

TRẦN VĂN THỊNH

THIẾT KẾ CUỘN DÂY VÀ BIẾN ÁP TRONG THIẾT BỊ ĐIỆN TỬ CÔNG SUẤT

(DÙNG CHO CÁC TRƯỜNG ĐÀO TẠO HỆ ĐẠI HỌC KỸ THUẬT ĐIỆN)



NHÀ XUẤT BẢN GIÁO DỤC VIỆT NAM

TRẦN VĂN THỊNH

THIẾT KẾ CUỘN DÂY VÀ BIẾN ÁP TRONG THIẾT BỊ ĐIỆN TỬ CÔNG SUẤT

(Dùng cho các trường đào tạo hệ Đại học kỹ thuật điện)

NHÀ XUẤT BẢN GIÁO DỤC VIỆT NAM

LỜI NÓI ĐẦU

Trong sự nghiệp công nghiệp hóa và hiện đại hóa đất nước, các thiết bị điều khiển ngày càng đóng một vai trò quan trọng. Muốn làm chủ được các quá trình công nghệ chúng ta cần thiết kế, chế tạo ra các thiết bị điều khiển. Trong các thiết bị điều khiển này, điện tử công suất có vai trò rất quan trọng. Việc nghiên cứu một cách tỷ mỉ về lĩnh vực điện tử công suất là cần thiết đối với sinh viên và cán bộ kỹ thuật điện.

Khi chế tạo các thiết bị điện tử công suất, tính toán phần điện tử trong chúng là không thể thiếu được. Tính toán các cuộn dây và biến áp trong các thiết bị này có nhiều đặc điểm khác với biến áp truyền thống như : tần số cao, điện áp và dòng điện không sin..., do đó cần có cách tiếp cận khác với các biến áp truyền thống. Tuy nhiên, loại tài liệu về thiết kế cuộn dây và biến áp trong các mạch điện tử công suất hiện nay đang rất thiếu trên thị trường sách kỹ thuật của ta.

Sách "Thiết kế cuộn dây và biến áp trong thiết bị điện tử công suất" trình bày cơ sở lý thuyết về vật liệu dùng để chế tạo, nguyên tắc thiết kế cuộn dây và biến áp trong thiết bị điện tử công suất. Để thuận tiện cho người đọc, sách có đưa nhiều ví dụ minh họa, trong phụ lục đưa nhiều bảng tra thông số các vật liệu chế tạo.

Nội dung cơ bản của sách có 4 chương:

Chương 1. Những vấn đề cơ bản

Chương 2. Tính toán biến áp

Chương 3. Tính toán cuộn cảm

Chương 4. Thiết kế một số thiết bị đặc biệt

Sách do tác giả thuộc bộ môn Thiết bị điện - Điện tử, Viện Điện, trường Đại học Bách khoa Hà Nội biên soạn được dùng làm tài liệu học tập cho sinh viên và học viên cao học ngành "Thiết bị điện - Điện tử", cũng có thể làm tài liệu tham khảo hữu ích cho các kỹ sư và các cán bộ kỹ thuật khi thiết kế, lắp đặt, sửa chữa, vận hành các thiết bị điều khiển. Hy vọng cuốn sách giúp cho bạn đọc tìm được lời giải cần thiết khi làm việc với các thiết bị điện được điều khiển tự động.

Tác giả bày tỏ lòng biết ơn đối với các thầy, cô giáo bộ môn Thiết bị điện - Điện tử, khoa Điện, trường Đại học Bách Khoa Hà Nội đã khích lệ, động viên tác giả trong quá trình biên soạn quyển sách này.

Do vấn đề được đề cập trong sách khá rộng, nên không tránh khỏi những khiếm khuyết. Tác giả chân thành cảm ơn và trân trọng các ý kiến phê bình đóng góp của bạn đọc để quyển sách được hoàn thiện hơn. Mọi ý kiến đóng góp xin gửi về: Bộ môn Thiết bị điện - Điện tử, Viện Điện, trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, hoặc Công ty Cổ phần sách Đại học & Dạy nghề - Nhà xuất bản Giáo dục Việt Nam, 25 Hàn Thuyên, Hà Nội.

TÁC GIẢ

Chương 1

NHỮNG VẤN ĐỀ CƠ BẢN

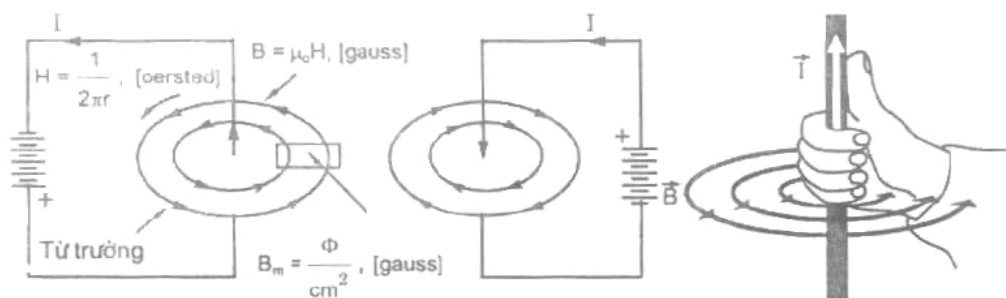
1.1. CƠ SỞ LÝ THUYẾT TỪ TÍNH

1.1.1. Các định luật cơ bản của lý thuyết từ tính

Lý thuyết điện từ được xây dựng trên cơ sở các phương trình Maxwell. Ngay từ những năm 1865 các nhà vật lý người Anh Faraday, Maxwell đã tiến hành các thí nghiệm và thiết lập nên các biểu thức toán học về lĩnh vực này. Các định luật Ampe, Faraday, Gauss, Lenz được coi là cơ sở của lý thuyết từ tính ...

1. Định luật Ampe và lực điện từ

Một dây dẫn dài có dòng điện I chạy qua, sinh ra từ trường tròn có cường độ từ trường H và từ cảm B xung quanh dây dẫn như trên hình 1.1. Chiều đường sức được xác định theo quy tắc bàn tay phải (đặt ngón cái bàn tay phải theo chiều dòng điện, chiều các ngón trở là chiều đường sức từ). Khi dòng điện một chiều chạy trong dây dẫn đổi chiều, đường sức từ cũng đổi chiều.



Hình 1.1. Từ trường

a) Do dòng điện sinh ra; b) Cách xác định chiều từ trường.

Cường độ từ trường được xác định theo định luật Ampe. Theo đó, tích phân vòng H bằng tổng dòng điện trong tiết diện:

$$\oint_l H \cdot dl = \int_S J \cdot dS \quad (1.1)$$

Trong đó: H – cường độ từ trường;

dl – độ dài phần tử l ;

J –mật độ dòng điện;

dS – diện tích bề mặt;

l- chiều dài chu vi đường tròn của đường viền tích phân;

S- diện tích bề mặt đường viền tích phân.

Với trường hợp cuộn dây N vòng:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = Ni \quad (1.2)$$

Quan hệ $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$ và Ni trong biểu thức (1.2) tương ứng với nguồn được gọi là sức từ động (magnetomotive force – MMF, thường ký hiệu F) có thứ nguyên (A.vòng).

Quan hệ giữa cường độ từ trường H với mật độ từ thông (hay từ cảm) B được xác định qua biểu thức:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \mu \cdot H \quad (1.3)$$

Trong đó: B – từ cảm;

μ – độ từ thẩm của vật liệu từ;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m – độ từ thẩm của không khí.

$\mu_r = \mu/\mu_0$ – độ từ thẩm tương đối của vật liệu từ (của vật liệu dẫn điện như đồng, nhôm $\mu_r = 1$). Đối với các vật liệu từ khác, các giá trị này có thể tra từ bảng 1.1.

