

Tổng hợp kiến thức: Mạch dao động LC và Năng lượng điện từ

I. Mạch dao động LC lý tưởng

1. Cấu tạo

Một mạch dao động LC lý tưởng bao gồm:

- Một **tụ điện (Capacitor)** có điện dung C .
- Một **cuộn cảm thuần (Inductor)** có độ tự cảm L .

"Lý tưởng" có nghĩa là mạch có điện trở thuần không đáng kể ($R = 0$). Do đó, không có sự tiêu hao năng lượng do hiệu ứng Joule-Lenz.

2. Hoạt động

Quá trình dao động điện từ trong mạch LC là sự biến đổi tuần hoàn giữa năng lượng điện trường trong tụ điện và năng lượng từ trường trong cuộn cảm.

1. **Ban đầu ($t=0$):** Tích điện cho tụ điện đến hiệu điện thế cực đại U_0 (điện tích Q_0), sau đó nối vào cuộn cảm. Lúc này, toàn bộ năng lượng của mạch tập trung ở tụ điện dưới dạng năng lượng điện trường ($W_{đ_max}$).
2. **Tự phóng điện ($0 < t < T/4$):** Tụ điện phóng điện qua cuộn cảm, tạo ra dòng điện i trong mạch. Dòng điện i tăng dần, năng lượng điện trường giảm dần và chuyển hóa thành năng lượng từ trường trong cuộn cảm (tăng dần).

3. **Thời điểm $t = T/4$:** Tự phóng hết điện ($q=0, u=0$). Dòng điện trong mạch đạt giá trị cực đại I_0 . Toàn bộ năng lượng của mạch tập trung ở cuộn cảm dưới dạng năng lượng từ trường (W_{t_max}).
4. **Tự nạp điện ($T/4 < t < T/2$):** Do hiện tượng tự cảm, dòng điện không giảm về 0 ngay mà tiếp tục chạy, nạp điện cho tụ theo chiều ngược lại. Dòng điện giảm dần, năng lượng từ trường giảm và chuyển hóa thành năng lượng điện trường.
5. **Thời điểm $t = T/2$:** Dòng điện trong mạch triệt tiêu ($i=0$). Tụ điện được nạp đầy nhưng với cực tính ngược lại so với ban đầu (điện tích $-Q_0$). Năng lượng điện trường lại đạt cực đại.

Quá trình tiếp tục lặp lại, tạo thành một dao động điện từ tự do, tuần hoàn.

II. Dao động điện từ tự do trong mạch LC

Dao động của điện tích q và dòng điện i trong mạch LC lý tưởng là dao động điều hòa.

1. Điện tích tức thời (q)

- **Công thức:** $q = Q_0 \cos(\omega t + \varphi)$

- **Giải thích:**

- **q :** Điện tích tức thời trên một bản tụ điện (đơn vị: Coulomb - C).
- **Q_0 :** Điện tích cực đại, là biên độ của điện tích ($Q_0 > 0$).
- **ω :** Tần số góc của dao động (đơn vị: rad/s).

- **$(\omega t + \varphi)$** : Pha dao động tại thời điểm t .
- **φ** : Pha ban đầu, phụ thuộc vào cách chọn gốc thời gian.
- **Ví dụ:** Một mạch LC có điện tích cực đại là 4×10^{-6} C và pha ban đầu là $\pi/3$ rad. Phương trình điện tích là: $q = 4 \times 10^{-6} \cos(\omega t + \pi/3)$ C.

2. Hiệu điện thế tức thời (u)

- **Công thức:** $u = U_0 \cos(\omega t + \varphi)$
- **Giải thích:**
 - Hiệu điện thế tức thời giữa hai bản tụ: $u = q/C$.
 - Hiệu điện thế cực đại: $U_0 = Q_0/C$.
 - u và q luôn cùng pha với nhau.
- **Ví dụ:** Cho mạch LC có $C = 2 \mu\text{F}$ và phương trình điện tích $q = 5 \times 10^{-6} \cos(1000t)$ C. Hiệu điện thế cực đại là $U_0 = Q_0/C = (5 \times 10^{-6}) / (2 \times 10^{-6}) = 2.5$ V. Phương trình hiệu điện thế là $u = 2.5 \cos(1000t)$ V.

3. Cường độ dòng điện tức thời (i)

- **Công thức:** $i = q' = -\omega Q_0 \sin(\omega t + \varphi) = I_0 \cos(\omega t + \varphi + \pi/2)$
- **Giải thích:**
 - **i** : Cường độ dòng điện tức thời trong mạch (đơn vị: Ampere - A).
 - **I_0** : Cường độ dòng điện cực đại, là biên độ của dòng điện ($I_0 = \omega Q_0$).
 - Dòng điện i **sớm pha hơn** điện tích q và hiệu điện thế u một góc $\pi/2$.

- **Ví dụ:** Từ ví dụ trên, $q = 5 \times 10^{-6} \cos(1000t)$ C. Ta có $\omega = 1000$ rad/s. Cường độ dòng điện cực đại $I_0 = \omega Q_0 = 1000 * 5 \times 10^{-6} = 5 \times 10^{-3}$ A = 5 mA. Phương trình dòng điện là $i = 5 \times 10^{-3} \cos(1000t + \pi/2)$ A.

