

CHƯƠNG 11

HIỆN TƯỢNG CẢM ỨNG ĐIỆN TỪ

Trong chương trước ta đã biết rằng dòng điện tạo ra xung quanh nó một từ trường. Vậy ngược lại, từ trường có tạo ra dòng điện không?

Năm 1831, nhà vật lý học Faraday đã chứng tỏ, bản thân từ trường không tạo ra dòng điện nhưng sự biến đổi của từ trường (tổng quát hơn là biến đổi của từ thông) thì có thể tạo ra một dòng điện. Dòng điện đó được gọi là *dòng điện cảm ứng* và hiện tượng đó được gọi là *hiện tượng cảm ứng điện từ*.

Chương này sẽ xét chi tiết hiện tượng cảm ứng điện từ và các trường hợp riêng của hiện tượng này.

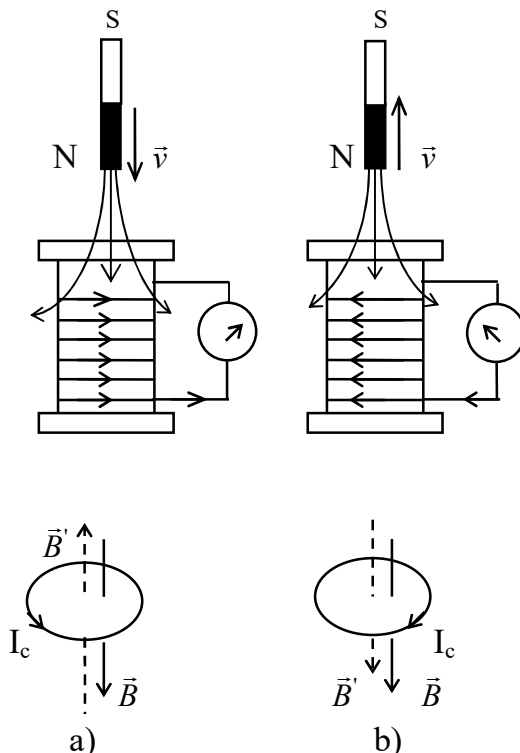
11.1. CÁC ĐỊNH LUẬT VỀ HIỆN TƯỢNG CẢM ỨNG ĐIỆN TỪ

11.1.1. Hiện tượng cảm ứng điện từ

a. Các thí nghiệm

Thí nghiệm gồm một ống dây nối tiếp với một điện kế thành một mạch kín (Hình 11-1). Phía trên ống dây ta đặt một thanh nam châm NS. Thí nghiệm chứng tỏ:

- Khi đưa cực N (cực bắc) của thanh nam châm lại gần ống dây thì kim điện kế bị lệch, chứng tỏ trong mạch đã xuất hiện một dòng điện (hình 11-1a). Dòng điện này được gọi là *dòng điện cảm ứng* I_c .



- Sau đó ta đưa thanh nam châm ra xa ống dây, dòng điện cảm ứng có chiều ngược lại (hình 11-1b).
- Di chuyển thanh nam châm càng nhanh, cường độ I_c của dòng điện cảm ứng càng lớn.
- Cho thanh nam châm dừng lại: Dòng điện cảm ứng biến mất.
- Nếu thay nam châm bằng một ống dây điện, hoặc giữ thanh nam châm đứng yên, cho ống dây dịch chuyển so với thanh nam châm, ta cũng thu được những kết quả tương tự như trên.

Hình 11-1

Thí nghiệm Faraday về cảm ứng điện từ

b. Kết luận

Qua những thí nghiệm đó, Faraday rút ra kết luận tổng quát sau đây:

a. Sự biến đổi của từ thông qua mạch kín là nguyên nhân sinh ra dòng điện cảm ứng trong mạch đó.

b. Dòng điện cảm ứng chỉ tồn tại trong thời gian từ thông gửi qua mạch thay đổi.

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 từ thông gửi qua mạch tăng hay giảm.

11.1.2. Định luật Lentz

Lenx (Lentz) đã tìm ra định luật tổng quát về chiều của dòng điện cảm ứng, gọi là định luật Lenx, phát biểu như sau:

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

Vận dụng định luật này, và qui tắc vắn nút chai, ta có thể tìm chiều của dòng điện cảm ứng trong các trường hợp hình 11-1a, và 11-1b.

Trong hình (11-1a), do từ thông qua vòng dây tăng, dòng cảm ứng I_c gây ra từ trường \vec{B}' ngược chiều với \vec{B} để chống lại sự tăng từ thông qua vòng dây.

Trong hình (11-1b), dòng cảm ứng I_c gây ra \vec{B}' cùng chiều với \vec{B} để chống lại sự giảm của từ thông qua vòng dây.

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

a. Suất điện động cảm ứng

Sự xuất hiện của dòng điện cảm ứng chứng tỏ trong mạch tồn tại một suất điện động. Suất điện động gây ra dòng điện cảm ứng được gọi là suất điện động cảm ứng.

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

Ta giả sử dịch chuyển một vòng dây dẫn kín (C) trong từ trường. Khi đó từ thông qua vòng dây thay đổi. Giả sử trong thời gian dt từ thông qua vòng dây thay đổi một lượng $d\phi_m$ và trong vòng dây xuất hiện dòng điện cảm ứng cường độ I_c . Công của từ lực tác dụng lên dòng điện cảm ứng trong quá trình đó là:

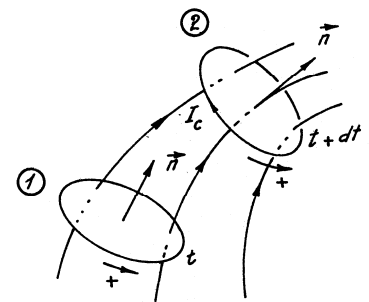
$$dA = I_c \cdot d\phi_m$$

Ở đây sự dịch chuyển của vòng dây là nguyên nhân gây ra dòng cảm ứng, do đó công của từ lực tác dụng lên dòng cảm ứng là công cản. Vì vậy, để dịch chuyển vòng dây, cần phải có ngoại lực thực hiện một công dA' có trị số bằng nhưng ngược dấu với công cản đó:

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

Theo định luật bảo toàn năng lượng, công dA' được chuyển thành năng lượng của dòng điện cảm ứng $\xi_c \cdot I_c \cdot dt$, trong đó ξ_c là suất điện động cảm ứng, nên ta có:

$$\xi_c \cdot I_c \cdot dt = -I_c \cdot d\phi_m$$



Hình 11-2
Vòng dây dẫn
dịch chuyển trong từ trường

Từ đó ta suy ra biểu thức của suất điện động cảm ứng:

$$\xi_c = - \frac{d\phi_m}{dt} \quad (11-1)$$

Đó là định luật cơ bản của hiện tượng cảm ứng điện từ, phát biểu như sau:

Suất điện động cảm ứng luôn luôn bằng về trị số nhưng ngược dấu với tốc độ biến thiên của từ thông gửi qua diện tích của mạch điện.