Đối với vật liệu đồng nhất và đẳng hướng μ là đại lượng vô hướng. Nó là hằng số khi vật liệu tuyến tính và là hàm số khi vật liệu phi tuyến.

Từ thông Φ được xác định:

$$\Phi = \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.4)$$

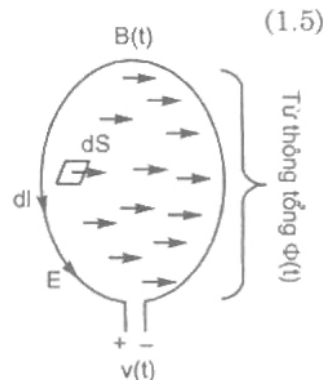
Nếu từ cảm B không đổi và vuông góc với bề mặt, thì từ thông được xác định:

$$\Phi = B \cdot S \quad (1.5)$$

2. Định luật Faraday và sức điện động

Định luật cảm ứng Faraday cho biết mối liên hệ giữa biến thiên từ thông trong diện tích mặt cắt của một vòng kín và điện trường cảm ứng dọc theo vòng đó.

Từ thông $\Phi(t)$ xuyên qua vòng dây thay đổi sinh ra trong vòng dây một sức điện động $e(t)$. Quan hệ giữa sức điện động này với từ thông được xác định bằng định luật Faraday.



Hình 1.2. Vòng dây có từ thông xuyên qua

$$e(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (1.6)$$

Nếu biểu diễn mật độ điện trường là E , khi đó định luật Faraday được viết:

$$\oint_l E \cdot dl = - \frac{d}{dt} \int_s B \cdot dS \quad (1.7)$$

Dạng tích phân:

$$\oint_s E \cdot ds = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1.8)$$

Với E là điện trường cảm ứng, ds là một phần tử vô cùng bé của vòng kín và $d\Phi_B/dt$ là biến thiên từ thông.

Trong trường hợp một cuộn cảm có N vòng, công thức trở thành:

$$E = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1.9)$$

với E là sức điện động cảm ứng và $\Delta\Phi/\Delta t$ là biến thiên của từ thông Φ trong khoảng thời gian Δt .

3. Định luật Lenz

Đồng thời với Michael Faraday, Lenz cũng nghiên cứu hiện tượng cảm ứng điện từ và đã tìm ra định luật tổng quát giúp ta xác định chiều của dòng điện cảm ứng, gọi là định luật Lenz. Nội dung định luật như sau: *Dòng điện cảm ứng phải có chiều sao cho từ trường do nó sinh ra có tác dụng chống lại nguyên nhân sinh ra nó.*

Điều này có nghĩa là khi từ thông qua mạch từ tăng lên, từ trường cảm ứng sinh ra có tác dụng chống lại sự tăng của từ thông: từ trường cảm ứng sẽ ngược chiều với từ trường ngoài. Nếu từ thông qua mạch giảm, từ trường cảm ứng (do dòng điện cảm ứng sinh ra nó) có tác dụng chống lại sự giảm của từ thông, lúc đó từ trường cảm ứng sẽ cùng chiều với từ trường ngoài.

4. Định luật Gauss

Trong vật lý và toán học, định luật Gauss là một ứng dụng của định lý Gauss cho các trường vectơ tuân theo luật bình phương nghịch đảo với khoảng cách.

Ví dụ, với trường vectơ cường độ điện trường hay lực hấp dẫn, định luật này đưa ra mối liên hệ giữa thông lượng của hai trường vectơ này đi

qua một mặt đóng với diện tích hay khối lượng bị bao phủ bởi mặt. Đối với trường hợp của điện trường, định luật này cũng là một trong bốn phương trình là nền tảng cho lý thuyết điện từ trường.

Dưới dạng tích phân, định luật Gauss nói rằng:

$$\Phi = \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV = \frac{Q_A}{\epsilon_0} \quad (1.10)$$

Trong đó: Φ – từ thông;

$\mathbf{E}$ – điện trường;

$d\mathbf{A}$ – diện tích của một hình vuông vi phân trên mặt S ;

Q_A – điện tích được bao bởi mặt đó;

ρ – mật độ điện tích tại một điểm trong thể tích V ;

ϵ_0 – hằng số điện môi của không gian tự do;

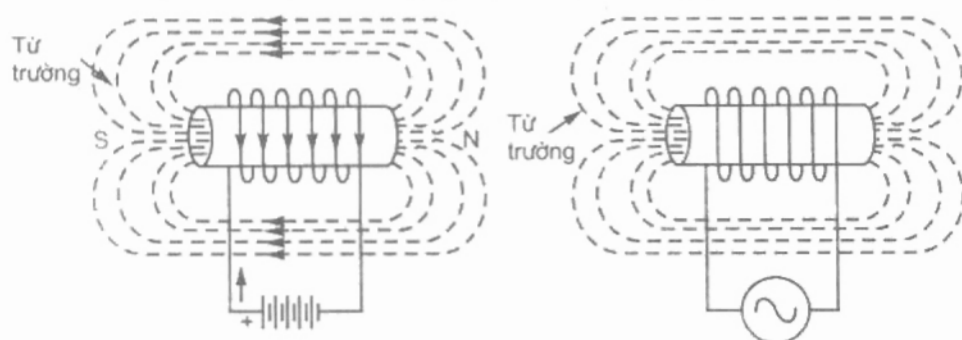
$\oint_S$ – tích phân trên mặt S bao phủ thể tích V .

1.1.2. Mô hình biến áp và cuộn dây

1. Từ thông của cuộn dây

Hai dây dẫn có dòng điện chạy qua đặt cách xa nhau, từ trường do hai dây dẫn sinh ra không ảnh hưởng lẫn nhau. Nhưng nếu hai dây dẫn đặt sát lại gần nhau, từ trường tổng do chúng sinh ra được nhân đôi.

Nếu dây dẫn quấn các vòng quanh ống (hình 1.3), từ trường sinh ra tăng gấp nhiều lần so với một vòng. Cuộn dây có dòng điện một chiều chạy qua sinh từ trường tương tự như nam châm. Chiều đường sức của cuộn dây hay cực của nam châm được xác định theo quy tắc vận nút chai (chiều quay của vận nút chai theo chiều dòng điện, chiều đi vào của vận nút chai là cực nam S, chiều ngược lại là cực bắc N) (hình 1.3a).



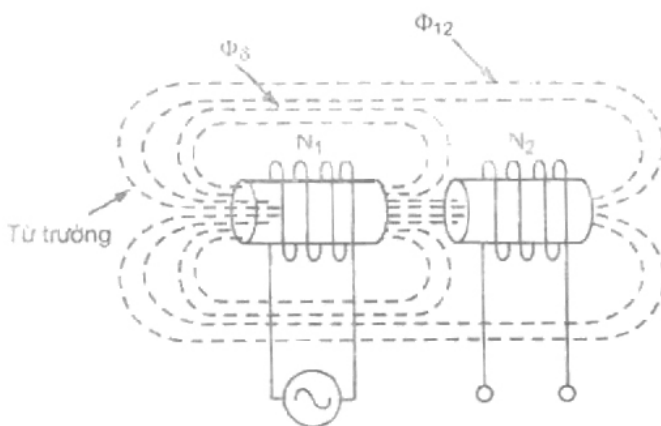
Hình 1.3. Từ trường của cuộn dây
a) Có dòng điện một chiều, b) Có dòng điện xoay chiều.

Từ thông xuất hiện xung quanh cuộn dây. Giá trị từ thông do dòng điện (I) và số vòng của cuộn dây (N) quyết định. Năng lực sinh từ thông được gọi là sức từ động (magnetomotive force – MMF). Quan hệ giữa mật độ từ thông (thường thông qua từ cảm) B và cường độ từ trường H là tuyến tính đối với lõi không khí và tỷ lệ giữa chúng là độ từ thẩm μ , trong đó cuộn dây lõi không khí đại lượng này có đơn vị CGS (centimeter–gram–second), nhưng ở đây đơn vị được lấy là gauss/oersted.

