

ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN – ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP HCM

Chương IX:

CẢM ỨNG ĐIỆN TỪ

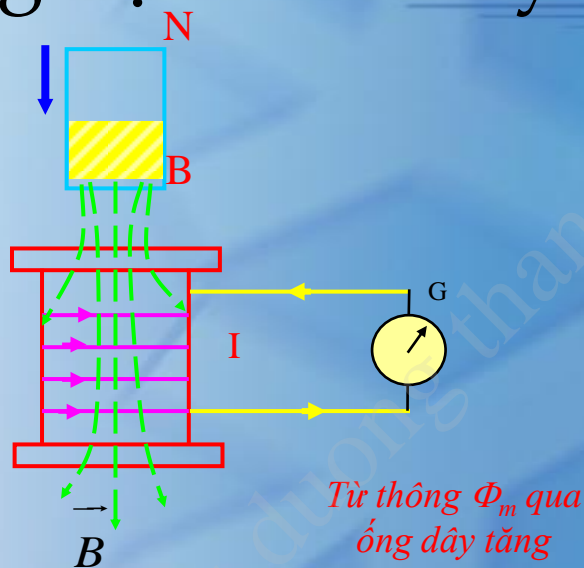


Nội dung:

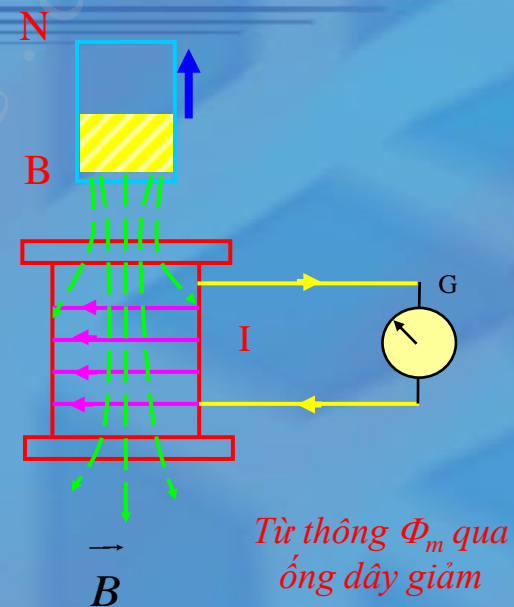
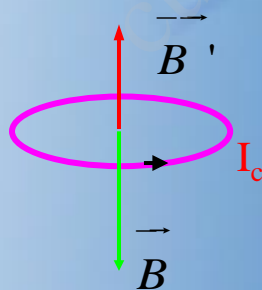
- ❄ 9.1 Các định luật
- ❄ 9.2 Hiện tượng tự cảm
- ❄ 9.3 Hiện tượng hồ cảm
- ❄ 9.4 Ứng dụng của hiện tượng cảm ứng điện từ
- ❄ 9.5 Năng lượng từ trường
- ❄ 9.6 Định luật Kirchhoff trong mạch có cuộn cảm
- ❄ 9.7 Mạch RLC nối tiếp

9.1 Các định luật

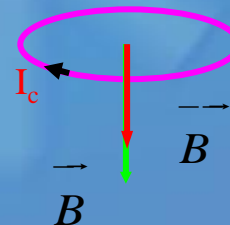
1. Thí nghiệm Faraday



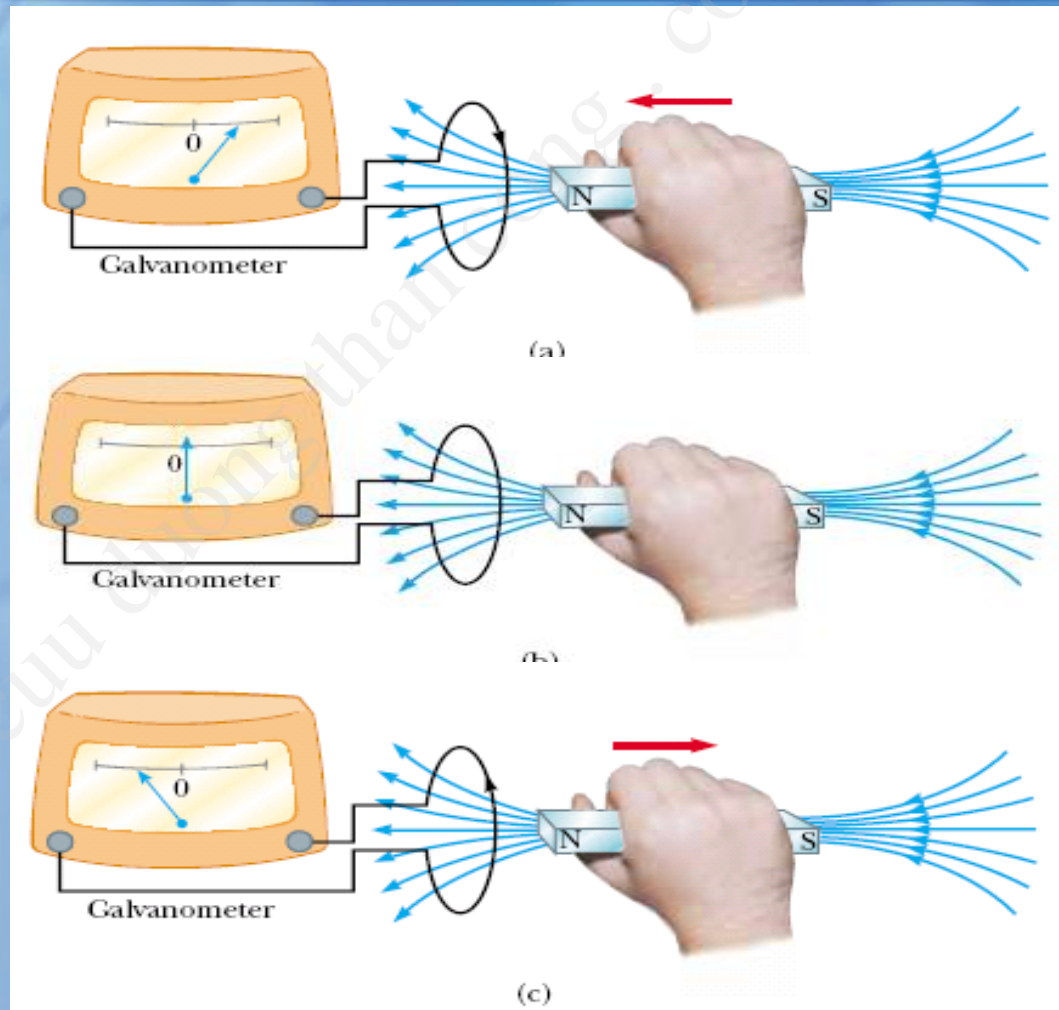
(a)



