

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

Chương 6

CẢM ỨNG ĐIỆN TỪ

Nội dung

- Hiện tượng cảm ứng điện từ
- Hiện tượng tự cảm
- Hiện tượng hồ cảm
- Ứng dụng hiện tượng cảm ứng điện từ.
- Năng lượng từ trường.

Chuẩn đầu ra

- Hiểu được các khái niệm cơ bản về cảm ứng điện từ.
- Nắm được các hiện tượng về cảm ứng điện từ.
- Vận dụng giải các bài toán cụ thể về tìm dòng điện cảm ứng, giải thích các hiện tượng cảm ứng điện từ và năng lượng từ trường.

NỘI DUNG

6.0 Hiện tượng cảm ứng điện từ

6.1 Các định luật về cảm ứng điện từ

6.2 Hiện tượng tự cảm

6.3 Hiện tượng hồ cảm

6.4 Ứng dụng cảm ứng điện từ

6.5 Năng lượng từ trường

6.6 Định luật Kirchhoff trong mạch có cuộn cảm

Sự phát sinh sức điện động bằng cách thay đổi từ thông được quan sát bởi Faraday và Henry vào đầu thế kỷ 19. Các thí nghiệm của họ làm căn bản cho sự phát minh máy phát điện động cơ, máy biến thế, ...

Sức điện động:

Trong chương 1 ta biết điện trường tĩnh của một phân bố tĩnh điện tích là một trường bảo toàn nghĩa là tích phân đường của điện trường quanh một đường kín bất kỳ triệt tiêu

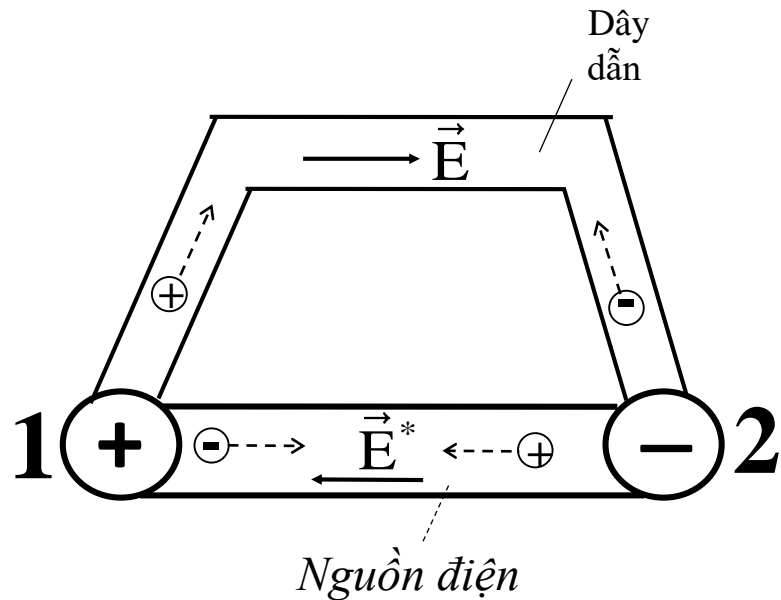
$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = 0$$

Các phần tử mang điện tích, như điện tử, có thể bị tác dụng bởi các lực khác như Cơ, Hóa, ... trong một đoạn của mạch kín khiến cho tích phân của \vec{E} quanh mạch không triệt tiêu $\left(\oint_C \vec{E}^* \cdot d\vec{\ell} \neq 0 \right)$

Trị số của tích phân trong trường hợp này gọi là sức điện động:

$$\varepsilon = \oint_C \vec{E}^* \cdot d\vec{\ell}$$

Sức điện động này là động lực duy trì dòng điện quanh mạch. Khi một pin cho dòng điện ở mạch ngoài, dòng điện trong pin chạy từ cực có điện thế thấp đến nơi có điện thế cao. Lực hóa di chuyển các điện tích ngược chiều



Hình 4A.3

Đối với đoạn mạch:

$$\varepsilon_{12} = \int_1^2 \vec{E}^* \cdot d\vec{\ell} = \frac{1}{q} \int_1^2 \vec{F}^* \cdot d\vec{\ell} = \frac{A_{12}}{q} = \frac{A_{12}}{1}$$

Tổng quát: đối với mạch kín :

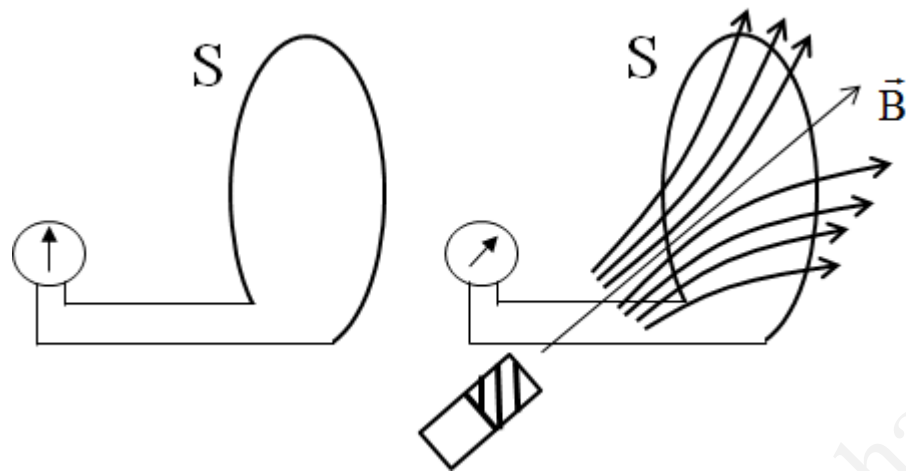
$$\varepsilon = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$$

\vec{E} không phải là điện trường tĩnh mà là điện trường xoáy, vì nếu điện trường tĩnh thì $(\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = 0)$