Dấu trừ trong công thức (11-1) thể hiện định luật Lentz.

c. Định nghĩa đơn vị từ thông Vê-be (Weber)

Trong hệ đơn vị SI đơn vị của ξ_c cũng là vôn (V). Còn đơn vị của từ thông là vêbe (Wb). Giả sử trong thời gian Δt , từ thông gửi qua diện tích của mạch điện giảm đều từ trị số ϕ_m về 0, theo (11-1) ta có

$$\xi_c = - \frac{d\phi_m}{dt} = - \frac{0 - \phi}{\Delta t} = \frac{\phi_m}{\Delta t}$$

Khi đó, ta suy ra:

$$\phi_m = \xi_c \cdot \Delta t$$

Nếu $\Delta t = 1$ giây, $\xi_c = 1$ vôn, thì $\phi_m = 1$ vôn. 1 giây = 1 vêbe (Wb).

Từ đó ta có định nghĩa vêbe như sau:

Vêbe là từ thông gây ra trên 1 vòng dây dẫn bao quanh nó một suất điện động cảm ứng 1 vôn khi từ thông đó giảm đều xuống không trong thời gian 1 giây.

Trong thực tế, hiện tượng cảm ứng điện từ được ứng dụng để tạo ra dòng điện xoay chiều, có ảnh hưởng rất quan trọng trong đời sống và khoa học kỹ thuật.

d. Dòng điện Fu-cô (Foucault)

Khi ta đặt một vật dẫn có kích thước lớn vào trong một từ trường biến đổi theo thời gian, trong thể tích của vật dẫn đó cũng xuất hiện dòng điện cảm ứng khép kín, gọi là *dòng điện xoáy hay dòng điện Foucault*. Vì vật dẫn có kích thước lớn nên điện trở của nó nhỏ, do đó cường độ của các dòng điện Foucault thường khá lớn. Từ trường biến đổi càng nhanh, dòng điện này càng lớn. Vì vậy, dòng điện Foucault có vai trò quan trọng trong kỹ thuật.

Trong các máy biến thế và động cơ điện..., lõi sắt của chúng thường chịu tác dụng của từ trường biến đổi, làm xuất hiện trong chúng các dòng điện Foucault. Các dòng điện này làm cho máy mau bị nóng lên, một phần năng lượng bị hao phí vô ích, hiệu suất của máy bị giảm, tuổi thọ của máy giảm nhanh.

Để giảm tác hại này, người ta không dùng cả khối sắt lớn mà dùng nhiều lá sắt mỏng sơn cách điện ghép lại với nhau sao cho các lá sắt cắt song song với các đường sức từ, tức là vuông góc với các dòng điện xoáy. Nhờ vậy, dòng điện xoáy chỉ chạy được trong từng lá sắt mỏng, cường độ dòng điện xoáy giảm nhiều so với dòng điện xoáy trong khối sắt lớn. Nhờ đó giảm đáng kể năng lượng hao phí vô ích, tăng hiệu suất và tuổi thọ của máy.

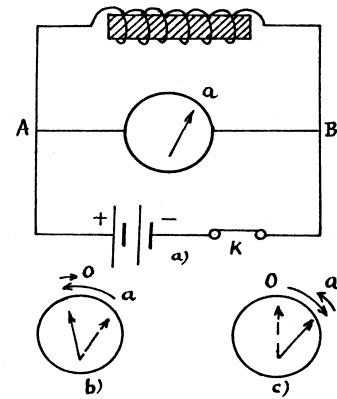
Dòng điện xoáy cũng có những ứng dụng có ích như dùng trong lò điện cảm ứng để nấu chảy kim loại, dùng để rút ngắn thời gian dao động của kim trong các máy đo v.v...

11.2. HIỆN TƯỢNG TỰ CẢM

11.2.1. Hiện tượng tự cảm

Xét một mạch điện như hình vẽ (H.11-3), gồm một ống dây có lõi sắt và một điện kế mắc song song với nó, cả hai lại mắc nối tiếp với một nguồn điện một chiều và một ngắt điện K.

Giả sử ban đầu mạch điện đã đóng kín, kim của điện kế nằm ở một vị trí "a" nào đó. Nếu ngắt mạch điện, ta thấy kim điện kế lệch về quá số không rồi mới quay trở lại số không đó (h.11-3b). Nếu đóng mạch điện, ta thấy kim điện kế vượt lên quá vị trí a lúc này, rồi mới quay trở lại vị trí a đó (Hình 11-3c).



Hình 11-3
Thí nghiệm về
hiện tượng tự cảm

Hiện tượng đó được giải thích như sau:

Khi ngắt mạch, nguồn điện ngừng cung cấp năng lượng cho mạch. Vì vậy, dòng điện do nguồn cung cấp giảm ngay về không. Nhưng sự giảm này lại gây ra sự giảm từ thông qua cuộn dây. Kết quả là trong cuộn dây xuất hiện một dòng điện cảm ứng cùng chiều với dòng điện ban đầu để chống lại sự giảm của dòng điện này. Vì khoá K ngắt, dòng điện cảm ứng không thể đi qua K, nó chạy qua điện kế theo chiều từ B sang A (ngược chiều với dòng điện lúc đầu). Do đó kim điện kế quay ngược phía lúc đầu, sau đó khi dòng cảm ứng tắt, kim điện kế mới về số không.