(b)



Thí nghiệm Faraday (tt)





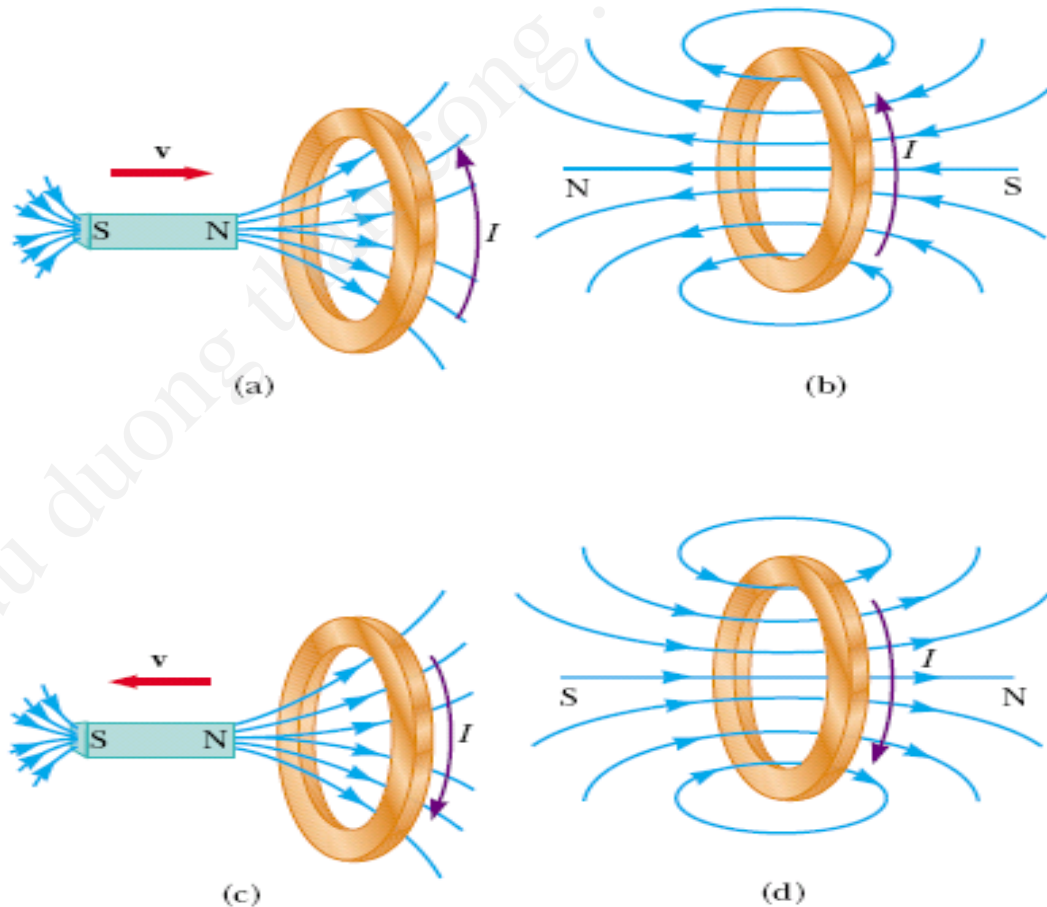
9.1 Các định luật (tt)

Từ những kết quả thí nghiệm trên, Faraday rút ra những kết luận sau:

- a) Sự biến đổi của từ thông qua một mạch kín là nguyên nhân tạo ra dòng điện cảm ứng trong mạch đó.
- b) Dòng điện cảm ứng ấy chỉ tồn tại trong khoảng thời gian có biến đổi của từ thông qua mạch.
- c) Cường độ dòng điện cảm ứng tỉ lệ thuận với tốc độ biến đổi của từ thông.
- d) Chiều của dòng điện cảm ứng phụ thuộc vào sự tăng hay giảm của từ thông gửi qua mạch.
 - . Dây dẫn xuất hiện dòng điện
 - ⇒ Có lực tác dụng lên e
 - ⇒ Xuất hiện điện trường cảm ứng trong dây dẫn
 - . Điện trường cảm ứng sinh ra do sự thay đổi của từ trường cho dù có dây dẫn hay không.

