ ổn định ở hệ thống đo.

c) *Micrô Ampemét nhiệt điện dùng khuếch đại điện kế quang điện (H.8.13):*



Hình 8.13. Khuếch đại điện kế quang điện

Cấu tạo của thiết bị gồm 3 bộ phận chính:

- Cặp nhiệt ngẫu (chuyển đổi nhiệt điện loại tiếp xúc).
- Khuếch đại điện kế quang điện, bao gồm: điện kế gương (5) được chiếu sáng nhờ đèn sợi đốt (4) và tia sáng từ gương lại phản chiếu lên hai quang điện trở mắc mạch với hai nguồn sức điện động tạo áp bù U_K .
- MicrôAmpemét từ điện: làm nhiệm vụ chỉ thị kết quả đo.

MicrôAmpemét nhiệt điện hoạt động như sau: dòng điện cần đo I_X qua dây đốt của cặp nhiệt ngẫu làm xuất hiện sức điện động nhiệt E_X ở đầu tự do của cặp nhiệt. E_X được so sánh với U_K .

Nếu $E_X \neq U_K$ thì trong mạch điện kế gương có dòng điện chạy qua, sẽ làm lệch tia sáng từ đèn đến gương và đến hai quang điện trở (QĐ). Cầu tạo bởi hai quang điện trở QĐ và hai nguồn sức điện động e mất cân bằng, làm thay đổi dòng qua R_K và qua μA .

Khi $E_X = U_K$ khung quay (gương) của điện kế sẽ đứng yên. Giá trị R_K không đổi; dòng qua nó tỉ lệ với E_X tức là tỉ lệ với dòng I_X . Vì vậy người ta khắc độ micrôAmpemét theo giá trị của dòng cần đo I_X .

Nhờ sử dụng điện kế có độ nhạy cao và sơ đồ có mạch bù nên micrôAmpemét này có độ nhạy khá cao. Đồng thời độ chỉ của micrôAmpemét không phụ thuộc vào tính chất của đèn chiếu sáng, sự dao động của nguồn cung cấp và các thông số của tế bào quang điện.

8.4. Đo dòng điện lớn.

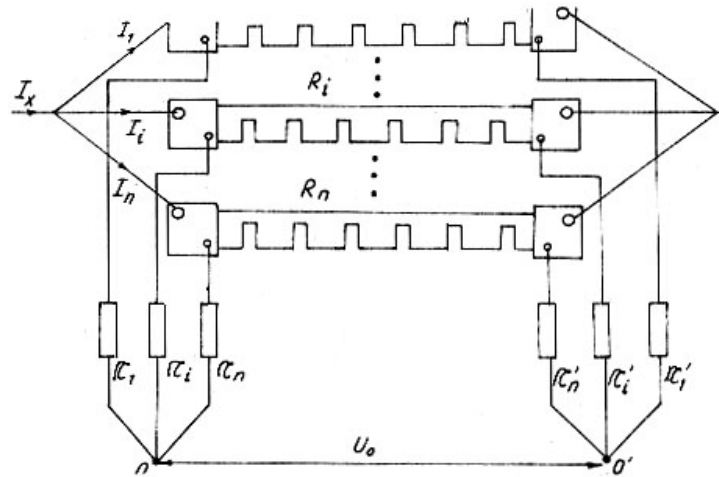
8.4.1. Đo dòng một chiều lớn:

Ta có thể dùng các phương pháp và thiết bị đo như sau:

a) *Ghép song song các sun:* dòng điện cần đo là:

$$I_X = I_1 + I_2 + \dots + I_i + \dots + I_n$$

với: $I_1; I_2; \dots$ dòng điện định mức ghi trên sun
 $R_1; R_2; \dots$ điện trở sun tương ứng
 $r_1; r_2; \dots; r'_1; r'_2; \dots$ các điện trở được mắc tương ứng với $R_1; R_2; \dots$
 trong mạch áp theo quan hệ: $\frac{r_1}{R_1} = \frac{r_2}{R_2} = \dots = \frac{r_i}{R_i}$ sao cho dòng qua các $r_1; r'_1$ rất nhỏ so với dòng qua sun.