Nói cách khác: sức điện động của nguồn điện (kí hiệu là ε) là đại lượng đặc trưng cho độ mạnh của nguồn điện, là công để làm dịch chuyển một đơn vị điện tích dương dọc theo mạch điện. Thực vậy:

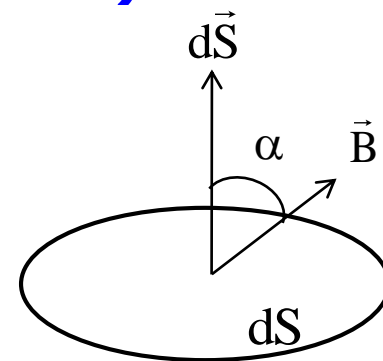
6.1. CÁC ĐỊNH LUẬT

6.1.1 THÍ NGHIỆM FARADAY (ĐỊNH LUẬT FARADAY)



Hiện tượng cảm ứng điện từ xảy ra khi một trong ba thông số sau thay đổi:

- ① \vec{B} thay đổi
- ② Diện tích S của vòng dây thay đổi
- ③ Vị trí tương đối của mặt phẳng vòng dây và \vec{B} thay đổi (góc α)



Từ thông

$$\Phi_m = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B dS \cos \alpha$$

Ba điều kiện trên sẽ dẫn đến Φ_m thay đổi

Vậy khi từ thông gửi qua diện tích mạch thay đổi thì trong mạch xuất hiện hiện tượng cảm ứng điện từ (sức điện động cảm ứng hoặc dòng điện cảm ứng).

Sức điện động cảm ứng này độc lập với cách thức mà từ thông được thay đổi, có thể do sự biến đổi của từ trường, có thể do sự biến dạng hay dịch chuyển của mạch, ... Ở một khía cạnh nào đó, định luật Faraday, có thể suy ra từ nguyên lý bảo toàn năng lượng, định luật nên được xem như là một kết quả thực nghiệm độc lập.

Thí nghiệm cho thấy dòng điện cảm ứng lớn hay nhỏ phụ thuộc tốc độ thay đổi của từ thông:

$$\frac{d\Phi_m}{dt}$$

Dòng điện cảm ứng sinh ra để chống lại sự thay đổi của từ thông nên:

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

Dấu trừ chỉ rằng chiều của sức điện động cảm ứng, còn gọi sức điện động đối, là làm sao cho mạch có thể chống lại (có hiệu như lực quán tính trong cơ học) nguyên nhân phát sinh ra sức điện động ấy, thể theo định luật Lenz.

6.1.2. 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.

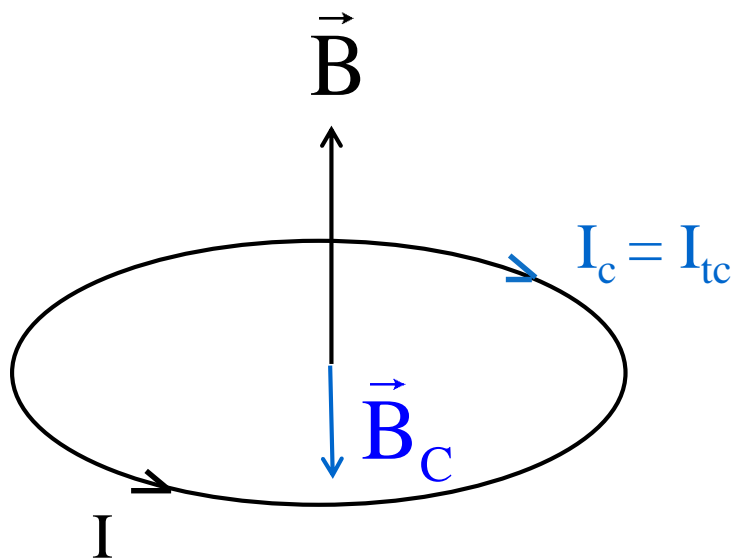
6.2. HIỆN TƯỢNG TỰ CẢM

Khi dòng điện thay đổi (ví dụ dòng điện biến thiên) $\Rightarrow \vec{B}$ do chính dòng điện đó sinh ra thay đổi \Rightarrow từ thông gửi qua diện tích mạch (của chính dòng điện đó) thay đổi \Rightarrow hiện tượng tự cảm ứng điện từ \Rightarrow hiện tượng tự cảm

$$\varepsilon_c = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d\Phi_m}{dI} \frac{dI}{dt} = \varepsilon_{tc}$$

Với: $L = \frac{d\Phi_m}{dI}$: hệ số tự cảm (Henry)

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

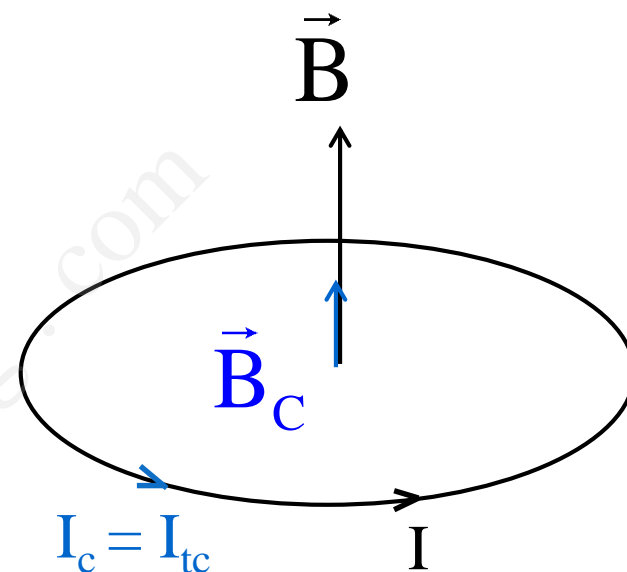


I tăng $\rightarrow \vec{B}$ tăng $\rightarrow \Phi_m$ tăng

$\rightarrow I_c = I_{tc}$

\vec{B}_c Sinh ra để chống lại sự tăng của \vec{B}

$\Rightarrow \vec{B}_c \uparrow \downarrow \vec{B}$



I giảm $\rightarrow \vec{B}$ giảm $\rightarrow \Phi_m$ giảm

$\rightarrow I_c = I_{tc}$

\vec{B}_c Sinh ra để chống lại sự giảm \vec{B}

$\Rightarrow \vec{B}_c \uparrow \uparrow \vec{B}$

Hệ số tự cảm của ống dây thẳng rất dài

❑ Từ trường trong ống dây: $B = \mu_0 n I$ (4B.20)