2. Định luật Lenz:

Dòng điện cảm ứng phải có chiều sao cho từ trường do nó sinh ra có tác dụng chống lại nguyên nhân đã sinh ra nó.



3. Định luật cơ bản của hiện tượng cảm ứng điện từ

Công của lực từ tác dụng lên dòng điện cảm ứng:

$$dA = I_c d\phi_m$$

Công để dịch chuyển (C):

$$dA' = -dA = -I_c d\phi_m$$

Điện năng của dòng điện cảm ứng:

$$\varepsilon_c I_c dt = -I_c d\phi_m$$

Sức điện động cảm ứng là:

$$\varepsilon_c = - \frac{d\phi_m}{dt}$$

Vậy, sức điện động cảm ứng bằng về trị số nhưng trái dấu với tốc độ biến thiên của từ thông qua mạch.

Lực Lorentz tác dụng lên mỗi electron:

$$\vec{F}_L = -e(\vec{v} \times \vec{B})$$

Lực điện trường hình thành trong thanh kim loại hướng từ A đến B:

$$\vec{F}_E = -e\vec{E}$$

Khi cân bằng: $\vec{F}_E + \vec{F}_L = 0$

$$\Leftrightarrow -e(\vec{v} \times \vec{B}) - e\vec{E} = 0$$

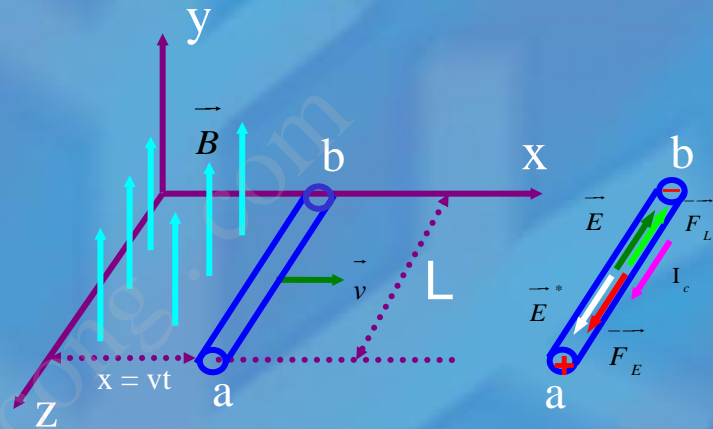
$$\Leftrightarrow \vec{E} = -(\vec{v} \times \vec{B})$$

Sức điện động cảm ứng: ε_c

$$\varepsilon_c = \oint_c \vec{E}^* \cdot d\vec{l}$$

Với điện trường lạ: $\vec{E}^* = -\frac{\vec{F}_L}{e} = (\vec{v} \times \vec{B})$

$$\varepsilon_c = \oint_c (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$



Sức điện động cảm ứng trong thanh kim loại khi nó dịch chuyển với vận tốc v không đổi trong từ trường đều B

Chọn $d\vec{l}$ cùng chiều với \vec{E}^* thì:

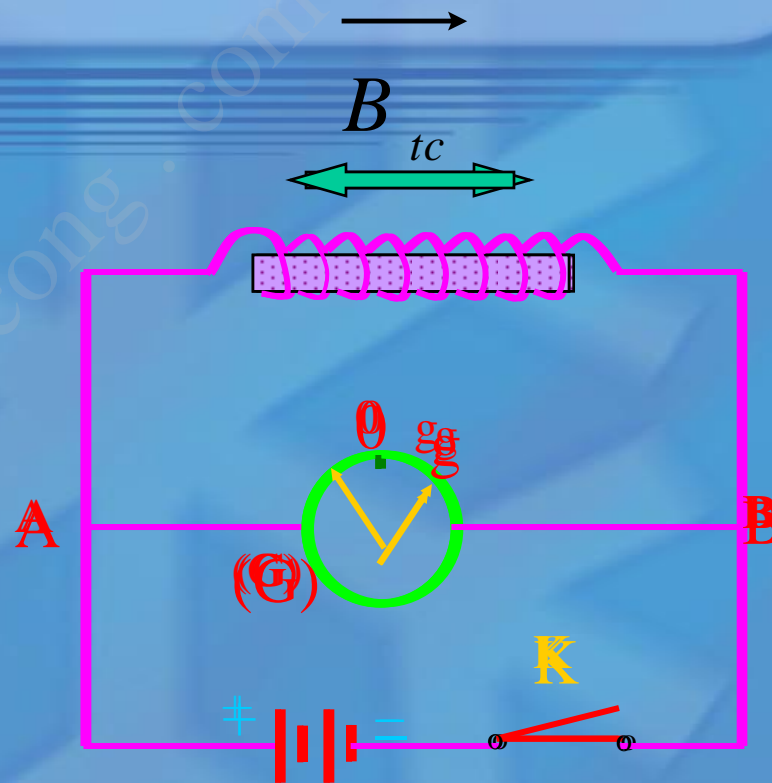
$$\varepsilon_c = \oint_c vBdl \Leftrightarrow \varepsilon_c = BLv$$

Do mạch hở nên:

$$\varepsilon_c = U_{AB} = BLv$$

Hiện tượng tự cảm

Dòng điện được sinh ra trong mạch, do sự cảm ứng của dòng điện trong chính mạch đó được gọi là dòng điện tự cảm và hiện tượng nói trên gọi là hiện tượng tự cảm