Hình 8.14. Đo dòng điện một chiều lớn bằng cách ghép song song các sun

Tiến hành đo U_0 là điện áp rơi trên các sun, bằng phương pháp gián tiếp ta sẽ đo được dòng điện cần đo:

$$I_X = U_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

phương pháp này đơn giản nhưng không an toàn cho người sử dụng.

b) Đo từ trường sinh ra xung quanh dây dẫn: quan hệ giữa từ cảm B và dòng điện qua dây dẫn là:

$$B = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot W \cdot I_X$$

với: I_X : dòng điện chạy trong cuộn dây tạo ra lực từ F

B : từ cảm

W : số lượng vòng dây quấn trên mạch từ.

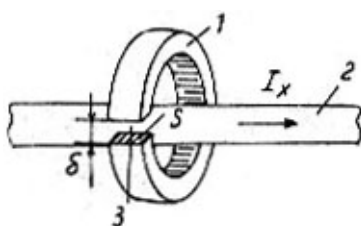
δ : khoảng cách giữa hai cực của mạch từ hở (khe hở không khí)

S : Tiết diện của cực từ

μ_0 : Hệ số thẩm từ của không khí.

như vậy có thể đo từ cảm B rồi suy ra dòng điện I_X .

Muốn đo dòng I_X phải tạo mạch từ trở hình xuyên và lồng dây dẫn qua mạch từ này (H. 8.15):



Hình 8.15. Nguyên lý cấu tạo dụng cụ đo dòng điện bằng cách đo từ trường xung quanh dây dẫn:

1. Mạch từ hình xuyên

2. Dây dẫn có dòng cần đo I_X chạy qua

3. Khe hở không khí

Mạch từ hình xuyên được tạo bởi vật liệu từ mềm (có μ lớn) để cho từ trở của mạch từ (r_m) nhỏ hơn nhiều so với từ trở R_m của khe hở không khí, có thể bỏ qua r_m .

Khi dòng I_X chạy trong dây dẫn thì trong khe hở không khí (như chứng minh trên) sẽ có từ cảm B , với mạch từ nhất định thì:

$$W = \text{const}; \quad \mu_0 = \text{const}; \quad \delta = \text{const}$$

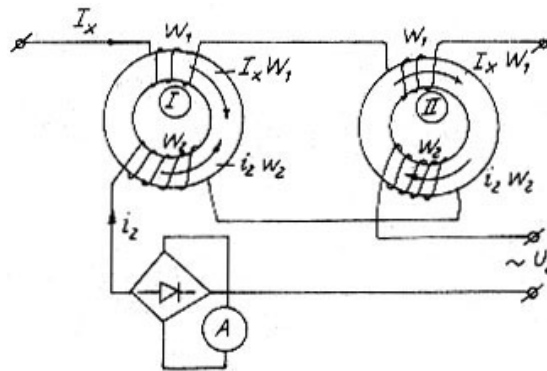
$$B = k \cdot I_X \quad \text{với} \quad k = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot W = \text{const}$$

như vậy bằng cách đo từ cảm B có thể suy ra dòng điện cần đo I_X .

Thường từ cảm B được đo bằng các thiết bị đo từ hoặc bằng chuyển đổi Hall.

Sai số chủ yếu của phương pháp này phụ thuộc vào tính chất phi tuyến của lõi sắt từ. Nếu đo từ cảm B bằng phương pháp cộng hưởng từ hạt nhân thì chính xác sẽ rất cao (0,01%).

c) Đo dòng điện một chiều lớn bằng biến dòng một chiều: biến dòng một chiều dựa trên cơ sở bộ điều chế từ, tức là dựa trên sự ảnh hưởng của từ trường một chiều lên lõi sắt từ được kích thích bởi dòng xoay chiều.



Hình 8.16. Sơ đồ nguyên lý của biến dòng một chiều

- **Cấu tạo:** biến dòng một chiều (H.8.16) gồm hai lõi hình xuyên I, II làm bằng vật liệu sắt từ (pecmaloi) có hệ số thẩm từ μ lớn. Trên đó quấn hai cuộn dây W_1 và W_2 . Cuộn W_2 quấn trên lõi sắt II ngược chiều với W_1 quấn trên lõi xuyên I. W_1 mắc vào mạch một chiều có dòng cần đo I_X chạy qua; W_2 mắc vào mạch xoay chiều U_2 .