❑ Từ thông gửi qua ống dây (có N vòng dây): $\Phi_m = NBS$



$$\Phi_m = \mu_0 \frac{N^2}{\ell} IS$$

$$\left(n = \frac{N}{\ell} \right)$$

❑ Ta có:

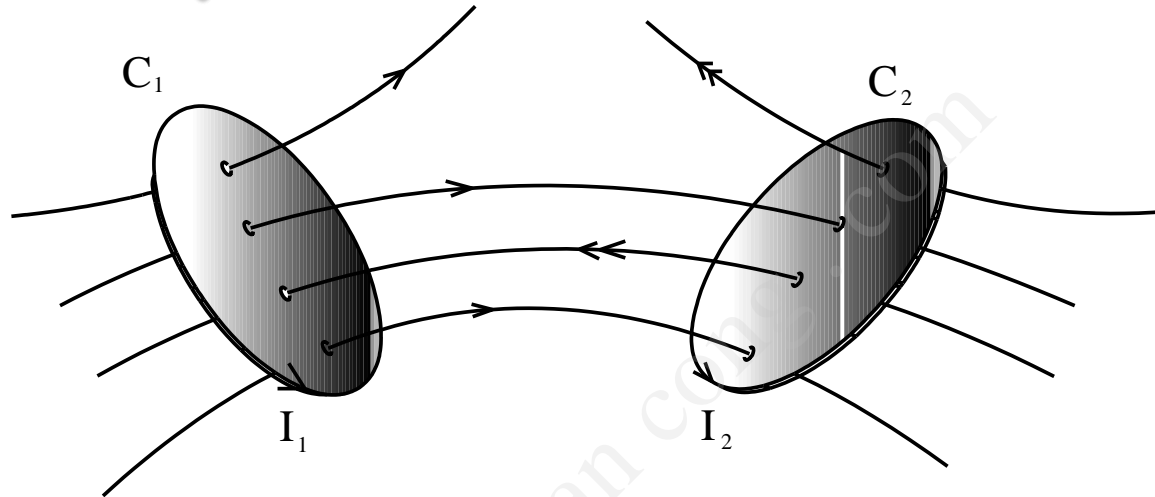
$$L = \frac{d\Phi_m}{dI}$$



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

(6.8)

6.3. HIỆN TƯỢNG HỖ CẢM



□ **6.3.1. Hiện tượng:** hiện tượng cường độ dòng điện trong một mạch bị biến đổi làm xuất hiện dòng điện cảm ứng trong mạch kia gọi là hiện tượng hồ cảm, dòng điện này được gọi là dòng điện hồ cảm.

□ **6.3.2. Sức điện động hồ cảm – Hệ số hồ cảm**

$$\varepsilon_{hc} = - \frac{d\Phi_m}{dt}$$

- $\Phi_{m12} = M_{12}I_1$: từ thông do dòng điện I_1 sinh ra và gửi qua diện tích của mặt (C_2).
- $\Phi_{m21} = M_{21}I_2$: từ thông do dòng điện I_2 sinh ra và gửi qua diện tích của mặt (C_1).
- $M_{12} = M_{21} = M$ (Henry = H): hệ số hỗ cảm của hai mạch (C_1) và (C_2).

□ Sức điện động hỗ cảm trong (C_2):

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

□ Sức điện động hỗ cảm trong (C_1):

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

6.4. ỨNG DỤNG

6.4.1. Máy phát điện xoay chiều

➤ Tại thời điểm t:

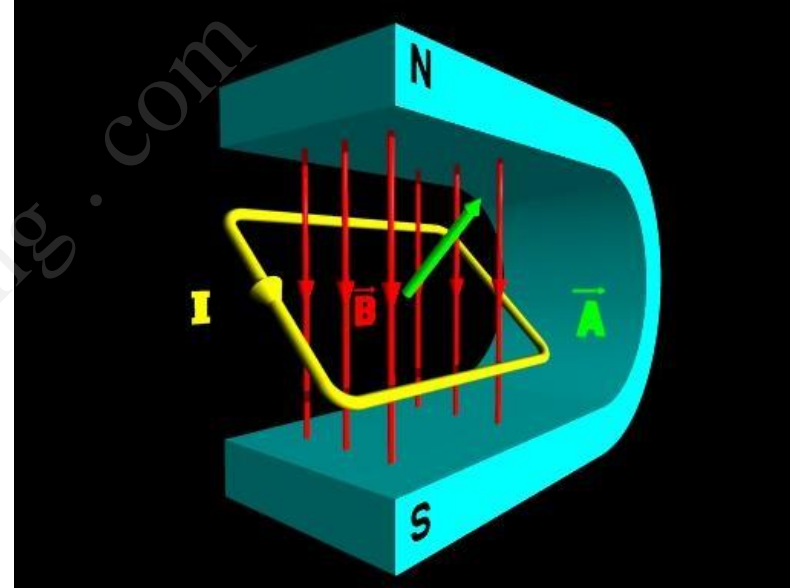
$$(\vec{n}; \vec{B}) = \alpha = \omega t + \varphi$$

➤ Từ thông gửi qua khung dây:

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

➤ Φ_m thay đổi theo t, trong khung xuất hiện sức điện động cảm ứng

$$\varepsilon_c = - \frac{d\Phi_m}{dt} = NS\omega B \sin(\omega t + \varphi)$$



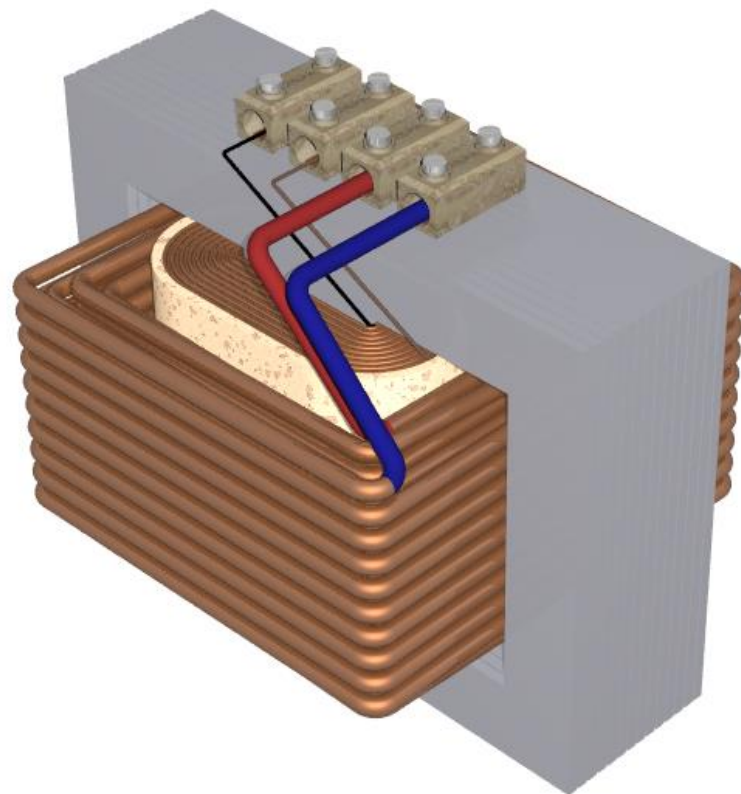
Dòng điện cảm ứng được tạo ra trong khung dây là dòng điện xoay chiều chu kỳ $T = 2\pi/\omega$

6.4.2. 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.

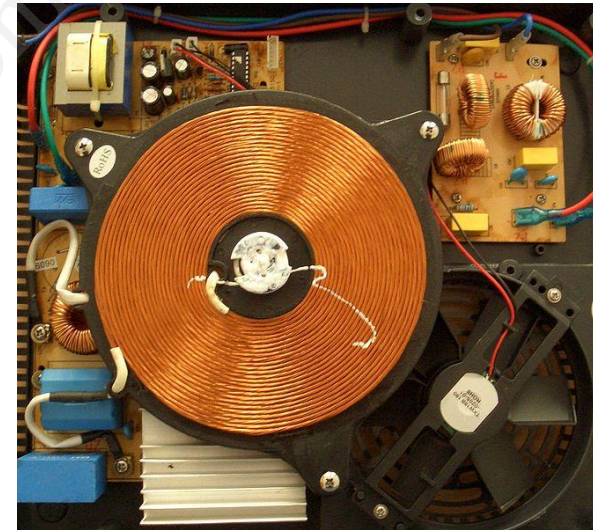
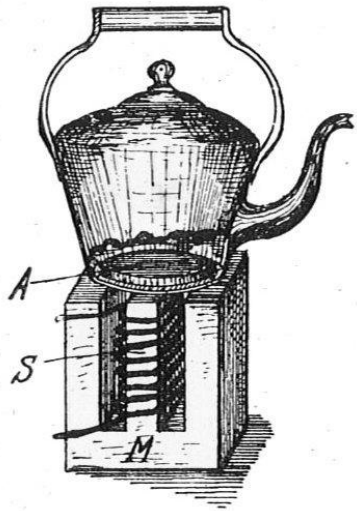
1. Tác hại:

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

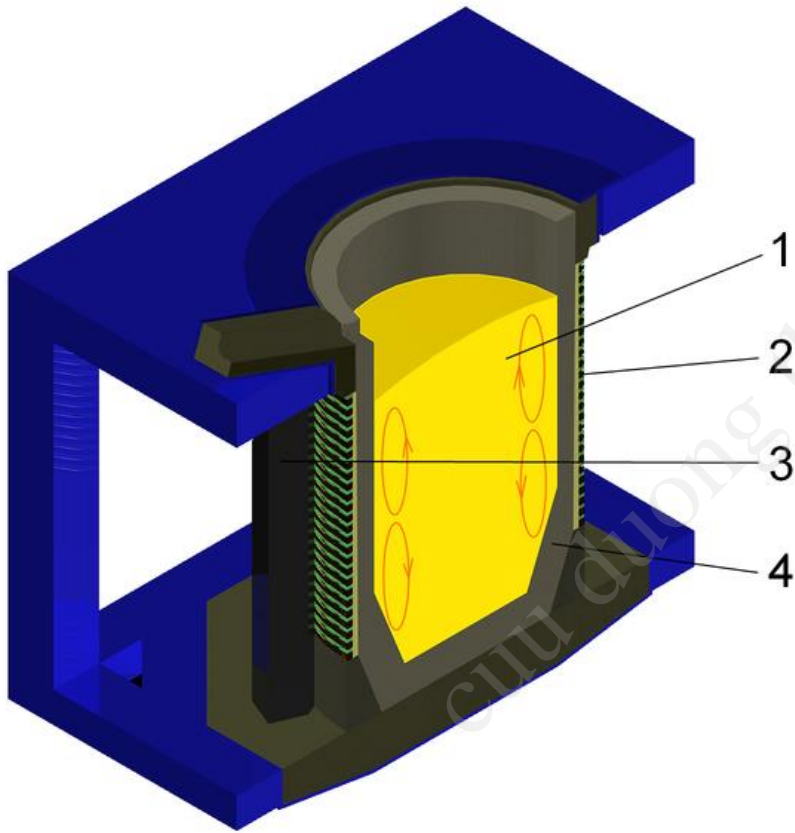
Bếp từ



Thiết bị đóng dấu cảm ứng



Lò nấu chảy kim loại



6.4.3. 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:

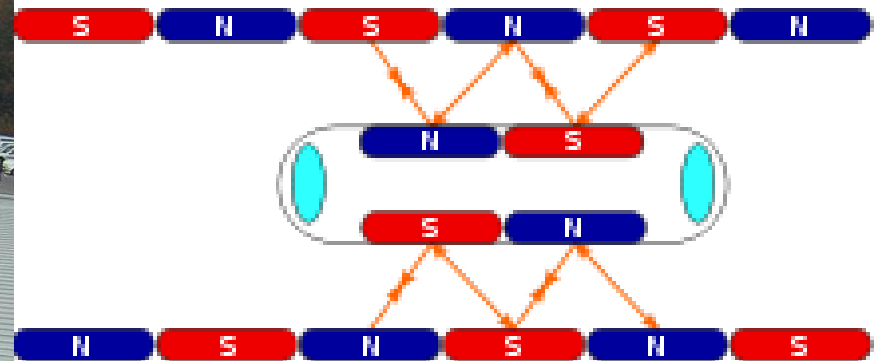
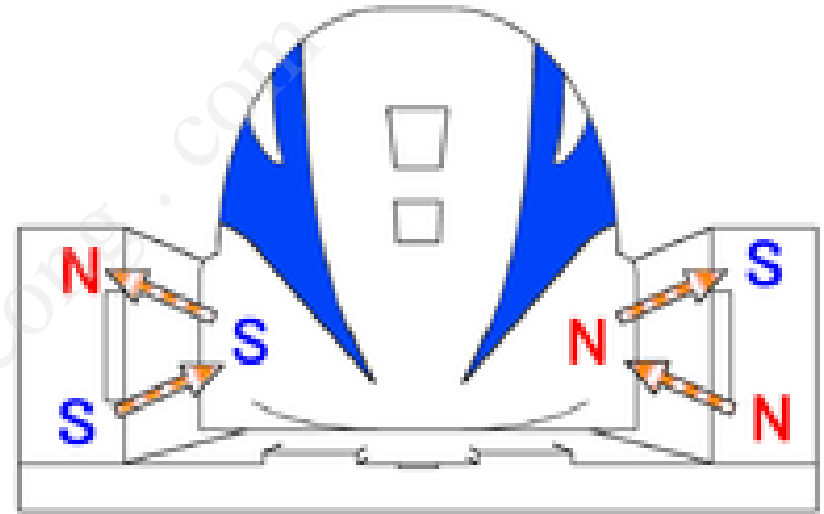
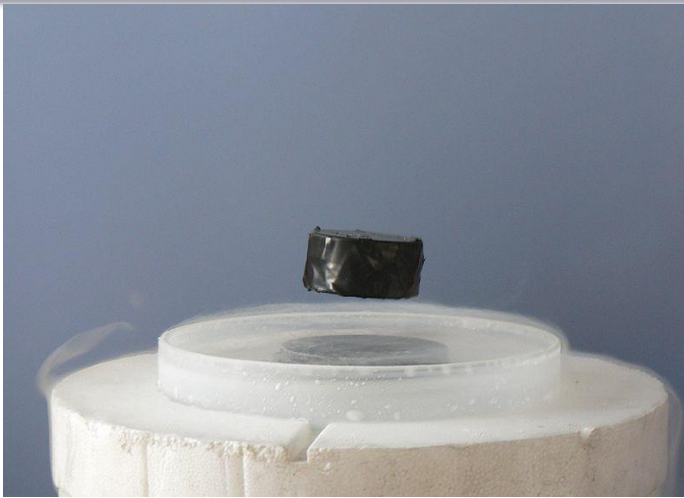
$$I_c = \frac{\varepsilon_c}{R} = \frac{vBL}{R}$$

➤ Thanh kim loại sẽ chịu tác dụng bởi một từ ngược chiều chuyển động của thanh và độ lớn cũng tỉ lệ với v :

$$F_c = I_c BL \quad \longrightarrow \quad F_c = \frac{vB^2 L^2}{R}$$

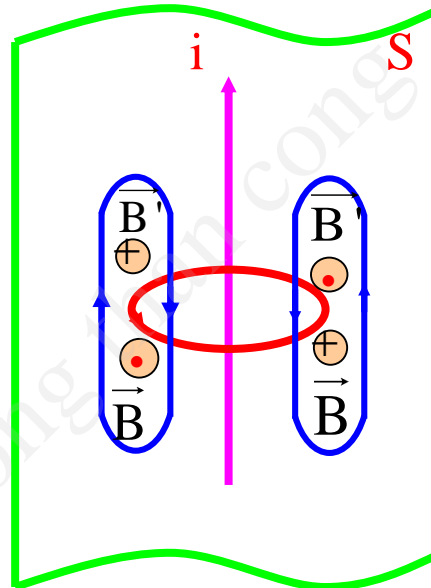
❖ Lực có tính chất này tác dụng như lực cản của môi trường và chuyển động của thanh kim loại trong từ trường như chuyển động của trong môi trường nhớt.