Còn khi K đóng mạch, dòng điện qua điện kế và cuộn dây đều tăng lên từ giá trị không, làm cho từ thông qua ống dây tăng và do đó làm gây ra trong ống dây một dòng điện cảm ứng ngược chiều với nó. Một phần của dòng điện cảm ứng này rẽ qua điện kế theo chiều từ A sang B, để cộng thêm với dòng điện do nguồn gây ra, do đó làm cho kim điện kế vượt quá vị trí a. Sau đó, khi dòng cảm ứng tắt, dòng qua điện kế bằng dòng do nguồn cấp, nên kim điện kế trở về vị trí a.

Thí nghiệm này chứng tỏ: Nếu cường độ dòng điện trong mạch thay đổi, thì trong mạch cũng xuất hiện một dòng điện cảm ứng. Vì dòng điện này do sự cảm ứng của chính dòng điện trong mạch gây ra nên nó được gọi là *dòng điện tự cảm*, còn hiện tượng đó được gọi là *hiện tượng tự cảm*.

Nói chung, khi dòng điện trong mạch thay đổi thì trong mạch xuất hiện *dòng điện tự cảm* (tức là hiện tượng tự cảm).

Hiện tượng tự cảm là một trường hợp riêng của hiện tượng cảm ứng điện từ.

11.2.2. Suất điện động tự cảm. Hệ số tự cảm

a. Định nghĩa

Suất điện động gây ra dòng điện tự cảm được gọi là suất điện động tự cảm.

Vì hiện tượng tự cảm là trường hợp riêng của hiện tượng cảm ứng điện từ, nên nó cũng có biểu thức dạng (11-1): $\xi_c = -\frac{d\phi_m}{dt}$

b. Biểu thức suất điện động tự cảm

Vì cảm ứng từ B gây ra bởi dòng điện chạy trong mạch điện tỉ lệ với cường độ của dòng điện, còn từ thông gửi qua mạch điện kín thì tỉ lệ với cảm ứng từ, do đó từ thông ϕ_m qua mạch kín tỉ lệ thuận với cường độ dòng điện I đó và có thể viết:

$$\phi_m = L.I \quad (11-2)$$

trong đó L là một hệ số tỉ lệ phụ thuộc hình dạng, kích thước của mạch điện và vào tính chất của môi trường bao quanh mạch điện. L được gọi là *hệ số tự cảm* của mạch điện.

Thay ϕ_m ở (11-2) vào biểu thức của suất điện động cảm ứng nói chung ta được biểu thức của suất điện động tự cảm:

$$\xi_{tc} = - \frac{d(L.I)}{dt} \quad (11-3)$$

Bình thường, mạch điện đứng yên, không thay đổi dạng và độ từ thẩm của môi trường không phụ thuộc vào dòng điện, nên $L = \text{const}$, và do đó:

$$\xi_{tc} = - L \frac{dI}{dt} \quad (11-4)$$

Cũng như suất điện động cảm ứng nói chung, dấu trừ ở suất điện động tự cảm thể hiện định luật Lentz.

c. Hệ số tự cảm

Từ công thức (11-2) ta suy công thức định nghĩa của hệ số tự cảm:

$$L = \frac{\phi_m}{I} \quad (11-5)$$

Nếu cho $I = 1A$, thì $L = \phi_m$. Từ đó ta có định nghĩa:

Hệ số tự cảm của một mạch điện là đại lượng vật lý về trị số bằng từ thông do chính dòng điện ở trong mạch gửi qua diện tích của mạch khi dòng điện trong mạch có cường độ bằng một đơn vị.

Từ (11-4), nếu L càng lớn, ξ_{tc} sẽ càng mạnh, mạch điện có tác dụng chống lại sự biến đổi của dòng điện trong mạch càng nhiều, nói cách khác, "quán tính" của mạch điện càng lớn. Vậy, *hệ số tự cảm của một mạch điện là số đo mức quán tính của mạch đối với sự biến đổi của dòng điện chạy trong mạch đó.*

Trong hệ đơn vị SI, đơn vị của hệ số tự cảm là Henry, ký hiệu là H . Theo (11-2), ta có:

$$L = \frac{\phi_m}{I},$$

$$\text{do đó ta có } 1 H = \frac{1.Wb}{1A} = 1 \frac{Wb}{A}.$$

Từ đó ta có định nghĩa: *Henry là hệ số tự cảm của một mạch kín khi dòng điện 1 ampe chạy qua thì sinh ra trong chân không từ thông 1Wb qua mạch đó.*

Trong kỹ thuật, người ta còn dùng các đơn vị nhỏ hơn Henry là mili Henry (mH) và micro Henry (μH):

$$1mH = 10^{-3} H, \text{ và } 1\mu H = 10^{-6} H$$

d. Hệ số tự cảm của ống dây điện thẳng dài vô hạn

Khi có dòng điện cường độ I chạy trong các vòng dây dẫn, mọi điểm bên trong ống dây có véc tơ cảm ứng từ bằng nhau và bằng:

$$B = \mu_0 \mu n_0 I = \mu_0 \mu \frac{n}{l} I,$$

trong đó $n_0 = n/l$ là số vòng dây chứa trên một đơn vị dài của ống dây. Gọi S là diện tích của một vòng dây. Từ thông gửi qua ống dây là:

$$\phi_m = nBS = \mu_0 \mu \frac{n^2 S}{l} I$$

Vậy hệ số tự cảm của ống dây là:

$$L = \frac{\phi_m}{I} = \mu_0 \mu \frac{n^2 S}{l} \quad (11-6)$$

Hiện tượng tự cảm thường xuất hiện khi ngắt các công tắc điện, đặc biệt là khi ngắt các cầu dao điện. Khi đó ta thấy có tia lửa điện xuất hiện ở các cầu dao điện. Đó là do khi ngắt mạch điện, dòng điện giảm đột ngột về giá trị không, do đó trong các cuộn dây của máy điện xuất hiện dòng điện tự cảm khá lớn. Dòng điện này phóng qua lớp không khí giữa hai cực của cầu dao điện gây nên tia lửa điện. Hiện tượng này làm hỏng cầu dao và có thể gây nguy hiểm cho hệ thống điện, do đó người ta đặt cầu dao trong dầu hoặc dùng khí phụt mạnh... để dập tắt các tia này.

11.2.3. Hiệu ứng bề mặt (skin-effect)

Hiện tượng tự cảm cũng xảy ra ngay trong lòng một dây dẫn có dòng điện biến đổi theo thời gian. Sau đây ta xét hiện tượng này.