4. Chu kỳ, tần số dao động riêng

- **Tần số góc:** $\omega = 1/\sqrt{LC}$
- **Chu kỳ:** $T = 2\pi/\omega = 2\pi\sqrt{LC}$
- **Tần số:** $f = 1/T = 1/(2\pi\sqrt{LC})$
- **Giải thích:** Các đại lượng này được gọi là chu kỳ, tần số dao động riêng của mạch, chỉ phụ thuộc vào các đặc tính của mạch (L và C), không phụ thuộc vào cách kích thích dao động.
- **Ví dụ:** Một mạch dao động có $L = 2$ mH và $C = 8$ μ F. Chu kỳ dao động của mạch là $T = 2\pi\sqrt{LC} = 2\pi\sqrt{(2 \times 10^{-3} * 8 \times 10^{-6})} = 2\pi\sqrt{(16 \times 10^{-9})} = 2\pi * 4 \times 10^{-4.5} \approx 2.51 \times 10^{-4}$ s.

III. Năng lượng trong mạch dao động LC

1. Năng lượng điện trường (Wđ)

- **Công thức:** $W_{\text{đ}} = \frac{1}{2} C u^2 = \frac{q^2}{(2C)} = \frac{1}{2} Q_0^2 / C * \cos^2(\omega t + \varphi)$
- **Giải thích:** Năng lượng điện trường được tích trữ trong tụ điện. Nó biến thiên tuần hoàn theo thời gian.
- **Ví dụ:** Mạch LC có $C = 10$ μ F, $U_0 = 4$ V. Năng lượng điện trường cực đại là $W_{\text{đ_max}} = \frac{1}{2} C U_0^2 = \frac{1}{2} * 10 \times 10^{-6} * 4^2 = 8 \times 10^{-5}$ J.

2. Năng lượng từ trường (Wt)

- **Công thức:** $W_t = \frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2}LI_0^2 * \sin^2(\omega t + \varphi)$
- **Giải thích:** Năng lượng từ trường được tích trữ trong cuộn cảm. Nó cũng biến thiên tuần hoàn theo thời gian.
- **Ví dụ:** Mạch LC có $L = 0.5 \text{ H}$, $I_0 = 0.1 \text{ A}$. Năng lượng từ trường cực đại là $W_{t_max} = \frac{1}{2}LI_0^2 = \frac{1}{2} * 0.5 * (0.1)^2 = 0.0025 \text{ J}$.

3. Năng lượng điện từ (W)

- **Công thức:** $W = W_{đ} + W_t = \frac{1}{2}Cu^2 + \frac{1}{2}Li^2 = \text{const}$
- **Giải thích:** Trong mạch dao động LC lý tưởng, năng lượng điện từ được bảo toàn. Năng lượng này bằng tổng năng lượng điện trường và năng lượng từ trường.
- **Giá trị không đổi:** $W = W_{đ_max} = \frac{1}{2}CU_0^2 = Q_0^2/(2C)$ hoặc $W = W_{t_max} = \frac{1}{2}LI_0^2$.
- **Mối liên hệ:** $\frac{1}{2}CU_0^2 = \frac{1}{2}LI_0^2$
- **Ví dụ:** Khi năng lượng điện trường bằng 3 lần năng lượng từ trường ($W_{đ} = 3W_t$), ta có $W = W_{đ} + W_t = 4W_t$. Suy ra $W_t = W/4$. Do $W_t = \frac{1}{2}Li^2$, nên $\frac{1}{2}Li^2 = (\frac{1}{2}LI_0^2)/4 \Rightarrow i^2 = I_0^2/4 \Rightarrow i = \pm I_0/2$.

4. Sự biến thiên của năng lượng

Năng lượng điện trường $W_{đ}$ và năng lượng từ trường W_t biến thiên tuần hoàn với:

- Tần số góc: $\omega' = 2\omega$

- Tần số: $f' = 2f$
- Chu kỳ: $T' = T/2$

Trong một chu kỳ dao động (T), có 4 lần năng lượng điện trường bằng năng lượng từ trường.

IV. Tương tự giữa dao động điện và dao động cơ

Dao động điện từ trong mạch LC có sự tương tự với dao động cơ của con lắc lò xo. Bảng dưới đây thể hiện sự tương tự đó:

Đại lượng dao động cơ (Con lắc lò xo)	Đại lượng dao động điện (Mạch LC)
Li độ (x)	Điện tích (q)
Vận tốc ($v = x'$)	Cường độ dòng điện ($i = q'$)
Khối lượng (m) - Đại lượng quán tính	Độ tự cảm (L) - Đại lượng quán tính
Độ cứng (k)	Nghịch đảo điện dung ($1/C$)
Động năng ($Wđ = \frac{1}{2}mv^2$)	Năng lượng từ trường ($Wt = \frac{1}{2}Li^2$)
Thế năng ($Wt = \frac{1}{2}kx^2$)	Năng lượng điện trường ($Wđ = \frac{1}{2}(1/C)q^2$)
Cơ năng ($W = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$)	Năng lượng điện từ ($W = \frac{1}{2}Li^2 + \frac{1}{2}q^2/C$)