Tàu đệm từ Maglev với vận tốc tối đa 500km/h

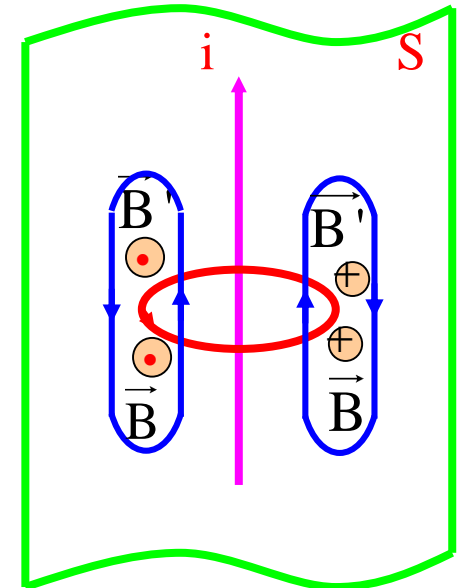


6.4.4. Hiệu ứng da

- 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



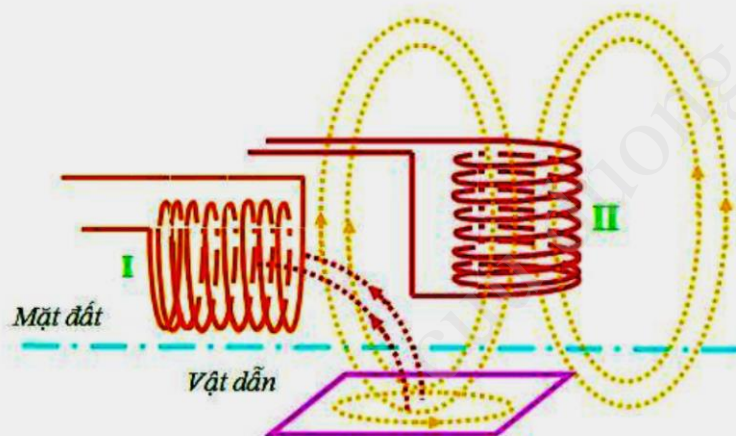
(a)



(b)

6.4.5. Máy dò điện từ

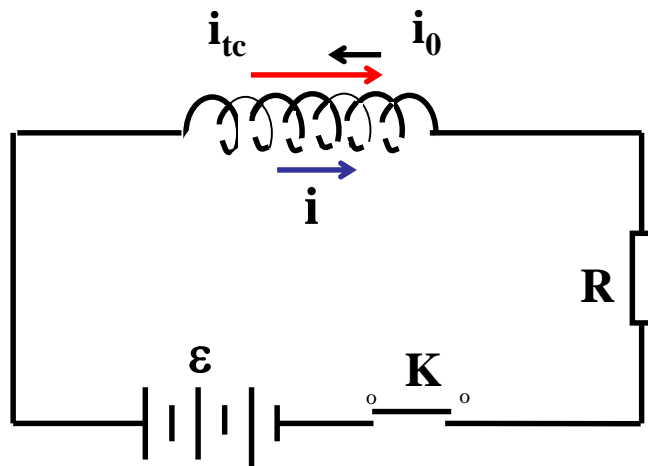
Máy được cấu tạo như hình vẽ, gồm 2 cuộn dây vuông góc nhau, cuộn 2 là cuộn phát, khi gập vật dẫn dưới đất, từ thông qua nó biến thiên, tạo nên dòng hồ cảm qua cuộn 1, xuất hiện dòng điện hồ cảm ở cuộn 1, báo cho biết có vật dẫn dưới đất



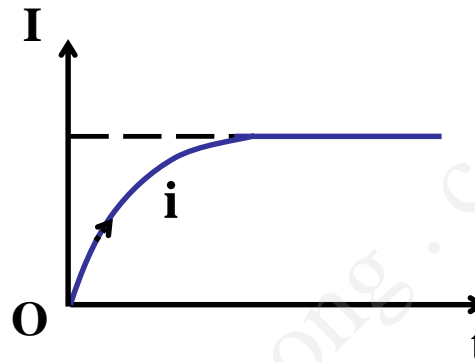
Hình 9.11: Máy dò vật dẫn dưới đất



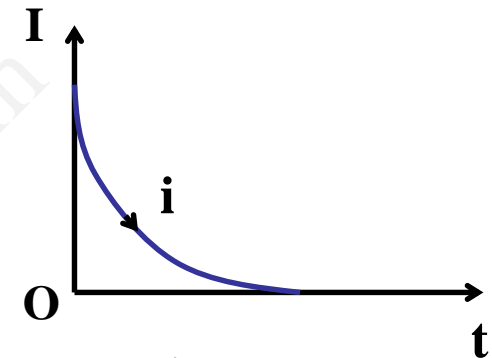
6.5. NĂNG LƯỢNG TỪ TRƯỜNG



Hình 6.12.a



Hình 6.12.b



Hình 6.12.c

ĐÓNG MẠCH (hình 6.12b)

- i tăng từ 0 đến trị ổn định và cực đại I .
- Trong mạch xuất hiện dòng điện tự cảm i_{tc} ngược chiều với dòng điện chính i_0 .

Dòng điện toàn phần: $i \equiv i_0 - i_{tc} < i_0$

Chỉ có một phần điện năng biến thành
nhiệt năng

NGẮT MẠCH (hình 6.12c)

Dòng điện chính giảm đột ngột từ I về 0. Do đó trong mạch xuất hiện dòng điện tự cảm cùng chiều với dòng điện chính đó, làm cho dòng điện toàn phần trong mạch lớn lên và giảm chậm lại.

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.

Xét quá trình dòng điện sinh ra trong mạch:

Định luật Ohm:

$$\varepsilon + \varepsilon_{tc} = Ri$$

Sức điện động tự cảm:

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

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



$$\varepsilon i dt = Ri^2 dt + L i di$$

$$\varepsilon i dt = Ri^2 dt + L i di$$

Điện năng do
nguồn điện sinh ra

Năng lượng tiềm tàng
dưới dạng năng
lượng từ trường

Điện năng biến
thành nhiệt năng

Năng lượng từ trường

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

Năng lượng của một từ trường bất kỳ

➤ Mật độ năng lượng từ trường của ống dây:

với $L = \mu_0 \frac{N^2}{\ell} S$ (6.8) và $B = \mu_0 \frac{NI}{\ell}$ (4B.20)

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2}{\ell} SI^2 \Rightarrow \frac{W_m}{S\ell} = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2}{\ell^2} I^2 = w_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$$