Trong lõi không khí, quan hệ giữa B và H tuyến tính [8], nên muốn có từ thông lớn thì dòng điện phải lớn, điều này trong thực tế khó thực thi.

2. Mô hình biến áp đơn giản

Mô hình đơn giản nhất của biến áp được cho như trên hình 1.4. Biến áp có hai cuộn dây sơ và thứ cấp, cuộn dây sơ cấp N_1 mắc vào nguồn, thứ cấp N_2 hở mạch. Từ thông do dòng điện cuộn dây sơ cấp sinh ra có hai thành phần: từ thông Φ_{12} chạy qua cuộn dây thứ cấp, từ thông tản Φ_σ không chạy qua cuộn dây thứ cấp, chỉ thành phần từ thông Φ_{12} cảm ứng ra sức điện động trong cuộn dây thứ cấp.

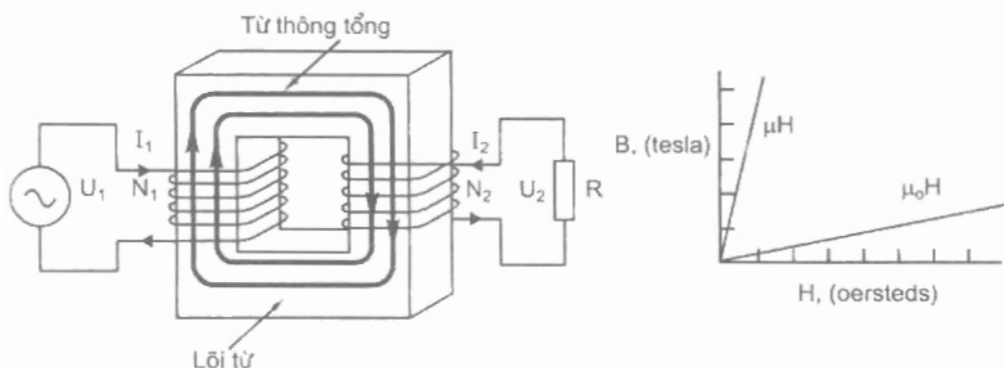


Hình 1.4. Mô hình biến áp đơn giản

1.1.3. Lõi từ

Những vật liệu có khả năng dẫn từ yếu có độ từ thẩm nhỏ (chân không có độ từ thẩm bằng 1. Các vật liệu không dẫn từ như không khí, giấy, đồng... có độ từ thẩm cũng nhỏ như thế thôi). Một số vật liệu như sắt, niken, coban và các hợp kim của chúng có độ từ thẩm cao đến hàng trăm hay hàng nghìn. Do đó, để tăng khả năng dẫn từ, người ta đã dùng vật liệu từ để làm lõi, tạo thành đường dẫn từ. Khi đó từ

thông được dẫn chủ yếu trong vật liệu từ, loại trừ một phần không đáng kể chạy bên ngoài lõi từ. Đường đặc tính từ hóa bây giờ có độ dốc lớn (μH) như trên hình 1.5.



Hình 1.5. Lõi từ biến áp

Do tầm quan trọng của lõi từ, dưới đây nghiên cứu kỹ hơn một chút về các tính chất cơ bản của lõi từ.

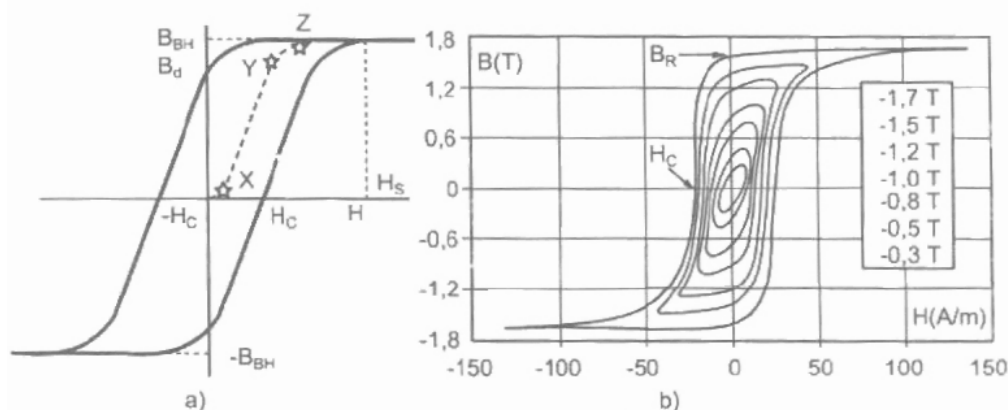
1. Vòng từ trễ

Từ trễ (tiếng Anh: magnetic hysteresis) là hiện tượng bất thuận nghịch giữa quá trình từ hóa và đảo từ ở các vật liệu sắt từ, do khả năng giữ lại từ tính của các vật liệu sắt từ. Hiện tượng từ trễ là một đặc trưng quan trọng và dễ thấy nhất ở các chất sắt từ.

Đối với một lõi từ, khi bị khử từ hoàn toàn, nếu cường độ từ trường từ 0 tăng dần lên, đặc tính $B(H)$ thay đổi theo đường nét đứt hình 1.6a. Khi H tăng, từ cảm B tăng lên tới bão hòa B_{BH} . Theo đó, khi cường độ từ trường H còn nhỏ từ cảm tăng chậm đến điểm X, sau đó tăng rất nhanh đến điểm Y (đây là điểm uốn của đường cong $B(H)$). Qua đến điểm Z lõi từ bão hòa và cuộn dây bây giờ tương tự như lõi không khí. Từ điểm B_{BH} này giảm H , từ cảm B giảm chậm về B_d , khi $H = 0$ vật liệu vẫn còn được từ hóa, điểm này được gọi là từ dư. Cường độ từ trường đổi chiều sang phía âm từ cảm giảm dần về 0 tại $-H_C$ điểm được gọi là lực kháng từ.

Hiện tượng từ trễ thông qua đường cong $B(H)$ hình 1.6, được mô tả như sau: khi từ hóa một vật sắt từ đến một từ trường bất kỳ hay đến bão hòa (B_{BH}), nếu ta giảm dần từ trường và quay lại theo chiều ngược, thì nó không quay trở về đường cong từ hóa ban đầu nữa, mà đi theo đường khác. Và nếu ta đảo từ (từ chiều này sang chiều kia) theo một chu trình kín, thì ta sẽ có một đường cong kín gọi là đường cong từ trễ (hay

vòng từ trễ). Tính chất từ trễ là một tính chất nội tại đặc trưng của các vật liệu sắt từ, và hiện tượng trễ biểu hiện khả năng từ tính của các chất sắt từ.



Hình 1.6. Vòng từ trễ

a) Vòng từ điển hình; b) Vòng từ với các biên độ khác nhau.

Theo đường cong từ trễ, một số đại lượng sau cần chú ý:

- **Từ thông bão hòa:**

Là giá trị từ thông đạt được khi được từ hóa đến từ trường đủ lớn (vượt qua giá trị trường dị hướng) sao cho vật ở trạng thái bão hòa từ, có nghĩa là các mômen từ hoàn toàn song song với nhau. Khi đó đường cong từ trễ $B(H)$ có dạng nằm ngang. Từ thông bão hòa là tham số đặc trưng của vật liệu sắt từ.

- **Từ dư:**

Là giá trị từ thông còn giữ được khi ngắt từ trường ($H = 0$), được ký hiệu là B_d hoặc Φ_d . Từ dư không phải là thông số mang tính chất nội tại của vật liệu mà chỉ là thông số dẫn xuất, phụ thuộc vào các cơ chế từ trễ, các phương từ hoá, hình dạng vật từ ...