Giả sử dòng điện đi từ dưới lên và đang tăng (hình 11-4), nó gây ra trong lòng dây dẫn một từ trường có đường cảm ứng từ như hình vẽ 11-4a (đường có phần đứt nét).

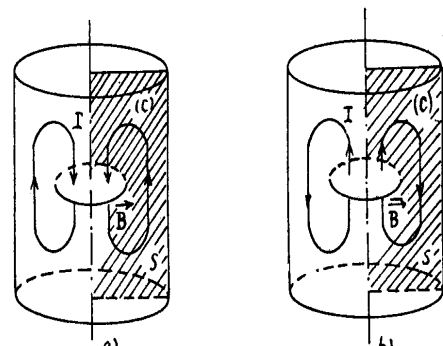
Từ trường này gửi qua các tiết diện chứa trục đối xứng của dây (hình chữ nhật gạch chéo) một từ thông đang tăng. Vì vậy trong các tiết diện đó xuất hiện dòng điện tự cảm khép kín có chiều tuân theo định luật Lentz (đường liền nét có mũi tên). Ta nhận thấy, ở gần trục dây dẫn, dòng điện tự cảm ngược chiều với dòng điện biến thiên; còn ở gần bề mặt dây dẫn, dòng tự cảm cùng chiều với dòng điện biến thiên trong dây dẫn.

Như vậy, khi dòng điện trong dây dẫn tăng, dòng tự cảm góp phần làm cho dòng điện ở gần trục dây dẫn tăng chậm lại nhưng làm cho dòng điện ở gần bề mặt dây dẫn tăng nhanh hơn.

Nói cách khác, khi đó dòng tự cảm chống lại sự tăng của dòng điện ở gần trục dây dẫn và tăng cường sự tăng của dòng điện ở bề mặt dây dẫn.

Khi dòng điện trong dây dẫn giảm, dòng tự cảm có chiều ngược lại (hình 11-4b). Nó ngược với chiều dòng điện biến thiên ở gần bề mặt dây dẫn, do đó làm cho phần dòng điện này giảm nhanh hơn; trái lại, nó cùng chiều với phần dòng điện biến thiên ở gần trục của dây dẫn, do đó làm cho phần dòng điện này giảm ít hơn.

Tóm lại, khi tăng cũng như khi giảm, dòng điện biến thiên trong dây dẫn gây ra dòng tự cảm có tác



Hình 11-4: Hiệu ứng bề mặt

- a) Khi dòng điện I tăng
- b) Khi dòng điện I giảm

dùng chống lại sự biến thiên của phần dòng điện ở gần trục của dây dẫn, nhưng tăng cường phần dòng điện ở gần bề mặt của dây dẫn. Tần số dòng điện càng cao (dòng điện biến đổi càng nhanh), tác dụng của dòng tự cảm trong dây càng mạnh, phần dòng điện chạy trong ruột của dây dẫn càng giảm.

Khi tần số của dòng điện khá cao, phần dòng điện chạy trong ruột của dây dẫn hầu như bị triệt tiêu, dòng điện cao tần chỉ chạy ở bề mặt rất mỏng của dây dẫn. Hiện tượng này được gọi là *hiệu ứng bề mặt* (skin-effect).

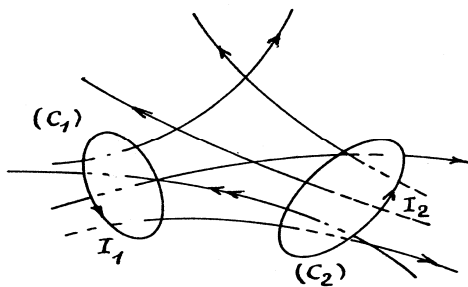
Lý thuyết và thực nghiệm chứng tỏ: với dòng điện có tần số $f = 1000\text{Hz}$, dòng điện chỉ chạy ở lớp bề mặt dày 2mm, còn khi $f = 100.000\text{Hz}$, dòng điện chỉ chạy ở lớp bề mặt 0,2mm. Vì lý do đó, khi dùng dòng điện cao tần, người ta làm các dây dẫn rỗng để tiết kiệm kim loại. Để tăng độ dẫn điện của bề mặt, người ta mạ một lớp kim loại dẫn điện tốt như bạc, vàng tùy theo mục đích sử dụng. Trong cơ khí, người ta ứng dụng hiệu ứng bề mặt để tôi cứng bề mặt kim loại các chi tiết máy (như trục bánh xe, bánh răng khía v.v..) nhưng vẫn giữ độ dẻo cần thiết ở bên trong.

11.3. HIỆN TƯỢNG HỖ CẢM

11.3.1. Hiện tượng

Giả sử có hai mạch điện kín (C_1) và (C_2) đặt cạnh nhau, trong đó có các dòng điện I_1 , I_2 hình (11-5).

Nếu dòng điện I_1 chạy trong mạch C_1 thay đổi thì từ thông do dòng điện này gửi qua mạch C_2 sẽ biến đổi, gây ra trong C_2 đó một suất điện động cảm ứng. Dòng cảm ứng này làm cho dòng điện trong C_2 biến đổi, và từ thông do nó gửi qua C_1 sẽ biến đổi, làm xuất hiện suất điện động cảm ứng trong C_1 .



Hình 11-5

Hiện tượng hồ cảm giữa hai mạch điện

Kết quả là, trong cả hai mạch sẽ xuất hiện dòng điện cảm ứng. Người ta gọi hiện tượng này là *hiện tượng hồ cảm*, và các dòng điện cảm ứng đó được gọi là *dòng điện hồ cảm*.

11.3.2. Suất điện động hồ cảm, hệ số hồ cảm

a. Định nghĩa

Suất điện động gây ra dòng điện hồ cảm được gọi là suất điện động hồ cảm.

Gọi ϕ_{m12} là từ thông do dòng điện I_1 gây ra và gửi qua diện tích của mạch (C_2), ϕ_{m21} là từ thông do dòng điện I_2 sinh ra và gửi qua diện tích của mạch (C_1).

Dễ dàng nhận thấy rằng từ thông qua mạch (C_1) tỉ lệ với I_2 và từ thông qua mạch (C_2) tỉ lệ với mạch dòng I_1 :

$$\phi_{m12} = M_{12} \cdot I_1 \quad (11-7)$$

$$\phi_{m21} = M_{21} \cdot I_2 \quad (11-8)$$

với M_{12} và M_{21} là các hệ số tỉ lệ. M_{12} gọi là hệ số hồ cảm của hai mạch (C_1) và (C_2), còn M_{21} là hệ số hồ cảm của (C_2) và (C_1).