➤ Năng lượng của một từ trường bất kì

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

$$W_m = \frac{1}{2} \int_v \vec{B} \cdot \vec{H} dv$$

6.6. ĐỊNH LUẬT KIRCHHOFF TRONG MẠCH CÓ CUỘN CẢM

❄ Chọn chiều của vòng mạng cùng chiều dòng điện

Ta có phương trình:

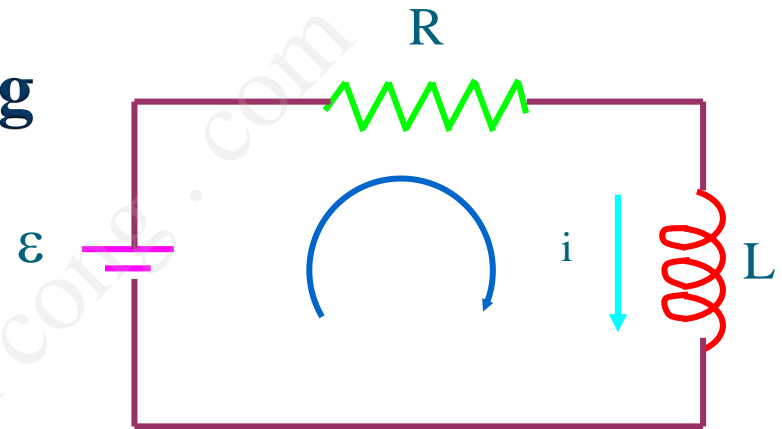
$$\varepsilon = Ri + L \frac{di}{dt}$$

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

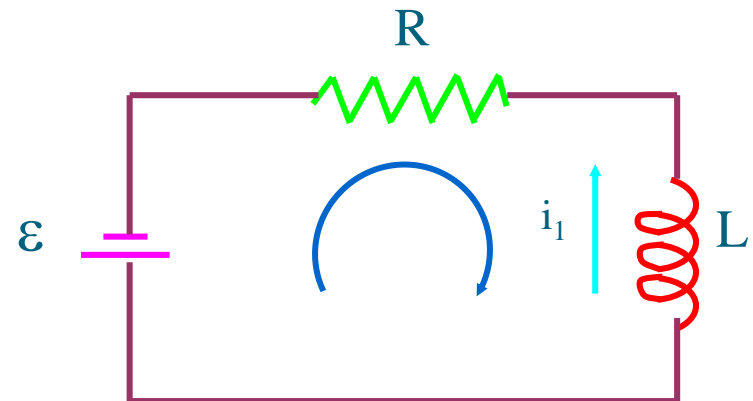
❄ Đổi chiều dòng điện:

$$i = -i_1$$

➡ $-Ri_1 - L \frac{di_1}{dt} - \varepsilon = 0$



Hình 9.13



Hình 9.14

Kết luận

Trong một vòng mạng có cuộn cảm L , ta có thể áp dụng **định luật Kirchhoff** bằng cách gán dấu $(+)$ trước $L di/dt$ khi chiều vòng mạng **cùng chiều** dòng điện; dấu $(-)$ trước $L di/dt$ khi chiều vòng mạng **ngược chiều** dòng điện.

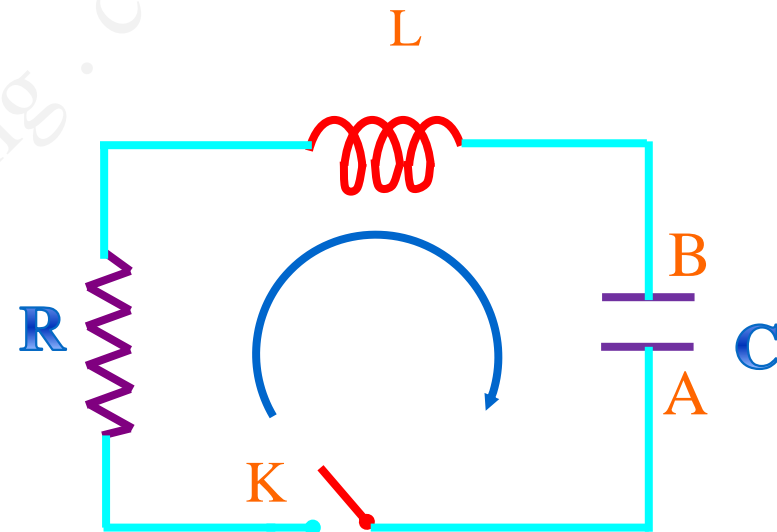
Mạch RLC nối tiếp

Cho đoạn mạch như hình vẽ, tụ điện C được tích điện dưới hiệu điện thế $U_{AB} \equiv V_A - V_B$.

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 $t \equiv 0$ 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 $dq \equiv -idt$ rời bản A của tụ.



Hình 9.15

➤ Áp dụng định luật Kirchhoff:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + (V_B - V_A) = 0$$

Mà

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

➔

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

➔

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0 \quad (*) \quad \left(i = -\frac{dq}{dt} \right)$$

❖ Nghiệm của phương trình (*) cho ta biết sự tiến triển của trạng thái chuyển tiếp.

➤ Phương trình đặc trưng của phương trình (*):

$$Lr^2 + Rr + \frac{1}{C} = 0 \quad (**)$$

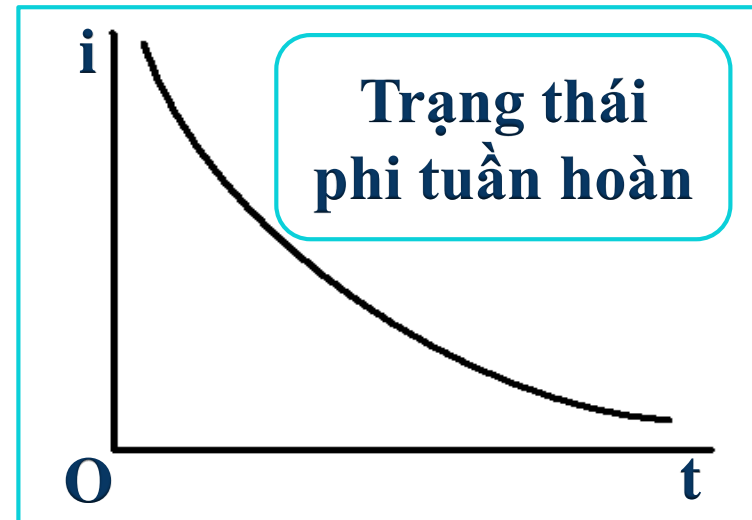
a) Trạng thái phi tuần hoàn:

Nếu $R^2 - \frac{4L}{C} > 0$ thì (**) có hai nghiệm $r_{1,2} < 0$.