- **Nguyên lý làm việc:** dòng một chiều cần đo I_X chạy trong W_1 tạo ra sức từ động $I_X W_1$ trong cả hai lõi (I) và (II) (theo chiều như hình vẽ). Dòng i_2 chạy trong W_2 tạo ra trong hai xuyên (I) và (II) sức từ động $i_2 W_2$ (theo chiều như hình vẽ ở nửa chu kỳ đầu).

Cường độ từ trường trong hai lõi xuyên (I) và (II) được xác định theo định luật dòng toàn phần :

$$H_1 = \frac{F_1}{l} \quad ; \quad H_2 = \frac{F_2}{l}$$

với: $F_1; F_2$: sức từ động tổng trong từng lõi xuyên (I) và (II)

l : chiều dài trung bình của lõi xuyên.

Trong lõi xuyên (I), chiều của F_1 và F_2 ngược nhau nên ta có:

$$H_1 = \frac{I_X W_1 - i_2 W_2}{l}$$

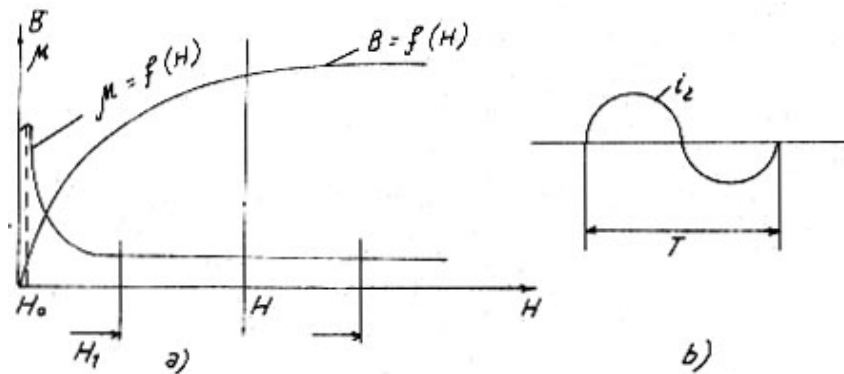
Trong lõi xuyên (II), chiều của F_1 và F_2 trùng nhau nên ta có:

$$H_2 = \frac{I_X W_1 + i_2 W_2}{l}$$

Giả sử i_2 biến thiên theo dạng sin nên khi $i_2 = 0$ thì trong lõi xuyên chỉ còn I_X tác dụng, tức là :

$$H = H_1 = H_2 = \frac{I_X W_1}{l}$$

Dựa vào mối quan hệ giữa cường độ từ trường H và từ cảm B ; giữa H và độ thẩm từ μ (H.8.17) để xét sự tác dụng của i_2 trong lõi xuyên và ảnh hưởng đến I_X ; tìm mối liên hệ giữa I_X và i_2 :



Hình 8.17. Quan hệ giữa cường độ từ trường H và từ cảm B ; giữa H và độ thẩm từ μ .

Xét trong nửa chu kỳ dương, dòng i_2 tăng; cường độ từ trường H_2 sẽ tăng còn H_1 sẽ giảm. Do mối quan hệ giữa H và μ (H.8.17a) nên khi H_2 tăng đến một phạm vi nào đó độ thẩm từ μ sẽ bằng hằng số (trong lõi (II)). Trong khi đó H_1 trong lõi xuyên (I) sẽ giảm đến một giá trị H_0 (gần đúng $H_0 \approx 0$; tức là $I_X \cdot W_1 \approx i_2 \cdot W_2$), ở phạm vi này, độ thẩm từ μ tăng rất nhanh, làm cho điện cảm L_2 của cuộn dây W_2 (trong xuyên (I)) cũng tăng nhanh:

$$L_2 = \frac{W_2^2}{R_m} = \frac{\mu_0 \cdot S \cdot W_2^2}{l}$$

điện cảm L_2 thay đổi làm xuất hiện sức điện động cảm ứng E_C trong cuộn dây:

$$E_C = -i_2 \cdot \frac{dL_2}{dt}$$

E_C có hướng ngược với U_2 làm cho i_2 không tăng được nữa mà phải có giá trị thỏa mãn điều kiện:

$$I_X \cdot W_1 \approx i_2 W_2 \Rightarrow i_2 = \frac{W_1}{W_2} \cdot I_X$$

Như vậy nếu dùng ampemét đo dòng xoay chiều i_2 sẽ suy ra được dòng một chiều cần đo I_X . Và giống như biến dòng xoay chiều: tỉ số W_1/W_2 là hệ số biến dòng một chiều.