Sức điện động tự cảm

- Sức điện động tự cảm: $\varepsilon_{tc} = - \frac{d\phi_m}{dt}$
- Sức điện động này do sự biến thiên của dòng điện trong mạch gây ra:

$$\frac{d\phi_m}{dt} = \frac{d\phi_m}{dI} \frac{dI}{dt}$$

- Đặt $L = \frac{d\phi_m}{dI}$ là hệ số tự cảm của mạch điện

$$\varepsilon_{tc} = -L \frac{dI}{dt}$$

L được tính bằng Henry(H)

Hệ số tự cảm của ống dây thẳng rất dài

- Từ trường trong ống dây $B = \mu_0 nI$
- Từ thông gửi qua ống dây $\phi_m = NBS$

• Mà $n = \frac{N}{l}$



$$\phi_m = \mu_0 \frac{N^2}{l} IS$$

$$B = \mu_0 nI$$

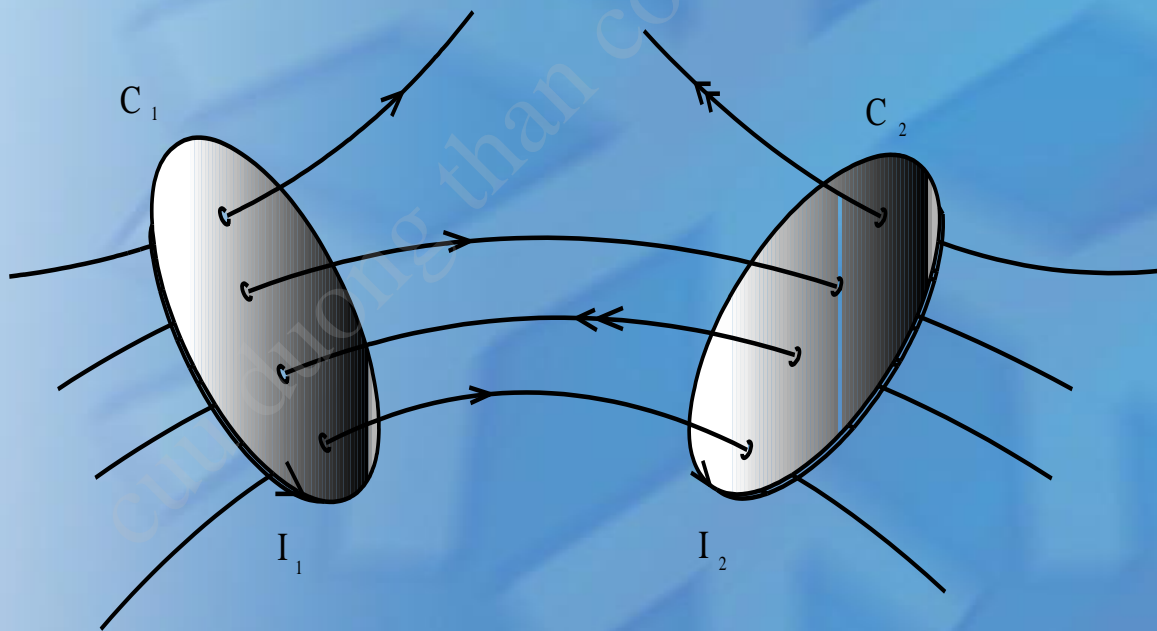
Ta có

$$L = \frac{d\phi_m}{dI}$$



$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l} S$$

HIỆN TƯỢNG HỒ CẢM



HIỆN TƯỢNG HỖ CẢM

Sức điện động hồ cảm $\mathcal{E}_{hc} = - \frac{d\phi_m}{dt}$

ϕ_{m12} là từ thông do I_1 qua diện tích của mạch (C_2)

ϕ_{m21} là từ thông do I_2 qua diện tích của mạch (C_1)

Ta nhận thấy:

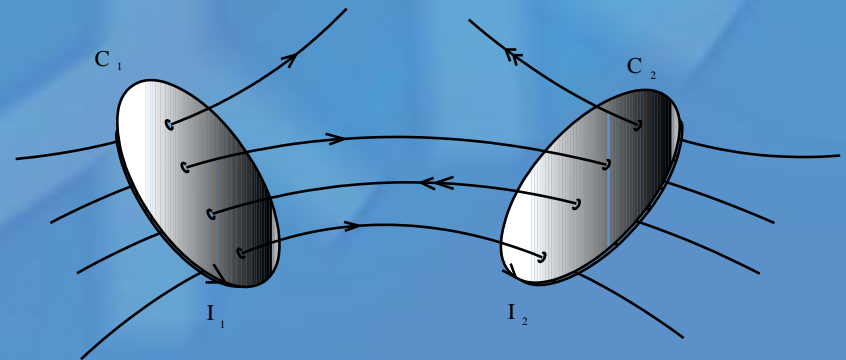
$$\phi_{m12} = M_{12} I_1$$

$$\phi_{m21} = M_{21} I_2$$

Người ta chứng minh được: $M_{12} = M_{21} = M$

$$\Rightarrow \mathcal{E}_{hc2} = - \frac{d\phi_{m12}}{dt} = - M \frac{dI_1}{dt}$$

$$\mathcal{E}_{hc1} = - \frac{d\phi_{m21}}{dt} = - M \frac{dI_2}{dt}$$



Ứng dụng

I) Máy phát điện

Tại thời điểm $t = 0$, $(\vec{n}, \vec{B}) = \varphi$

Vào thời điểm t , từ thông
gửi qua khung dây là:

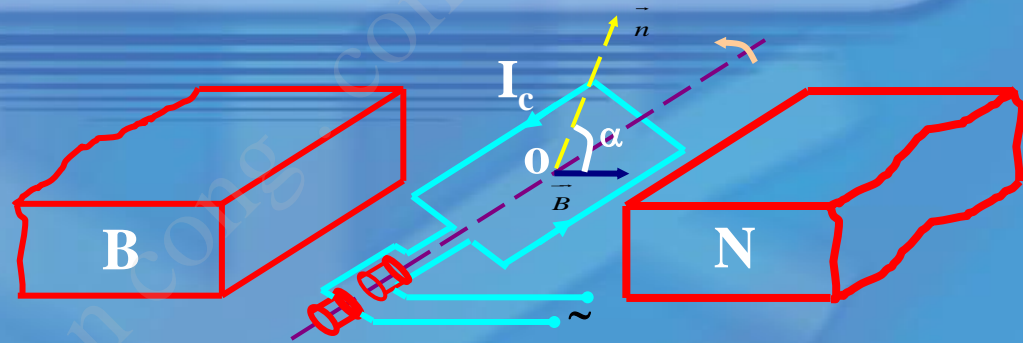
$$\phi_m = N \int_S \vec{B} d\vec{S} = NBS \cos(\omega t + \varphi)$$

Vì ϕ_m thay đổi theo t , trong khung xuất hiện dòng điện cảm ứng

$$\varepsilon_c = - \frac{d\phi_m}{dt} = N S \omega B \sin(\omega t + \varphi)$$

Dòng điện cảm ứng được tạo ra trong khung dây là dòng điện
xoay chiều chu kỳ

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$





Dòng Foucault

Khi đặt một khối vật dẫn trong từ trường biến thiên thì xuất hiện dòng điện cảm ứng khép kín gọi là dòng điện Foucault. Dòng điện Foucault có vai trò quan trọng trong kỹ thuật.

1) Tác hại

Lõi sắt trong máy biến thế, động cơ điện ..., chịu tác dụng của từ trường biến đổi, dòng Foucault xuất hiện. Năng lượng của dòng Foucault mất dưới dạng nhiệt năng làm giảm hiệu suất của máy

2) Lợi ích

Dùng nhiệt năng do dòng Foucault tạo ra nấu chảy kim loại bằng cách quấn dây điện và cho dòng điện cao tần chạy qua cuộn dây đó

Lực hãm từ và các ứng dụng

Khi thanh kim loại chuyển động với vận tốc \vec{v} vuông góc với từ trường đều \vec{B} thì trong thanh xuất hiện một sức điện động cảm ứng ε_c tỉ lệ với vận tốc v . Nếu hai đầu thanh được nối với một dây dẫn thì có dòng điện cảm ứng đi qua thanh và dây dẫn. Cường độ cảm ứng này cũng tỉ lệ với v . Gọi R là điện trở toàn mạch, ta có:

$$I_c = \frac{\varepsilon_c}{R} = \frac{v B L}{R}$$

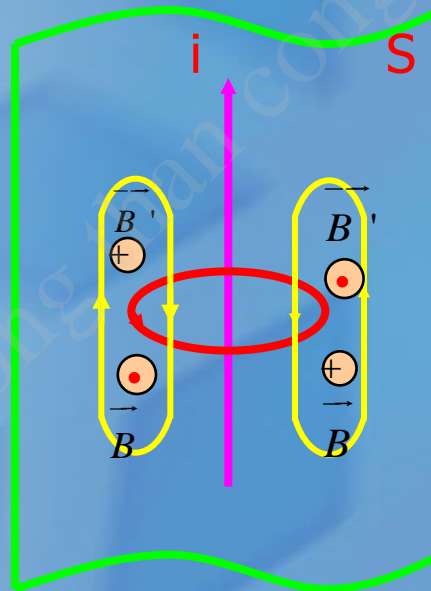
Thanh kim loại sẽ chịu tác dụng bởi một từ ngược chiều chuyển động của thanh và độ lớn cùng tỉ lệ với v : $F_c = I_c B L$

$$F_c = \frac{v B^2 L^2}{R}$$

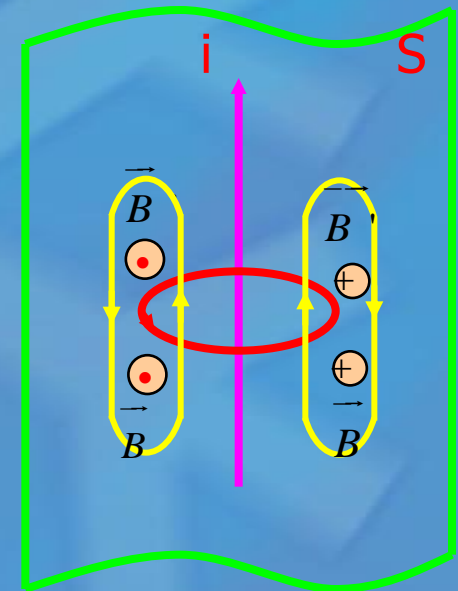
Lực có tính chất này tác dụng như lực cản của môi trường và chuyển động của thanh kim loại trong từ trường như chuyển động của trong môi trường nhớt.