Nghiệm của (*): $q = A_1 e^{r_1 t} + A_2 e^{r_2 t}$

Vậy:

$$t \rightarrow +\infty \quad \longrightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} q \rightarrow 0 \\ i \equiv -dq/dt \rightarrow 0 \end{array} \right.$$



Ta gọi đây là trạng thái phi tuần hoàn

b) Trạng thái giả tuần hoàn:

$R^2 - \frac{4L}{C} < 0$: Phương trình (**) có 2 nghiệm phức liên hiệp

$$r_{1,2} = \alpha \pm j\omega$$

$$\left(\alpha = -\frac{R}{2L} < 0 \right)$$

➤ 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^*

$$Lr^2 + Rr + \frac{1}{C} = 0 \quad \Rightarrow \quad q = Ae^{(\alpha+j\omega)t} + A^* e^{(\alpha-j\omega)t}$$

- Khai triển phương trình trên và dùng công thức Euler :

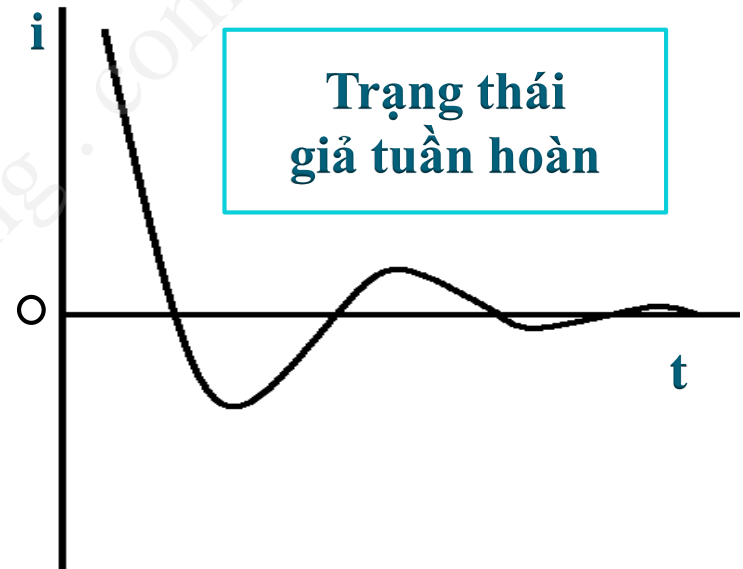
$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$$

- Đặt: $Q^2 = 4(a^2 + b^2)$

$$\operatorname{tg} \phi = -\frac{b}{a}$$

- Ta được phương trình:

$$q = Qe^{at} \cos(\omega t + \phi)$$



- ❑ Nhận xét: i dao động với tần số góc ω nhưng biên độ giảm dần và triệt tiêu theo thời gian, theo dạng hàm số mũ.

Ta gọi đây là trạng thái giả tuần hoàn

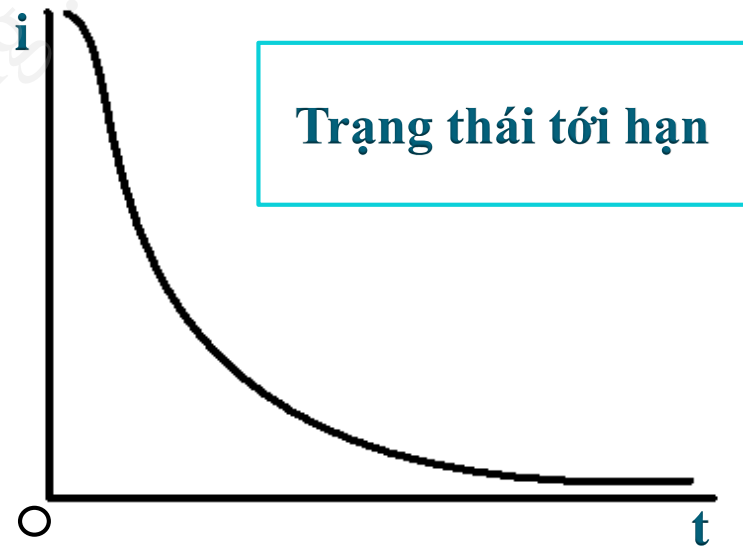
c) Trạng thái tới hạn:

➤ Nếu $R^2 - \frac{4L}{C} = 0$ thì (**) có nghiệm kép thực:

$$\alpha = -\frac{R}{2L}$$

➤ Nghiệm của (*) là :

$$q = (A + Bt)e^{\alpha t}$$



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 $dq \equiv -i dt$ ta được:

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

Lấy tích phân hai vế từ t_1 đến t_2 :

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



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

**Năng lượng tích trữ
trong cuộn cảm L và
trong tụ điện C**

**Năng lượng tiêu hao
trong điện trở R dưới
dạng nhiệt năng**

Ý nghĩa vật lý

Trong thời gian t_1 đến t_2 , năng lượng tích trữ trong tụ điện và cuộn cảm bị tiêu hao dưới dạng nhiệt năng trong điện trở.

- Ở trạng thái phi tuần hoàn và tới hạn thì năng lượng của tụ điện và cuộn cảm 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