Biên độ dao động của từ trường ngoài khác nhau sẽ tạo ra các đường cong từ trễ khác nhau (hình 1.6b).

- **Lực kháng từ:**

Là giá trị từ trường ngược cần đặt vào để triệt tiêu độ từ hóa ($B = 0$). Lực kháng từ thường được ký hiệu là H_c (Coercivity). Lực kháng từ cũng không phải là tham số nội tại của vật liệu mà là tham số bên ngoài giống như từ dư.

- **Tổn hao năng lượng trễ:**

Là diện tích đường cong từ trễ, là năng lượng tiêu tốn cần thiết cho một vòng từ trễ, có đơn vị của mật độ năng lượng.

Ứng dụng từ trễ:

Các vật liệu từ có tính chất từ trễ cao có thể được sử dụng để chế tạo nam châm vĩnh cửu. Khi đặt vật liệu này trong từ trường mạnh, sẽ xuất hiện từ độ mạnh trong vật liệu, và sau khi bỏ từ trường ngoài đi, vật liệu vẫn giữ từ độ mạnh này, và thể hiện như nam châm vĩnh cửu.

Hiện tượng từ trễ có thể làm một số rơle từ không kịp nhả ngay sau khi từ trường bị ngắt. Đây cũng là hiện tượng quan trọng cần xét tới khi thiết kế thiết bị lưu trữ dữ liệu bằng vật liệu từ (như băng từ, ổ đĩa cứng của máy tính). Trong các vật liệu này, dữ liệu bao gồm các bit 0 và 1 được ứng với chiều mômen từ hướng lên hoặc xuống của các vùng trên vật liệu. Để thay đổi giá trị một ô nhớ, cần áp dụng một từ trường ngoài vào nó. Hiện tượng từ trễ khiến cho chúng ta cần biết chính xác giá trị hiện có của ô nhớ này để tìm ra từ trường phù hợp. Để tránh phức tạp hóa vấn đề, nhiều hệ thống sẽ ghi đè lên ô nhớ một giá trị biết trước, trong một quá trình gọi là làm lệch băng từ.

Vật liệu từ trễ khi đặt trong từ trường biến thiên sẽ tiêu thụ năng lượng của từ trường ngoài (với mật độ tiêu thụ chính bằng diện tích đường cong từ trễ), biến nó thành nhiệt năng và bị nóng lên. Đây có thể là hiệu ứng không mong muốn trong nhiều ứng dụng và ở những ứng dụng này, cần chọn vật liệu có tổn hao năng lượng trễ nhỏ.

2. Từ độ (Magnetization) hay độ từ hóa M_{th} , được định nghĩa là tổng mômen từ trên một đơn vị thể tích. Về mặt toán học, nó được cho bởi công thức:

$$M_{th} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum m}{\Delta V} \quad (1.11)$$

với m – mômen từ nguyên tử, ΔV – thể tích.

Từ độ có cùng thứ nguyên với cường độ từ trường, được liên hệ với từ trường qua hệ số từ hóa (hay còn gọi là độ cảm từ của vật liệu, ký hiệu là χ):

$$M_{th} = \chi H \quad (1.12)$$

3. Độ từ thẩm (Magnetic permeability), thường được ký hiệu là μ là một đại lượng vật lý đặc trưng cho tính thẩm của từ trường vào một vật liệu, nó nói lên khả năng phản ứng của vật liệu dưới tác dụng của từ trường ngoài. Khái niệm từ thẩm thường mang tính chất kỹ thuật của vật liệu, nói lên quan hệ giữa cảm ứng từ (đại lượng sản sinh ngoài) và từ trường ngoài. Độ từ thẩm thực chất chỉ đáng kể ở các vật liệu từ tính (sắt từ và ferit).

Từ cảm B quan hệ với từ độ M và cường độ từ trường H theo biểu thức:

$$B = \mu_0(H + M_{th}) \quad (1.13)$$

với μ_0 – hằng số từ, hay được gọi là độ từ thẩm của chân không, có độ lớn:

$$\mu_0 = 4.\pi 10^{-7} \text{T.m / A} \quad (1.14)$$

Viết cách khác:

$$B = \mu_0(1 + \chi).H \quad (1.15)$$

Như vậy, đại lượng độ từ thẩm trong biểu thức (1.15) có thể viết:

$$\mu = \mu_0(1 + \chi) \quad (1.16)$$

Hay: $B = \mu.H$

Độ từ thẩm có cùng ý nghĩa với từ cảm, đều nói lên khả năng phản ứng của các vật liệu dưới tác dụng của từ trường ngoài.

Trong kỹ thuật, người ta thường quan tâm đến giá trị độ từ thẩm tương đối và được định nghĩa bởi:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = (1 + \chi) = \frac{B}{\mu_0.H} \quad (1.17)$$

Khi nói độ từ thẩm thì người ta thường ngầm hiểu là độ từ thẩm tương đối, và đại lượng này là đại lượng không có thứ nguyên.

Trên thực tế, giá trị độ từ thẩm chỉ đáng kể ở các vật liệu từ tính. Từ đường cong từ hóa của vật liệu, người ta có quan tâm đến một số độ từ thẩm khác nhau:

Độ từ thẩm ban đầu:

Được định nghĩa là độ từ thẩm của vật liệu dưới từ trường ngoài bằng không, hay thông qua biểu thức:

$$\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{dB}{dH} \quad (1.18)$$

Trên thực tế, không thể xác định giá trị độ từ thẩm ban đầu khi từ trường ngoài chính xác bằng 0, nên người ta xác định bằng cách đặt từ trường từ hóa rất nhỏ trong lõi dẫn từ được chế tạo thành dạng mạch từ kín (để khử hiệu ứng trường khử từ dẫn đến việc dễ từ hóa) và nếu phải đo trong từ trường xoay chiều thì đo ở tần số rất nhỏ (gọi là phép đo chuẩn tĩnh). Giá trị độ từ thẩm ban đầu rất có ý nghĩa trong việc sử dụng các vật liệu sắt từ mềm vì vật liệu từ mềm rất dễ bão hòa và cần sử dụng trong từ trường nhỏ.

Bảng 1.1. Độ từ thẩm một số vật liệu

Vật liệu	Độ từ thẩm μ [H/m]	Độ từ thẩm tương đối $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$
Mu-metal	$2,5 \times 10^{-2}$	20,000
Mu-metal		50,000
Permalloy	$1,0 \times 10^{-2}$	8,000
Electrical steel	$5,0 \times 10^{-3}$	4,000
Ferrite (nickel zinc)	$2,0 \times 10^{-5} - 8,0 \times 10^{-4}$	16 – 640
Ferrite (manganese zinc)	$> 8,0 \times 10^{-4}$	> 640
Steel	$8,75 \times 10^{-4}$	100
Nickel	$1,25 \times 10^{-4}$	100 – 600
Platinum	$1,2569701 \times 10^{-6}$	1,000265
Aluminum	$1,2566650 \times 10^{-6}$	1,000022
Air		1,00000037
Vacuum	$1,2566371 \times 10^{-6} (\mu_0)$	1
Hydrogen	$1,2566371 \times 10^{-6}$	1,0000000
Sapphire	$1,2566368 \times 10^{-6}$	0,99999976
Copper	$1,2566290 \times 10^{-6}$	0,9999994
Water	$1,2566270 \times 10^{-6}$	0,9999992
Bismuth		0,999834
Superconductors	0	0

4. Sức từ động và cường độ từ trường

Sức từ động: Sức đẩy dòng từ chuyển động trong điện trường. Sức từ động được xác định:

$$F = 0,4\pi.NI \text{ [A.vg]} \quad (1.19)$$

Trong đó: N– số vòng dây;

I– dòng điện.