Hai hệ số hồ cảm M_{12} và M_{21} đều phụ thuộc hình dạng, kích thước, vị trí tương đối của hai mạch, và phụ thuộc vào tính chất của môi trường chứa hai mạch.

Người ta đã chứng minh được rằng:

$$M_{12} = M_{21} = M \quad (11-9)$$

Do đó, suất điện động xuất hiện trong mạch (C_2) là:

$$\xi_{hc2} = - \frac{d\phi_{m12}}{dt} = - M \frac{dI_1}{dt} \quad (11-10)$$

và trong (C_1) là:

$$\xi_{hc1} = - \frac{d\phi_{m21}}{dt} = - M \frac{dI_2}{dt} \quad (11-11)$$

So sánh (11-10) và (11-11) với (1-4) ta thấy hệ số hồ cảm cũng có cùng đơn vị với hệ số tự cảm L và do đó cũng được tính bằng đơn vị *Henry* (H).

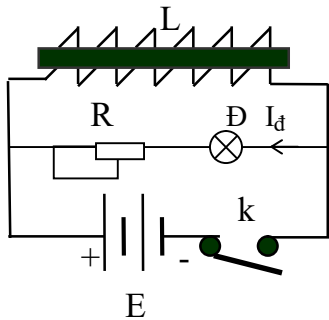
Hiện tượng hồ cảm là trường hợp riêng của hiện tượng cảm ứng điện từ, nó được ứng dụng để chế tạo máy biến thế, một dụng cụ rất quan trọng kỹ thuật và đời sống.

11.4. NĂNG LƯỢNG TỪ TRƯỜNG

11.4.1. Năng lượng từ trường của ống dây điện

Cho một mạch điện như ở hình 11-6, gồm đèn Đ, ống dây có hệ số tự cảm L và biến trở R mắc vào nguồn điện E . Giả sử lúc đầu mạch được đóng kín, điều chỉnh R để đèn sáng bình thường. Cuộn dây có điện trở nhỏ nên $I_L > I_d$. Thí nghiệm cho thấy nếu ta ngắt k , đèn Đ không tắt ngay mà bùng sáng lên rồi từ từ tắt.

Hiện tượng này được giải thích như sau: Khi còn đóng k , đèn Đ sáng nhờ năng lượng của nguồn cung cấp. Khi ngắt khoá k , đèn Đ còn sáng thêm một lúc nhờ dòng tự cảm từ cuộn dây phóng xuống. Lúc này suất điện động tự cảm cung cấp năng lượng cho đèn. Đồng thời lúc đó từ trường trong cuộn dây L giảm. Vậy có thể nói năng lượng lưu giữ trong từ trường của cuộn dây trước khi ngắt k đã biến thành điện năng qua đèn sau khi ngắt k . Nói cách khác, từ trường trong cuộn dây có một năng lượng. Ta gọi là **năng lượng của từ trường**.



Hình 11-6

Sự xuất hiện năng lượng từ trường trong cuộn dây

Sau đây ta tính năng lượng đó:

Giả sử trước khi đóng khoá k , dòng qua cuộn dây L là I , khi ngắt k , dòng qua L giảm. Tại thời điểm t suất điện động tự cảm là $E_{tc} = -L \frac{dI}{dt}$.

Năng lượng do suất điện động tự cảm cung cấp cho đèn trong thời gian dt là:

$$dW = E_{tc} I \cdot dt = -L \cdot I \cdot dI$$

Năng lượng do suất điện động tự cảm cung cấp cho đèn từ lúc ngắt k (có trị số là I) đến lúc $I=0$ là:

$$W_m = - \int_I^0 L I dI = \frac{1}{2} L I^2 \quad (11-12)$$

Như vậy khi đóng mạch, dòng điện trong cuộn dây tăng, đồng thời từ trường trong nó cũng tăng, cho đến khi cường độ dòng điện bằng I thì từ trường trong cuộn dây có năng lượng bằng $W_m = \frac{1}{2} LI^2$. Khi ngắt k, năng lượng này biến thành điện năng của dòng tự cảm đi qua đèn. Người ta chứng minh rằng, biểu thức (11-12) đúng cho cuộn dây bất kỳ.

11.4.2. Mật độ năng lượng từ trường

Lý thuyết và thực nghiệm chứng tỏ rằng: *năng lượng từ trường được phân bố trong khoảng không gian của từ trường*.

Như ta đã nói ở trên, từ trường trong ống dây thẳng và dài là từ trường đều và có thể coi là chỉ tồn tại bên trong thể tích của ống dây. Như vậy, nếu ống dây dài l , tiết diện S , có thể tích $V = lS$, thì *năng lượng từ trường trong một đơn vị thể tích, tức là mật độ năng lượng từ trường* bên trong ống dây là:

$$\omega_m = \frac{W_m}{V} = \frac{\frac{1}{2} LI^2}{V} = \frac{\frac{1}{2} (\mu_0 \mu \cdot \frac{n^2 S}{l}) I^2}{lS} = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \mu \frac{n^2}{l^2} I^2$$

Ta đã biết cảm ứng từ B trong ống dây là: $B = \mu_0 \mu \cdot \frac{n}{l} I$. Như vậy, mật độ năng lượng từ trường bằng:

$$\omega_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu \mu_0} \quad (11-13)$$

Người ta chứng minh được rằng công thức (11-13) đúng đối với từ trường bất kỳ. Vì vậy, để tính năng lượng của một từ trường bất kỳ, ta chia không gian của từ trường đó thành những phần thể tích vô cùng nhỏ dV , sao cho trong thể tích ấy ta có thể coi cảm ứng từ \vec{B} không đổi. Như vậy, năng lượng từ trường trong thể tích dV là:

$$dW_m = \omega_m dV = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu \mu_0} dV.$$

Do đó năng lượng của một từ trường bất kỳ chiếm thể tích V , bằng:

$$W_m = \int_V dW_m = \frac{1}{2} \int_V \frac{\vec{B}^2}{\mu \mu_0} dV = \frac{1}{2} \int_V \vec{B} \vec{H} dV = \frac{1}{2} \int_V \mu \mu_0 \vec{H}^2 dV \quad (11-14)$$

trong đó tích phân được thực hiện cho toàn bộ không gian trong thể tích V của từ trường, $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu}$, $\vec{B} \vec{B} = \vec{B}^2 = B^2$, $\vec{H} \vec{H} = \vec{H}^2 = H^2$.