Hiệu ứng da

Hiệu ứng da là hiện tượng mật độ dòng điện xoay chiều khác nhau dọc theo bán kính của dây: cực đại ở mặt ngoài và cực tiểu ở trục của dây. Hiện tượng này càng rõ khi đường kính dây và tần số dòng điện lớn. Khi tần số cao thì dòng điện chỉ chạy trên một lớp rất mỏng ở mặt ngoài dây



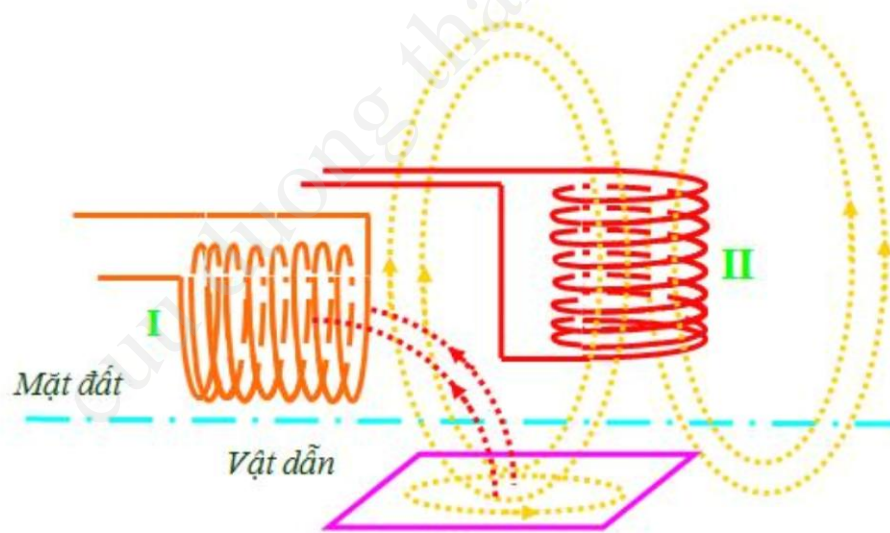
(a)



(b)

Máy dò vật dẫn nằm dưới đất

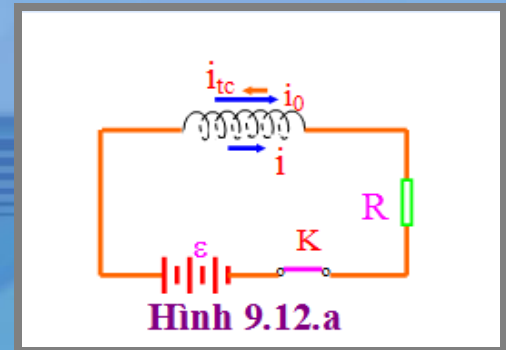
Máy được cấu tạo như hình vẽ, gồm 2 cuộn dây vuông góc nhau, cuộn 2 là cuộn phát, khi gập vật dẫn dưới đất, từ thông qua nó biến thiên, tạo nên dòng hồ cảm qua cuộn 1, xuất hiện dòng điện hồ cảm ở cuộn 1, báo cho biết có vật dẫn dưới đất



Hình 9.11: Máy dò vật dẫn dưới đất

NĂNG LƯỢNG TỪ TRƯỜNG

Toàn bộ điện năng biến thành nhiệt năng ←



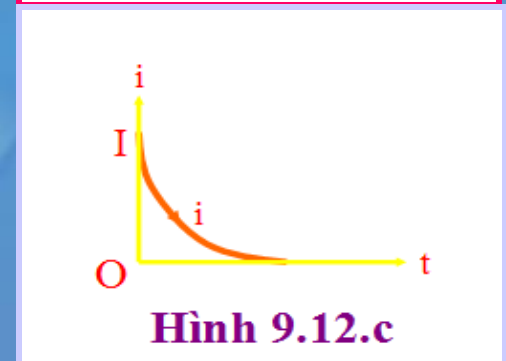
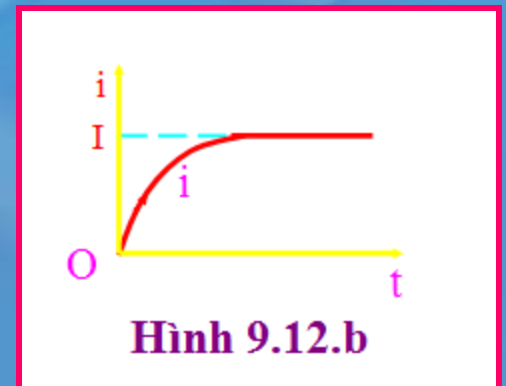
Điều này không còn đúng lúc ngắt mạch và đóng mạch

Khi đóng mạch, trong mạch xuất hiện dòng điện tự cảm i' , ngược chiều với dòng điện chính i . Nên dòng điện toàn phần sẽ nhỏ hơn i .

Chỉ có một phần điện năng biến thành nhiệt ←

Khi ngắt mạch, trong mạch xuất hiện dòng điện tự cảm i' , cùng chiều với dòng điện chính i . Nên dòng điện toàn phần sẽ lớn hơn i .