Cường độ từ trường:

$$H = \frac{F_{mt}}{l_{mt}} = \frac{0,4\pi.N.I}{l_{mt}} \quad (1.20)$$

Trong đó: l_{mt} – chiều dài mạch từ.

5. Từ trở

Từ thông được sinh ra trong vật liệu từ do sức từ động, nó phụ thuộc sự cản trở từ thông của vật liệu và gọi là từ trở. Từ trở của lõi phụ thuộc

cấu trúc vật liệu và kích thước lõi, tương tự như điện trở trong mạch điện. Quan hệ giữa sức từ động và từ thông tương tự như sức từ động của mạch điện:

$$E = I.R \leftrightarrow F_m = \Phi.R_m \quad (1.21)$$

Như vậy, vật liệu dẫn từ yếu có từ trở lớn, để có từ thông lớn trong vật liệu dẫn từ yếu cần có sức từ động lớn (dòng điện hay số vòng lớn).

Từ trở mạch từ được tính:

$$R_m = \frac{l_{mt}}{\mu_r \mu_0 A_C} \quad (1.22)$$

Trong đó: l_{mt} – chiều dài mạch từ;

μ_r, μ_0 – độ từ thẩm tương đối và không khí;

A_C – tiết diện lõi từ.

6. Khe hở không khí

Từ (1.22) cho thấy độ thẩm từ cao tương ứng từ trở thấp của các vật liệu từ. Khi lõi có thêm khe hở không khí, từ trở mạch từ tăng lên. Trong thực tế, từ trở được điều khiển bằng khoảng cách khe hở không khí. Từ trở lõi bây giờ là tổng từ trở lõi và khe hở R_{kh} . Từ trở khe hở không khí được xác định :

$$R_{kh} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{l_{kh}}{A_C} \quad (1.23)$$

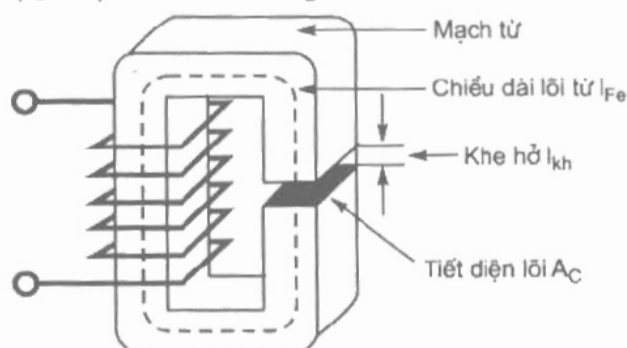
Với $\mu_0 = 1$ thì:

$$R_{kh} = \frac{l_{kh}}{A_C}$$

Trong đó: l_{kh} – chiều dài khe hở;

A_C – tiết diện lõi;

μ_0 – độ từ thẩm không khí.



Hình 1.7. Khe hở không khí trong lõi từ

Từ trở tổng của mạch từ:

$$R_{mt} = R_{Fe} + R_{kh} = \frac{l_{Fe}}{\mu_r \mu_0 \cdot A_C} + \frac{l_{kh}}{\mu_0 \cdot A_C} \quad (1.24)$$

Trong đó: μ_r – độ từ thẩm tương đối (1-17), với:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}$$

Khi đã có từ trở tổng cộng R_{mt} , có thể tính độ từ thẩm hiệu quả của lõi có khe hở:

$$R_{mt} = \frac{l_{mt}}{\mu_{hq} \cdot A_C} = \frac{l_{Fe}}{\mu_r \mu_0 \cdot A_C} + \frac{l_{kh}}{\mu_0 \cdot A_C} \quad (1.25)$$

Trong đó: R_{mt} – từ trở toàn bộ mạch từ có khe hở

μ_{hq} – độ từ thẩm hiệu quả

$l_{mt} = l_{Fe} + l_{kh}$ – tổng độ dài mạch từ bằng độ dài lõi vật liệu từ (tạm coi là sắt Fe) cộng với độ dài khe hở.

Biến đổi biểu thức (1.25) ta có:

$$\mu_{hq} = \frac{l_{Fe} + l_{kh}}{\frac{l_{Fe}}{\mu_r \mu_0} + \frac{l_{kh}}{\mu_0}} \quad (1.26)$$

Khi $l_{kh} \ll l_{mt}$ độ từ thẩm hiệu quả được viết:

$$\mu_{hq} = \frac{\mu_r \mu_0}{1 + \mu_r \cdot \frac{l_{kh}}{l_{Fe}}} \quad (1.27)$$

Điều khiển từ thông bằng khe hở không khí:

Tính toán từ thông (từ cảm) trong những trường hợp có khe hở như trên hình 1.7 không gặp khó khăn gì. Tuy nhiên, đối với loại lõi bột ép, lõi nhiều khe hở nối tiếp (như trên hình 1.8), khi đó các biểu thức được tính cho trường hợp lõi bột ép có khe hở nhỏ được tính:

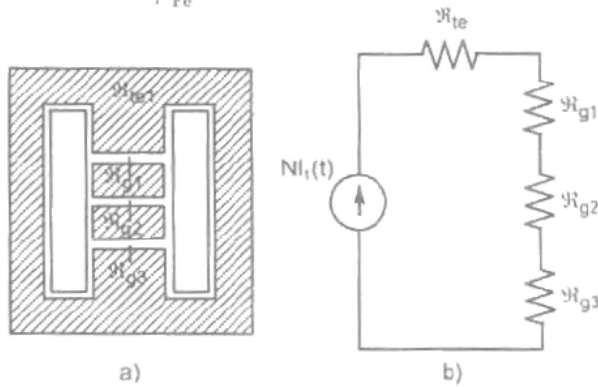
$$\begin{aligned} \mu_r &= \mu_{hq} \\ B_{dc} &= \mu_{hq} \cdot \frac{0,4 \cdot \pi \cdot N \cdot I}{l_{mt}}, \quad [\text{gauss}] \\ \mu_r &= \frac{\mu_{Fe}}{1 + \mu_{Fe} \cdot \frac{l_{kh}}{l_{Fe}}} \end{aligned} \quad (1.28)$$

Biến đổi μ_r trong (1.28) ta được:

$$\mu_r = \frac{l_{Fe}}{l_{kh} + \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}}}$$

Thay $\mu_{hq} = \mu_r$ vào B_{dc} , ta có biểu thức tính cho lõi khe hở lớn hay nhiều khe hở nhỏ:

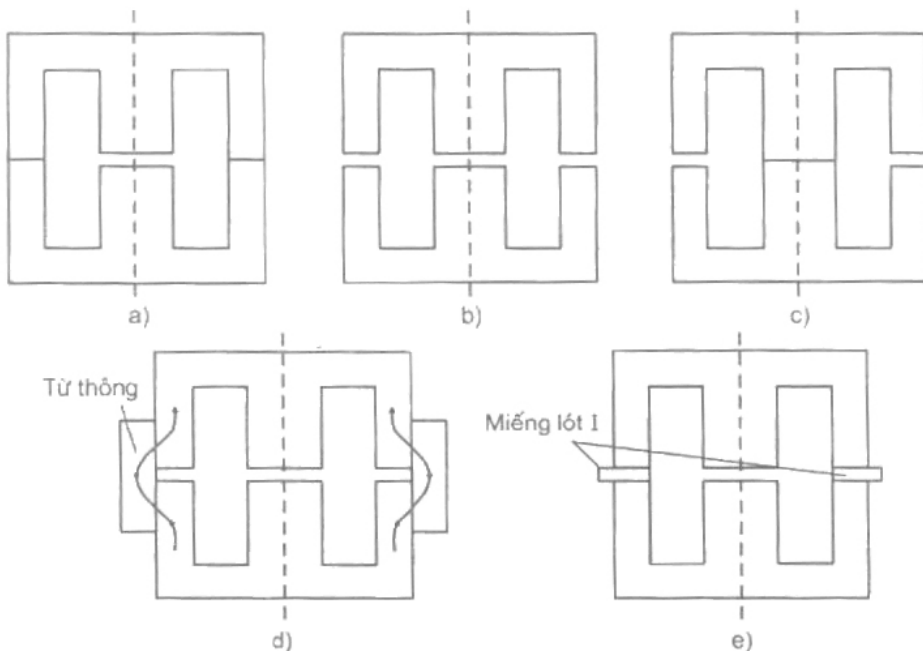
$$B_{dc} = \frac{l_{Fe}}{l_{kh} + \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}}} \cdot \frac{0,4\pi \cdot N \cdot I}{l_{Fe}} \quad (1.29)$$



Hình 1.8. Lõi từ có nhiều khe hở

Đơn giản hơn: $B_{dc} = \frac{0,4\pi \cdot N \cdot I}{l_{kh} + \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}}} \quad (1.30)$

Các loại khe hở điển hình cho trên hình 1.9.