HƯỚNG DẪN HỌC CHƯƠNG 11

I. MỤC ĐÍCH, YÊU CẦU

Nghiên cứu xong chương này, yêu cầu sinh viên:

1. Hiểu và giải thích được các thí nghiệm về hiện tượng cảm ứng điện từ.
2. Thiết lập được biểu thức định luật cơ bản về hiện tượng cảm ứng điện từ. Nắm và vận dụng được định luật Lentz để xác định chiều của dòng điện cảm ứng.
3. Vận dụng được các định luật trên để giải thích các hiện tượng cảm ứng điện từ, hiện tượng tự cảm, hồ cảm trong thực tế và giải các bài tập.
4. Nắm được khái niệm và thiết lập công thức tính năng lượng của từ trường.

II. TÓM TẮT NỘI DUNG

1. Khi từ thông gửi qua một mạch điện kín biến đổi thì trong mạch sẽ xuất hiện một dòng điện cảm ứng. Chiều của dòng điện này được xác định theo định luật Lentz: “Dòng cảm ứng luôn có chiều sao cho từ trường của nó luôn chống lại những nguyên nhân đã sinh ra nó”. Suất điện động cảm ứng xuất hiện trong mạch được xác định bởi biểu thức (11-1):

$$\xi_c = - \frac{d\phi_m}{dt}. \text{ Dấu trừ “-” thể hiện định luật Lentz.}$$

Một khối vật dẫn đặt trong từ trường biến thiên, trong vật dẫn đó sẽ xuất hiện dòng điện cảm ứng. Dòng điện này được gọi là dòng Foucault, hay dòng điện xoáy. Dòng điện xoáy có vai trò quan trọng trong kỹ thuật.

2. Nếu nguyên nhân của sự biến thiên từ thông trong mạch lại do sự biến thiên dòng điện trong bản thân mạch gây ra thì dòng điện cảm ứng lúc đó được gọi là dòng *tự cảm*.

Suất điện động gây ra dòng tự cảm được gọi là *suất điện động tự cảm*, nó được xác định bởi biểu thức (11-1):

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

trong đó từ thông ϕ_m được xác định bởi (11-2) $\phi_m = L.I$, L được gọi là *hệ số tự cảm* của mạch điện, nó phụ thuộc vào hình dạng, kích thước của mạch điện, vào tính chất của môi trường bao quanh mạch. Do đó:

$$\xi_{tc} = - \frac{d(L.I)}{dt}$$

Trong trường hợp $L = \text{const}$, ta có:

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

Hiện tượng tự cảm có nhiều ứng dụng trong kỹ thuật, dùng để tôi bề mặt kim loại; Khi có dòng điện cao tần chạy trong một dây dẫn, dòng điện gần như chỉ tập trung ở bề mặt dây dẫn, do đó để tiết kiệm, người ta dùng dây dẫn rỗng.

3. Với hai vòng dây dẫn đặt gần nhau, nếu dòng điện trong chúng biến thiên theo thời gian thì giữa chúng có sự cảm ứng lẫn nhau, đó là hiện tượng hồ cảm. Suất điện động hồ cảm xuất hiện trong các mạch đó được xác định theo (11-10) và (11-11):

trong mạch (C_2) là:

$$\xi_{hc2} = - \frac{d\phi_{m12}}{dt} = - M \frac{dI_1}{dt}$$

và trong (C₁) là:

$$\xi_{hcl} = - \frac{d\phi_{m21}}{dt} = - M \frac{dI_2}{dt}$$

trong đó, M được gọi là hệ số hỗ cảm giữa hai mạch, có cùng đơn vị với hệ số tự cảm L và do đó cũng được tính bằng đơn vị Henry (H).

4. Cuộn dây điện thẳng dài có dòng điện I có năng lượng (11-12): $W_m = \frac{1}{2} LI^2$. Năng lượng này tích trữ bên trong từ trường của cuộn dây. Đó cũng chính là năng lượng của từ trường bên trong ống dây. Nếu liên hệ với các đại lượng đặc trưng cho từ trường, ta được mật độ năng lượng từ trường bên trong ống dây thẳng dài:

$$\omega_m = \frac{W_m}{V} = \frac{\frac{1}{2} LI^2}{V} = \frac{\frac{1}{2} (\mu_0 \mu \cdot \frac{n^2 S}{l}) I^2}{lS} = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \mu \frac{n^2}{l^2} I^2$$

Cảm ứng từ B trong ống dây là: $B = \mu_0 \mu \cdot \frac{n}{l} I$, ta suy ra biểu thức mật độ năng lượng từ trường

$$\omega_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu \mu_0} \quad (11-13)$$

Biểu thức (12-13) đúng đối với từ trường bất kỳ, từ đó ta suy ra năng lượng của từ trường bất kỳ có thể tích V :

$$W_m = \int_V dW_m = \frac{1}{2} \int_V \frac{\vec{B}^2}{\mu \mu_0} dV = \frac{1}{2} \int_V \vec{B} \vec{H} dV = \frac{1}{2} \int_V \mu \mu_0 \vec{H}^2 dV \quad (11-14)$$

III. CÂU HỎI ÔN TẬP

1. Mô tả thí nghiệm về hiện tượng cảm ứng điện từ.
2. Phát biểu định luật Lentz, nêu một ví dụ minh họa định luật này.
3. Thiết lập biểu thức cơ bản của hiện tượng cảm ứng điện từ. $\xi_c = - \frac{d\phi_m}{dt}$
4. Trình bày nguyên tắc tạo ra dòng điện xoay chiều. Thiết lập biểu thức dòng điện xoay chiều

$$i = I_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

5. Nêu hiện tượng tự cảm. Nêu một sơ đồ mạch điện để minh họa cho hiện tượng này.
6. Thành lập biểu thức suất điện động tự cảm. Viết biểu thức hệ số tự cảm của cuộn dây. Có thể thay đổi hệ số tự cảm bằng cách nào?
7. Trình bày hiện tượng hỗ cảm giữa hai mạch điện. Viết công thức suất điện động hỗ cảm giữa hai mạch điện.
8. Thiết lập biểu thức năng lượng từ trường trong ống dây, từ đó thiết lập biểu thức năng lượng của từ trường bất kỳ.