Nhiệt năng tỏa ra trong mạch lúc này lớn hơn năng lượng do nguồn điện sinh ra ←



Khi đóng mạch, một phần điện năng do nguồn điện sinh ra được tích trữ dưới dạng năng lượng của cuộn dây, để khi ngắt mạch phần năng lượng này tỏa ra dưới dạng nhiệt năng trong mạch

Theo định luật Ohm: $\mathcal{E} + \mathcal{E}_{tc} = Ri$

Mà $\mathcal{E}_{tc} = -L \frac{dI}{dt} \rightarrow \mathcal{E} = Ri + L \frac{di}{dt}$

Hay $\mathcal{E} i dt = Ri^2 dt + Lidi$

$\mathcal{E} i dt$: Điện năng do nguồn điện sinh ra

$Ri^2 dt$: Điện năng biến thành nhiệt năng

$Lidi$: Năng lượng tích trữ dưới dạng năng lượng từ trường

→ Năng lượng từ trường

$$W_m = L \int_0^I i di = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1)$$

2) Năng lượng của 1 từ trường bất kì:

Gọi l là chiều dài ống dây, thì thể tích của ống dây $v=Sl$ (2)

Từ (1) và (2) → Mật độ năng lượng từ trường của ống dây

$$w_m = \frac{W_m}{v} = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 N^2 I^2}{l^2} \quad \text{Mà} \quad B = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

$$\rightarrow w_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$$

Vậy năng lượng của một từ trường bất kì

$$W_m = \int_v w_m dv = \frac{1}{2 \mu_0} \int_v B^2 dv$$

ĐỊNH LUẬT KIRCHHOFF TRONG MẠCH CÓ CUỘN CẢM

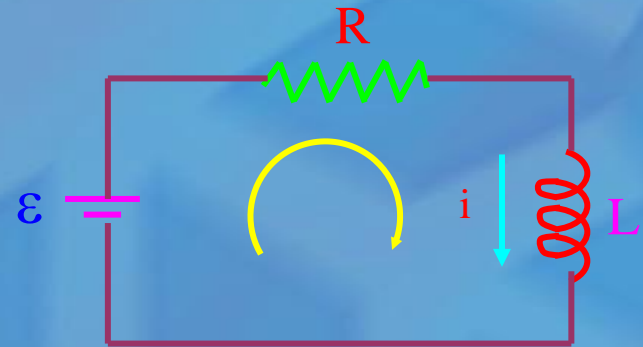
❄ Ta có phương trình: $\varepsilon = Ri + L \frac{di}{dt}$



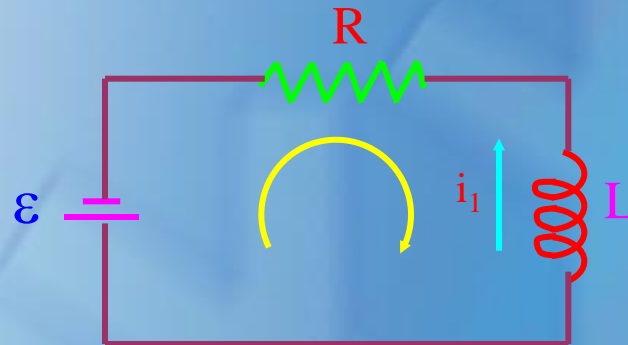
hay

$$Ri + L \frac{di}{dt} - \varepsilon = 0$$

Trong một vòng mạng có cuộn cảm L , ta có thể áp dụng định luật Kirchhoff bằng cách gán dấu + trước $L \frac{di}{dt}$ nếu chiều vòng mạng cùng chiều dòng điện.



Hình 9.13



Hình 9.14

Gán dấu – trước $L \frac{di}{dt}$ nếu chiều vòng mạng ngược chiều dòng điện



$$- R i_1 - L \frac{d i_1}{d t} - \varepsilon = 0 \quad \text{vì } (i = - i_1)$$

Mạch RLC

Cho đoạn mạch như hình vẽ, tụ điện C được tích điện dưới hiệu điện thế $U_{AB} = V_A - V_B$. Khi đóng khóa K , tụ phóng điện trong mạch gây ra dòng điện i . Năng lượng điện trường trong tụ sẽ mất dần dưới dạng nhiệt năng của R , gọi là trạng thái chuyển tiếp.

Chọn $t=0$ lúc khóa K đóng, chiều dòng điện như hình vẽ, q là điện tích của tụ C tại thời điểm t .

Trong khoảng thời gian dt , một điện tích $dq = -idt$ rời bản A của tụ.

Áp dụng định luật Kirchhoff :



Hình 9.15

$$R i + L \frac{d i}{d t} + (V_B - V_A) = 0$$

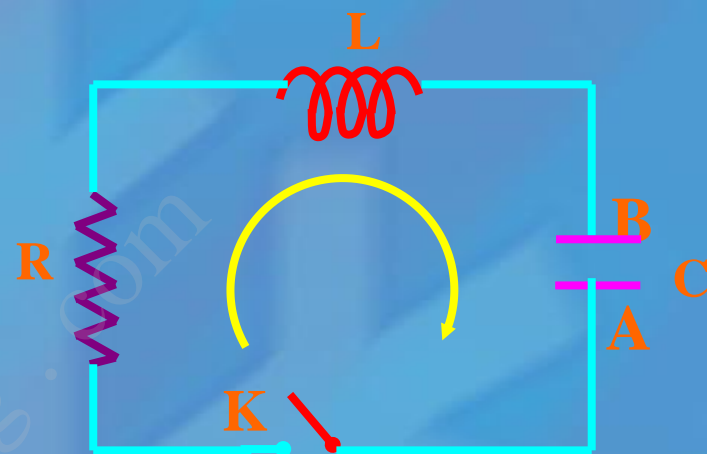
Mà $V_A - V_B = U_{AB} = \frac{q}{C}$

→ $R i + L \frac{d i}{d t} - \frac{q}{C} = 0 \quad (\#)$

Thay $i = - \frac{d q}{d t}$ **ta được** $L \frac{d^2 q}{d t^2} + R \frac{d q}{d t} + \frac{q}{C} = 0 \quad (*)$