Hình 1.9. Một số loại khe hở mạch từ

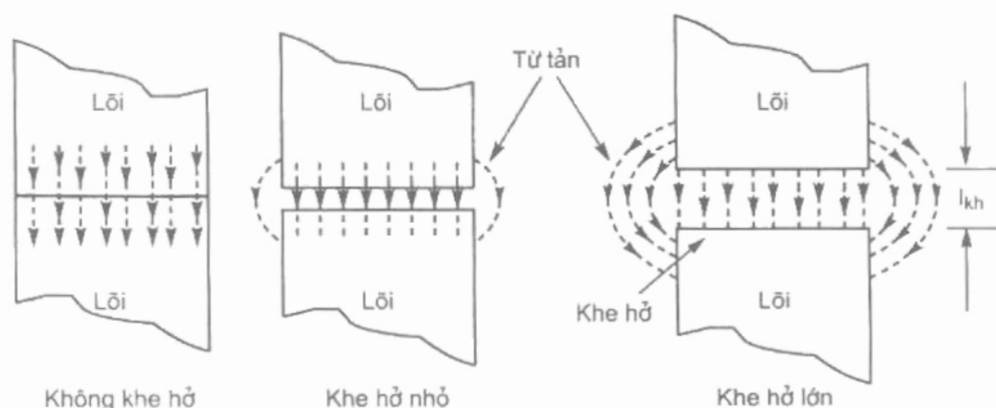
7. Từ thông tản

Khi có khe hở không khí, cho dòng điện chạy vào cuộn dây, trong cuộn dây có từ thông Φ đi qua, từ thông này chia làm hai phần:

a) Từ thông chính Φ_c là thành phần qua khe hở không khí gọi là từ thông làm việc Φ_{lv} .

b) Từ thông tản Φ_a là thành phần đi ra ngoài khe hở không khí xung quanh.

Khe hở càng lớn từ thông tản ra không khí càng lớn (hình 1.10), nó còn phụ thuộc hình dáng, kích thước khe hở cũng như vị trí cuộn dây đặt.



Hình 1.10. Khe hở tăng từ thông tản tăng

Khe hở và tính toán cuộn dây một chiều:

Bắt đầu tính toán, người thiết kế cần xác định giá trị từ cảm cực đại một chiều B_{dc} và xoay chiều B_{ac} sao cho mạch từ không bão hoà. Biểu thức xác định từ cảm cực đại:

$$B_{max} = \frac{0,4.\pi.N\left(I_{dc} + \frac{\Delta I}{2}\right).10^{-4}}{l_{kh} + \frac{l_{Fe}}{\mu}} \quad (1.31)$$

Điện cảm của cuộn dây có lõi có khe hở được tính:

$$L = \frac{0,4.\pi.N^2 A_c .10^{-8}}{l_{kh} + \frac{l_{Fe}}{\mu}} \quad (1.32)$$

Điện cảm phụ thuộc tổng chiều dài khe hở l_{kh} và tỷ số chiều dài lõi từ với độ từ thẩm $\left(\frac{l_{Fe}}{\mu}\right)$. Kích thước cuối cùng của khe hở còn tùy thuộc hiệu ứng từ tản, mà nó là hàm của kích thước lõi và khe hở:

$$F = 1 + \frac{l_{kh}}{\sqrt{A_c}} \ln \frac{2h}{l_{kh}} \quad (1.33)$$

Trong đó: F – hệ số có xét tới từ tản khe hở mạch từ;
 h – chiều cao mạch từ.

Điện cảm cuộn dây khi có xét tới từ tản khe hở:

$$L = F \cdot \left(\frac{0,4 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot A_c \cdot 10^{-8}}{l_{kh} + \frac{l_{Fe}}{\mu}} \right) \quad (1.34)$$

Từ cảm khi có xét đến hệ số từ tản khe hở:

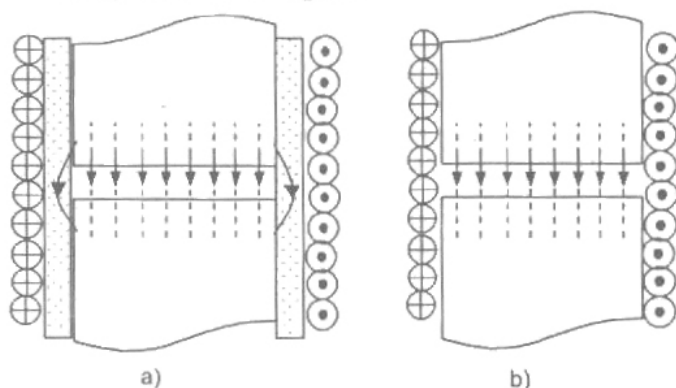
$$B_{mx} = F \cdot \left(\frac{0,4 \cdot \pi \cdot N \left(I_{dc} + \frac{\Delta I}{2} \right) \cdot 10^{-4}}{l_{kh} + \frac{l_{Fe}}{\mu}} \right) \quad (1.35)$$

Từ biểu thức (1.33), số vòng dây được tính:

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot \left(l_{kh} + \frac{l_{Fe}}{\mu} \right)}{0,4 \cdot \pi \cdot A_c \cdot F \cdot 10^{-8}}} \quad (1.36)$$

Ảnh hưởng của cách quấn dây đến từ thông:

Cuộn dây quấn sát hay cách lõi biến áp sẽ có từ thông tản khác nhau. Hình 1.11 cho thấy trường hợp cuộn dây được quấn có khung dây (bobin) và không khung dây. Đối với các cuộn dây có khung, dây dẫn cách lõi một bề dày khung, từ thông tản xuất hiện trong khung dây tại khu vực khe hở. Còn đối với trường hợp dây quấn không khung, không xuất hiện từ thông tản ra bên ngoài.

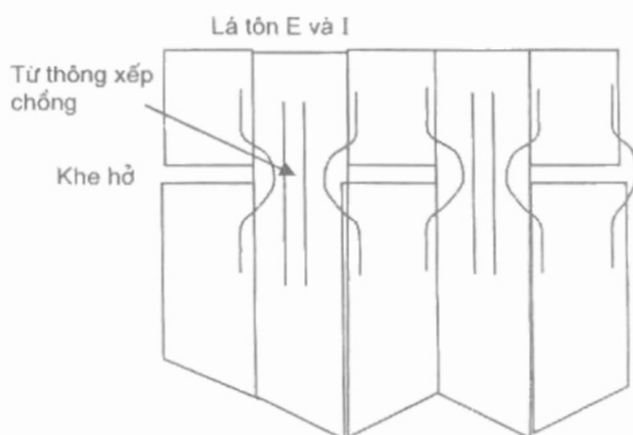


Hình 1.11. Từ thông của lõi

a) Cuộn dây có khung; b) Cuộn dây không khung.