IV. BÀI TẬP

1. Một cuộn dây gồm 100 vòng dây kim loại quay đều trong một từ trường đều, vector cảm ứng từ \vec{B} có giá trị bằng 0,1T. Cuộn dây quay với vận tốc 5 vòng/s. Tiết diện ngang của cuộn dây là 100 cm^2 . Trục quay vuông góc với trục của cuộn dây và với phương của từ trường. Tìm giá trị cực đại của suất điện động cảm ứng ε_c xuất hiện trong cuộn dây khi nó quay trong từ trường.

Đáp số: $\varepsilon_{\max} = NBS.2\pi.n = 3,14V$

2. Trong một từ trường đều có cảm ứng từ $B = 0,4T$, người ta đặt một ống dây gồm $N = 300$ vòng. Điện trở của ống dây $R = 40 \Omega$, diện tích tiết diện ngang của vòng dây $S = 16 \text{ cm}^2$. Ống dây được đặt sao cho trục của nó lập một góc $\alpha = 60^\circ$ so với phương của từ trường. Tìm điện tích q chạy qua ống dây khi từ trường giảm về không.

Đáp số: $q = NBS \cos \alpha / R = 2,4.10^{-3}C$

3. Trong một từ trường đều có cảm ứng từ B , có một thanh kim loại có độ dài l quay với tần số n quanh một trục thẳng đứng, trục quay song song với từ trường \vec{B} . Một đầu đi qua trục. Tìm suất điện động cảm ứng xuất hiện tại đầu thanh.

Đáp số: $\varepsilon = -\frac{B.\pi.l^2.n.dt}{dt} = -B.\pi.l^2.n$

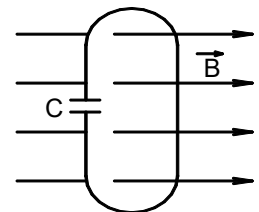
4. Một máy bay bay theo phương nằm ngang với vận tốc 900 km/h. Tìm suất điện động cảm ứng xuất hiện trên hai đầu cánh máy bay, nếu thành phần thẳng đứng của vector cảm ứng từ \vec{B} Trái Đất bằng $0,5.10^{-4} T$. Cho biết khoảng cách giữa hai đầu cánh $l = 12,5m$.

Đáp số: $|\varepsilon| = \frac{d\varphi}{dt} = l.v.B = 0,156 V$

5. Cũng bài toán trên, nhưng xét khi máy bay bay với vận tốc 950 km/s, khoảng cách giữa hai đầu cánh bằng 12,5m. Người ta đo được suất điện động cảm ứng xuất hiện ở hai đầu cánh $\varepsilon = 165mV$. Tìm thành phần thẳng đứng của cảm ứng từ trái đất.

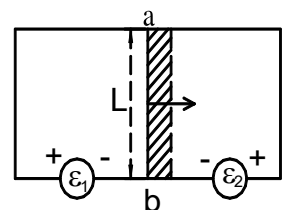
Đáp số: $B = 10^{-5} T$.

6. Một vòng dây dẫn có diện tích $S = 10^2 \text{ cm}^2$ được cắt tại một điểm nào đó và tại điểm cắt người ta mắc vào một tụ điện có điện dung $C = 10 \mu F$. Vòng dây được đặt trong một từ trường đều có các đường sức vuông góc với mặt phẳng của vòng dây. Cảm ứng từ B biến thiên đều theo thời gian với tốc độ $5.10^{-3} T/s$. Xác định điện tích của tụ điện.



Đáp số: $|q| = C.\varepsilon = -C.\frac{S.dB}{dt} = 10.10^{-6}.10^{-2}.5.10^{-3} = 5.10^{-10} C$

7. Một khung dây dẫn hình chữ nhật có cạnh ngắn là L được đặt trong một từ trường đều có cường độ từ trường H . Từ trường H vuông góc với mặt khung và hướng ra ngoài hình vẽ. Một thanh kim loại ab trượt trên khung, luôn luôn song song với cạnh L , với vận tốc v . Điện trở của thanh là R . Bỏ qua điện trở của khung. Xác định cường độ dòng điện xuất hiện trên ab .



Đáp số: $i = \frac{|\varepsilon_1|}{R} = \frac{|\varepsilon_2|}{R} = \frac{1}{R} \mu_o . H . L . \frac{dx}{dt} = \frac{1}{R} \mu_o . H . L . v \text{ (A)}$

8. Một thanh dây dẫn dài $l = 10\text{cm}$ chuyển động với vận tốc $v = 15 \text{ m/s}$ trong một từ trường đều có cảm ứng từ $B = 0,1\text{T}$. Tìm suất điện động xuất hiện trong thanh dẫn, biết rằng thanh luôn luôn vuông góc với đường sức từ trường và phương dịch chuyển.

Đáp số: $|\varepsilon| = \frac{d\phi}{dt} = B.l.\frac{dx}{dt} = B.v.l = 0,1.15.0,10 = 0,15(\text{V})$

9. Một đĩa bằng đồng bán kính $r = 5\text{cm}$ được đặt vuông góc với đường sức của từ trường đều có cảm ứng từ $B = 0,2 \text{ T}$. Đĩa quay với vận tốc góc $\omega = 3 \text{ rad/s}$. Các điểm a, b là những điểm tiếp xúc trượt để dòng điện có thể đi qua đĩa theo bán kính ab.

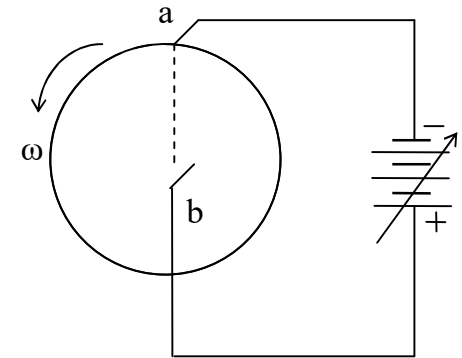
a. Tìm suất điện động cảm ứng xuất hiện trong mạch.

b. Tìm chiều của dòng điện cảm ứng nếu cảm ứng từ B vuông góc từ phía trước ra phía sau hình vẽ và đĩa quay ngược chiều kim đồng hồ.