- **Ưu điểm của phương pháp dùng biến dòng một chiều:** bảo đảm an toàn cho người sử dụng; thay đổi thang đo dễ dàng bằng cách thay đổi số lượng vòng dây.

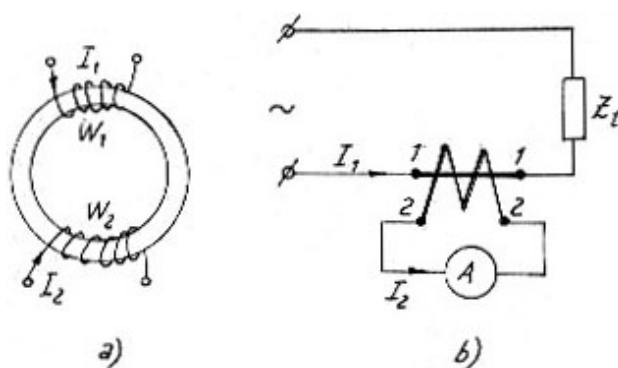
Ngày nay đã chế tạo được biến dòng một chiều với định mức từ 15÷17 kA; cấp chính xác đến 0,5.

8.4.2. Đo dòng xoay chiều lớn:

Để đo dòng điện xoay chiều lớn thì phương pháp thông dụng nhất là sử dụng các ampemét kết hợp biến dòng xoay chiều.

Trong các ampemét điện từ, sức từ động tối đa $F = I.W$ là 200(ampe.vòng), như vậy nếu số dây là một thì có thể đo được dòng tối đa là 200A. Muốn đo dòng lớn hơn 200A phải dùng các ampemét điện từ, điện động kết hợp với biến dòng.

Biến dòng cũng giống như biến áp đo lường: lõi thường là hình xuyên bằng thép kĩ thuật điện, trên có quấn hai cuộn dây: sơ cấp W_1 và thứ cấp W_2 (H.8.18a):



Hình 8.18. a) Nguyên lý cấu tạo của biến dòng
b) Cách mắc ampemét kết hợp với biến dòng.

thường dòng sơ cấp I_1 lớn nên số lượng vòng dây W_1 ít hơn số lượng vòng dây W_2 .

Biến dòng làm việc ở chế độ biến áp ngắn mạch vì điện trở trong R_A của ampemét thường nhỏ, ta có:

$$I_1.W_1 = I_2.W_2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1} = k_I$$

với k_I gọi là hệ số biến dòng. Thường biến dòng được chế tạo sẵn có dòng thứ cấp I_2 định mức và hệ số biến dòng k_I thay đổi phụ thuộc vào dòng sơ cấp I_1 với các thang biến dòng nhất định.

Ví dụ : biến dòng YTT-S của Liên Xô (cũ) có : $I_2 = 5A$ còn $I_1 = 15A ; 30A ; 100A ; 200A ; 400A ; 500A ; 600A$.

Ứng với mỗi dòng I_1 sẽ có k_I nhất định. Để đo dòng điện xoay chiều lớn, phải kết hợp biến dòng và ampemét xoay chiều có thang đo phù hợp với dòng thứ cấp I_2 của biến dòng.

Ví dụ : $I_{2\text{đm}} = 5A$ thì phải chọn ampemét có thang đo $I_{\text{đm}} = 5A$.

Mắc biến dòng và Ampemét vào mạch đo như hình 8.18b.

Đọc kết quả phép đo trên ampemét (I_2) kết hợp với hệ số biến dòng ta sẽ được dòng cần đo:

$$I_1 = k_I.I_2$$

Sai số của phép đo phụ thuộc sai số của cả biến dòng và sai số của ampemét.