Từ thông tản của lõi tôn cán ghép EI:

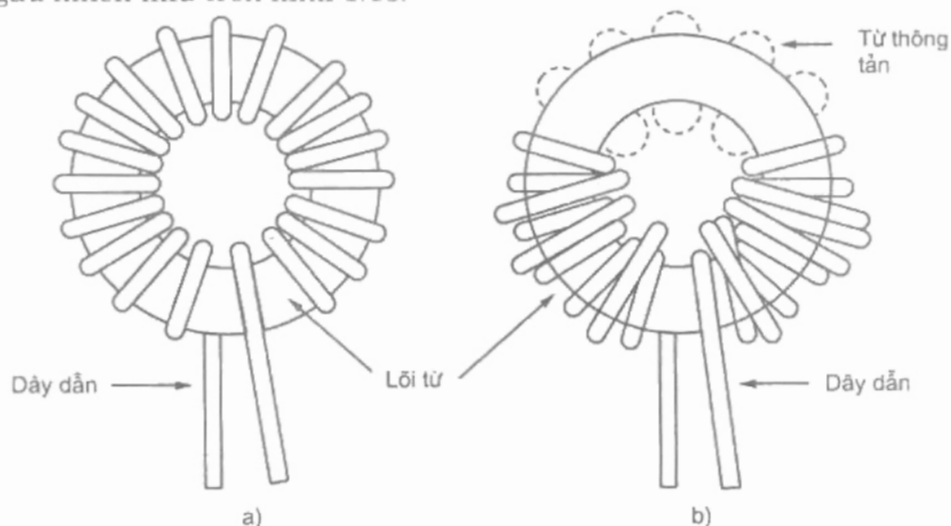
Khi ghép các lá tôn, tại mép các mối ghép EI từ thông tản sang lá tôn E bên cạnh (hình 1.12) làm cho mật độ từ thông của lá tôn bên cạnh tăng lên, làm thay đổi hình dạng dòng diện kích thích (dòng diện cuộn dây sơ cấp) như trên hình 1.12b.



Hình 1.12. Từ thông của lõi tôn cán ghép EI

Từ thông tản của lõi bột ép:

Trong tính toán các bộ biến đổi tần số cao, sử dụng lõi bột ép có độ từ thẩm không lớn, các cuộn dây không nhiều vòng. Do đó có những khoảng lõi không dây dẫn bao quanh, từ thông tản xuất hiện quanh lõi ngẫu nhiên như trên hình 1.13.



Hình 1.13. Từ thông tản của lõi bột ép
a) Dây quấn đều; b) Dây quấn không đều.

1.1.4. Mạch từ

1. Định luật cơ bản của mạch từ

Theo định luật Ampe, tổng sức từ động của mạch từ kín bằng 0

$$\Sigma F_{mt} = 0; \Sigma F_N = \Sigma F_{tái} \quad (1.37)$$

Tương đương định luật Kirchhoff 2. Sức từ động cho một phần tử từ tính:

$$\Sigma F_{tái} = Hl \quad (1.38)$$

Trong đó: l – độ dài mạch từ.

Thay $H = \frac{B}{\mu}$ và $B = \frac{\Phi}{A_c}$ có được biểu thức:

$$\Sigma F_{tái} = Hl = \frac{\Phi l}{\mu A_c} = \Phi \cdot R_{mt} \quad (1.39)$$

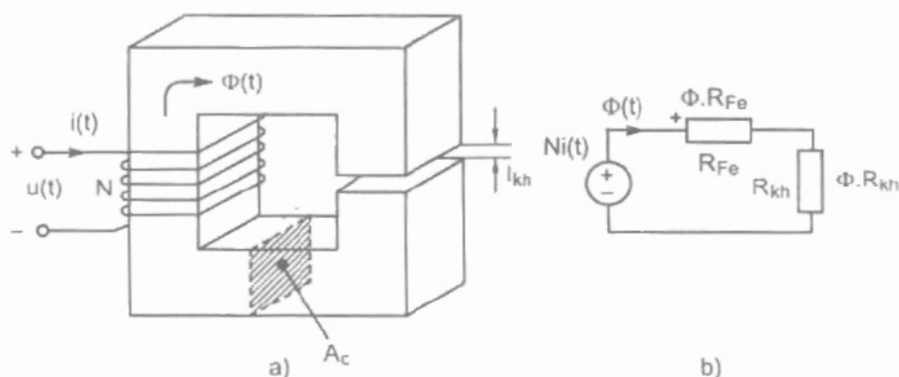
Sự tương tự mạch từ với mạch điện trong biểu thức (1.39); từ thông Φ tương tự dòng điện I , $R_{mt} = \frac{l}{\mu A_c}$ – từ trở tương tự điện trở R .

Đối với mạch từ có khe hở, sức từ động tách thành hai thành phần, theo định luật Ampe có thể viết:

$$F_{mt} = H_{Fe} l_{Fe} + H_{kh} l_{kh} = NI \quad (1.40)$$

$$\text{Hay: } \Phi_{Fe} \cdot R_{Fe} + \Phi_{kh} \cdot R_{kh} = \Phi \cdot (R_{Fe} + R_{kh}) = NI \quad (1.41)$$

Trong đó: Φ , Φ_{Fe} , Φ_{kh} – từ thông chung, trong lõi, trong khe hở của mạch từ; R_{Fe} , R_{kh} – từ trở lõi (coi là lõi sắt) và khe hở.



Hình 1.14. Mạch từ có khe hở
a) Mô hình mạch; b) Sơ đồ tương đương

Áp dụng định luật Gauss ta có biểu thức:

$$\int B_{Fe} ds + \int B_{kh} ds = 0 \quad (1.42)$$

Các biểu thức (1.40) + (1.42) đúng cho trường hợp khe hở nhỏ. Ở khe hở lớn hơn, từ thông chạy bên ngoài. Tương ứng với mạch điện, cách điện không xét tới và độ từ thẩm tương đối không khí bằng 1 chứ không bằng 0.

Áp dụng định luật Gauss cho nút của mạch từ, tổng từ thông của nút bằng 0:

$$\oint_{\text{s}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \Phi_i = 0 \quad (1.43)$$

Biểu thức này tương đương như định luật Kirchhoff 1 về dòng điện.

2. Điện cảm

a) Từ thông móc vòng

Như đã biết, cân bằng điện áp trên cuộn dây được viết:

$$u(t) = R \cdot i(t) + \frac{d\Psi(t)}{dt} = Ri(t) + e(t) \quad (1.44)$$

Trong đó: $u(t)$, $i(t)$ – điện áp, dòng điện trong mạch điện;

$e(t)$ – sức điện động cảm ứng của cuộn dây;

$\Psi(t)$ – từ thông móc vòng;

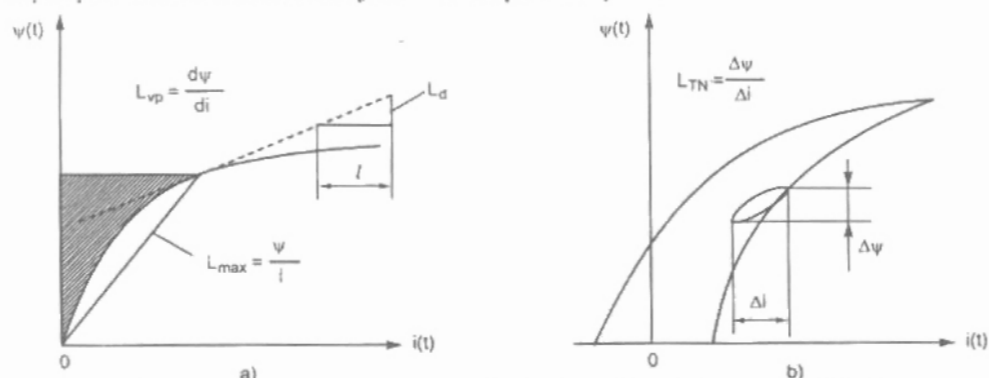
R – điện trở của mạch.