Đáp số:

a) $\varepsilon = \left| -\frac{d\phi}{dt} \right| = \frac{B.r^2.\omega}{2} = \frac{0,2.25.10^{-4}.2\pi.3}{2} = 4,7\text{mV}$

b) Dòng điện chạy từ a đến b.



10. Một mạch điện tròn bán kính r được đặt trong một từ trường đều có cảm ứng từ B . Mặt phẳng của mạch điện vuông góc với từ trường. Điện trở mạch điện là R . Tìm điện lượng chạy trong mạch khi quay mạch một góc $\alpha = 60^\circ$.

Đáp số: $q = \frac{B\pi.r^2}{2R}$

11. Trong một từ trường đều có cảm ứng từ $0,05\text{T}$, người ta cho quay một thanh dẫn có độ dài $l = 1\text{m}$ với vận tốc góc không đổi bằng 20 rad/s . Trục quay đi qua một đầu thanh và song song với đường sức từ trường. Tìm suất điện động xuất hiện tại các đầu thanh.

Đáp số: $\varepsilon = B.\pi l^2 \frac{\omega}{2\pi} = \frac{Bl^2\omega}{2} = 0,5 \text{ (V)}$

12. Tìm hệ số tự cảm L của một cuộn dây gồm 400 vòng trên độ dài 20 cm . Tiết diện ngang của ống bằng 9 cm^2 . Tìm hệ số tự cảm L của cuộn dây này, nếu ta đưa một lõi sắt có $\mu = 400$ vào trong ống.

Đáp số: $L = 360 \text{ mH} = 0,36 \text{ H}$.

13. Một ống dây điện gồm N vòng dây đồng, tiết diện mỗi sợi dây bằng S_1 , điện trở suất ρ . Ống dây có độ dài bằng l và điện trở bằng R . Tìm hệ số tự cảm của ống dây.

Đáp số: $L = \mu_o \mu \frac{N^2}{l} S = \mu_o \mu \frac{N^2}{l} \pi r^2 = \mu_o \mu \frac{\pi.r^2.S_1^2}{l.4\pi^2\rho^2} = \mu_o \mu \frac{R^2 S_1^2}{4\pi.l.\rho^2}$

14. Tìm hệ số tự cảm của một cuộn dây có quấn 800 vòng dây. Độ dài của cuộn dây bằng 0,25m, đường kính vòng dây bằng 4cm. Cho một dòng điện bằng 1A chạy qua cuộn dây. Tìm từ thông Φ gửi qua mỗi tiết diện của cuộn dây. Tìm năng lượng từ trường trong ống dây.

Đáp số:
$$L = \mu_0 \frac{N^2 S}{l} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{800^2}{0,25} \cdot \frac{\pi \cdot 0,04^2}{4} \approx 4mH$$

$$\Phi = \frac{L \cdot i}{N} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{800} \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$$

$$W = \frac{L i^2}{2} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 1^2}{2} \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

15. Một khung dây điện phẳng kín hình vuông tạo bởi dây đồng có điện trở suất bằng $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$, tiết diện 1 mm^2 , đặt trong một từ trường biến thiên có cảm ứng từ $B = B_0 \sin \omega t$, trong đó $B_0 = 0,01 \text{ T}$. Chu kỳ biến thiên của cảm ứng từ là $T = 0,02 \text{ s}$. Diện tích của khung bằng $S = 25 \text{ cm}^2$. Mặt phẳng của khung vuông góc với đường sức từ trường. Tìm giá trị cực đại và sự phụ thuộc vào thời gian của:

- Từ thông Φ gửi qua khung.
- Suất điện động cảm ứng xuất hiện trong khung.
- Cường độ dòng điện chạy trong khung.

Đáp số:

a. Từ thông $\Phi = BS = B_0 S \sin \omega t = B_0 S \sin \frac{2\pi}{T} t = B_0 S \sin 100\pi t \text{ (Wb)}$

trong đó: $\Phi_{\max} = B_0 \cdot S = 0,01 \cdot 25 \cdot 10^{-4} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ Wb}$

- b. Suất điện động cảm ứng xuất hiện trong khung:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = B_0 S \cdot 100\pi \cos(100\pi t) \text{ (V)}$$

trong đó: $\varepsilon_{\max} = B_0 \cdot S \cdot 100\pi = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 314\pi = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ V}$

- c. Dòng điện i xuất hiện trong khung:

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_{\max} \cdot \cos(100\pi t)}{R}$$

trong đó: $I_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max}}{R}$, R là điện trở của khung: $R = \rho l / S_0$ với $l = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ là chu vi khung và S_0 là tiết diện dây đồng.

Thay điện trở suất của đồng bằng $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$ và $S_0 = 10^{-6} \text{ m}^2$, ta tìm được điện trở

khung dây $R = 34,4 \cdot 10^{-4} \Omega \Rightarrow I_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max}}{R} = 2,3 \text{ A}$

16. Một ống dây dẫn thẳng gồm $N = 500$ vòng đặt trong một từ trường sao cho trục ống dây song song với đường sức từ trường. Tìm suất điện động trung bình xuất hiện trong ống dây, cho biết cảm ứng từ B thay đổi từ 0 đến 2T trong thời gian $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ và đường kính ống dây $d = 10 \text{ cm}$.

Đáp số: $\varepsilon = N \left| \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} \right| = N \left| \frac{S \Delta B}{\Delta t} \right| = N \frac{\pi d^2}{4} \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| = 78,5(V)$

17. Trong một ống dây có hệ số tự cảm $L = 0,021 \text{ H}$ có một dòng điện biến thiên $i = i_0 \sin \omega t$, trong đó $i_0 = 5 \text{ A}$, tần số của dòng điện là $f = 50 \text{ Hz}$. Tìm suất điện động tự cảm xuất hiện trong cuộn dây.

Đáp số:

$$\varepsilon_{tc} = - \frac{L \cdot di}{dt} = -L i_0 \omega \cdot \cos \omega t = -0,021 \cdot 5 \cdot 2\pi \cdot 50 \cos \omega t = -33 \cos 100\pi t$$

trong đó: $\varepsilon_{tc \max} = 33V$.