Phương trình trên ta có phương trình đặc trưng

$$L r^2 + R r + \frac{1}{C} = 0 \quad \text{Với nghiệm } r = \frac{d q}{d t}$$



Hình 9.15

1) Trạng thái phi tuần hoàn :

nếu $R^2 - \frac{4L}{C} > 0$ thì nghiệm $r_{1;2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$

$$r_1 = \frac{-R - \sqrt{R^2 - 4\frac{L}{C}}}{2L} < 0$$

$$r_2 = \frac{-R + \sqrt{R^2 - 4\frac{L}{C}}}{2L} < 0 \quad (R^2 > R^2 - 4\frac{L}{C} \Rightarrow R > \sqrt{R^2 - 4\frac{L}{C}})$$

Nghiệm số là: $q = A_1 e^{r_1 t} + A_2 e^{r_2 t}$

Với $A_1, A_2 = \text{const}$

$t \rightarrow +\infty$ thì $i \rightarrow 0$ gọi là trạng thái phi tuần hoàn

2) Trạng thái giả tuần hoàn:

$$R^2 - \frac{4L}{C} < 0 \quad \text{Pt có 2 nghiệm phức}$$

$$r_1 = \alpha + j\omega \quad r_2 = \alpha - j\omega \quad \text{Với} \quad \alpha = -\frac{R}{2L} < 0$$

Nghiệm của phương trình là: $q = A_1 e^{(\alpha + j\omega)t} + A_2 e^{(\alpha - j\omega)t}$

Q là một đại lượng vật lý, phải diễn tả bằng số thực. Vậy A_1 và A_2 phải là những số phức liên hợp A và A^*

$$q = A e^{(\alpha + j\omega)t} + A^* e^{(\alpha - j\omega)t}$$

$$A = a + jb$$

$$A^* = a - jb$$

Dùng công thức Euler : $e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$

Thu gọn kết quả, ta được:

$$q = e^{\alpha t} [(a + jb)(\cos \omega t + j \sin \omega t) + (a - jb)(\cos \omega t - j \sin \omega t)] \quad (1)$$



$$q = e^{\alpha t} [2a \cos \omega t - 2b \sin \omega t]$$

Đặt

$$Q^2 = 4(a^2 + b^2)$$

$$\tan \phi = -\frac{b}{a}$$

(1) ⇔

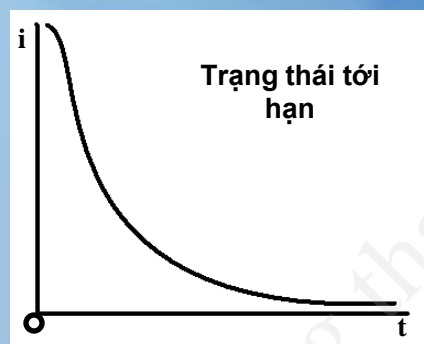
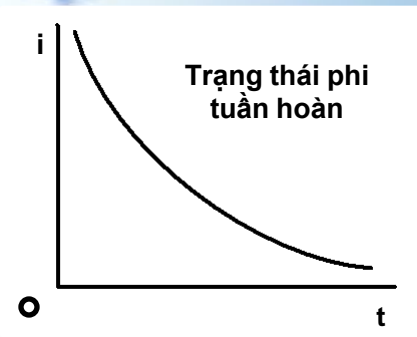
$$q = Q e^{\alpha t} \cos(\omega t + \phi)$$

q và i là hàm số giả tuần hoàn : i dao động với tần số góc ω nhưng biên độ giảm dần và triệt tiêu theo thời gian, theo dạng hàm số mũ

3) Trạng thái tới hạn :

Nếu $R^2 - \frac{4L}{C} = 0$ thì nghiệm kép thực : $\alpha = -\frac{R}{2L}$

Nghiệm của (*) là : $q = (A + Bt)e^{\alpha t}$ (A,B là những số thực)



Trạng thái tới hạn là trạng thái trung gian giữa phi tuần hoàn và giả tuần hoàn, trong đó I giảm nhanh hơn trạng thái phi tuần hoàn

Nhân 2 vế phương trình (#) cho $dq = -idt$ ta được:

$$R i^2 dt + L \frac{di}{dt} i dt + \frac{q dq}{C} = 0$$

Lấy tích phân 2 vế từ t_1 đến t_2



$$\int_{t_1}^{t_2} R i^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} L i di + \int_{t_1}^{t_2} \frac{q dq}{C} = 0$$



$$\left[\frac{1}{2} L i^2 + \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} \right]_{t_1}^{t_2} = - \int_{t_1}^{t_2} R i^2 dt$$

Trong vế trái là năng lượng từ trường và năng lượng điện trường, vế phải là nhiệt năng tỏa ra của R. Ý nghĩa là trong thời gian t_1 đến t_2 thì năng lượng từ và năng lượng điện bị mất dưới dạng nhiệt năng của R.

Ở trạng thái phi tuần hoàn và tới hạn thì năng lượng từ và điện giảm cùng lúc.

Ở trạng thái giả tuần hoàn: tụ và cuộn cảm trao đổi năng lượng qua lại của chúng. Giống như trong mạch dao động LC, khi năng lượng từ cực đại thì năng lượng điện bằng không và ngược lại, năng lượng này sẽ mất dần dưới dạng nhiệt năng của điện trở của dây và cuộn cảm