Tích phân hai vế (1.44) ta có:

$$\Psi(t) = \int e(t) dt = \int [u(t) - Ri(t)] dt \quad (1.45)$$

b) Định nghĩa độ tự cảm (điện cảm)

Đường cong từ hóa $B(H)$ phi tuyến, do đó độ tự cảm hay điện cảm của từ thông móc vòng tại mỗi điểm làm việc của đường cong từ hóa khác nhau. Mặt khác, độ tự cảm có thể xác định bằng nhiều cách khác nhau thông qua đặc tính $B-H$ phi tuyến. Để đơn giản ở đây không xét tổn hao lõi. Các giá trị điện cảm khác nhau này có thể được xác định như sau:



Hình 1.15. Các giá trị điện cảm khác nhau theo đường cong từ hóa

Điện cảm cực đại:

Độ dốc của dây cung trên đường cong từ thông móc vòng là điện cảm cực đại ($L_{\max}$) và được viết:

$$L_{\max} = \frac{\Psi}{i} \text{ [H] hay } [\Omega.s] \quad (1.46)$$

Điện cảm vi phân:

Đạo hàm từ thông móc vòng theo dòng điện ta có độ tự cảm vi phân (L_{vp}). Độ tự cảm này được sử dụng khi biến thiên dòng điện nhỏ trong cuộn dây.

$$L_{vp} = \frac{d\Psi}{di} \quad (1.47)$$

Lỗi từ có tổn hao vòng từ trở hẹp khi ở độ tự cảm nhỏ là độ tự cảm thuận nghịch (L_{TN}).

$$L_{TN} = \frac{\Delta\Psi}{\Delta i} \quad (1.48)$$

Điện cảm tích lũy năng lượng:

Khi có dòng điện, trong cuộn dây tích lũy năng lượng E , độ tự cảm trong trường hợp đó xác định:

$$L_E = \frac{2 \int_0^\Psi i.d\Psi}{i^2} \quad (1.49)$$

Mối quan hệ giữa các định nghĩa khác nhau về điện cảm cho đường cong từ hóa bão hòa là: $L_{vp} < L_E < L_{\max}$. Thể hiện rõ nét nhất là trong các bộ biến đổi Flyback và Cuk, trong các bộ biến đổi đó, đầu tiên năng lượng tích lũy trong cuộn dây sau đó xả lên tải.

Điện cảm trong mạch dòng điện xoay chiều:

Trong mạch điện xoay chiều, điện cảm được tính:

$$L_{ac} = \frac{U}{\omega.I} \quad \omega = 2.\pi.f \quad (1.50)$$

Trong đó: L_{ac} – điện cảm trong mạch xoay chiều;

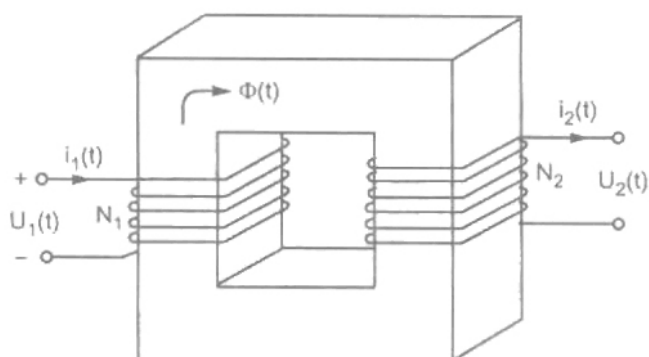
U , I – điện áp và dòng điện hiệu dụng.

Điện cảm bổ sung:

Từ thông trung bình của một vòng dây được xác định theo từ thông móc vòng:

$$\Phi = \frac{\Psi}{N} \quad (1.51)$$

Từ thông trung bình của một vòng dây có thể đưa so sánh với sức từ động $F = Ni$ [A.vg]. Trong cuộn dây (hay biến áp), từ thông sinh ra trong mạch từ như trên hình 1.16. Điện cảm cũng có thể xác định thông qua thông số từ dẫn (Λ – đại lượng nghịch đảo của từ trở).



Hình 1.16. Mô hình biến áp

Từ (1.32) khi không khe hở

$$L = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot N^2 A_C \cdot 10^{-8}}{l_{kh} + \frac{l_{Fe}}{\mu}} = \Lambda N^2 \quad (1.52)$$

Trong đó: Λ – từ dẫn mạch từ.

$$\Lambda = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot A_C \cdot 10^{-8}}{l_{kh} + \frac{l_{Fe}}{\mu}} \quad (1.53)$$

Đại lượng này chỉ phụ thuộc các thông số mạch từ: A_C , l_{kh} , l_{Fe} , μ . Nếu các đại lượng này không đổi thì quan hệ giữa điện cảm L và số vòng dây là hàm bậc 2.

Trong nhiều tài liệu, với các lõi đúc sẵn không khe hở giá trị điện cảm L_{1000} của 1000 vòng dây được cho sẵn trong các bảng tra. Khi đó việc tính toán số vòng dây cho các cuộn dây điện cảm thường được tính:

$$N = 1000 \sqrt{\frac{L}{L_{1000}}} \quad (1.54)$$

Trong đó điện cảm L_{1000} được cho sẵn trong bảng tra thông số lõi [7, 8].

Tùy theo phạm vi sử dụng mà điểm bão hòa có thể xảy ra. Ứng dụng trong điện tử công suất, điểm mà tại đó có điện cảm vi phân L_d bằng nửa giá trị bão hòa cực đại. Ví dụ, tính toán cho mạch lọc thông thấp tại điểm điện áp nhấp nhô gấp hai lần ở đầu ra. Trong mạch điện hình sin, biên độ dòng điện đạt tới giá trị bão hòa.

Điện cảm riêng và hồ cảm:

Điện cảm riêng của cuộn dây được tính:

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\Phi}{i} = \frac{N^2}{R_{mt}} = N^2 \Lambda \quad (1.55)$$

Hồ cảm M được xác định:

$$M = \frac{N_1 \cdot \Phi_{12}}{i_2} = \frac{N_2 \cdot \Phi_{21}}{i_1} \quad (1.56)$$

Trong đó: N_1, N_2 — số vòng cuộn dây sơ và thứ cấp;

i_1, i_2 — dòng điện cuộn dây sơ và thứ cấp;

Φ_{12}, Φ_{21} — từ thông liên kết giữa các cuộn sơ cấp để sinh dòng ở cuộn dây thứ cấp và ngược lại.

3. Mô hình biến áp

Mô hình biến áp được cho như trên hình 1.16. Từ trở lõi:

$$R_{mt} = \frac{l_{mt}}{\mu A_e} \quad (1.57)$$

Trong đó: l_{mt} — chiều dài mạch từ;

A_e — tiết diện hiệu quả lõi từ;

μ — độ từ thẩm của vật liệu lõi.

Theo định luật Faraday ta có:

$$u_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad u_2 = e_2 = N_{21} \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.58)$$

Từ thông trong lõi được coi là chung cho các cuộn dây sơ và thứ cấp:

$$\Phi = \frac{N_1 i_1 + N_2 i_2}{R_{mt}} \quad (1.59)$$

Sau khi biến đổi (1.59), (1.58), sức điện động cuộn dây sơ cấp:

$$e_1 = \frac{N_1^2}{R_{mt}} \frac{d \left(i_1 + i_2 \frac{N_2}{N_1} \right)}{dt} \quad (1.60)$$

Đặt $L_m = \frac{N_1^2}{R_{mt}}$ — điện cảm từ hóa; $i_m = i_1 + i_2 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$ — dòng điện từ hóa;

sức điện động cuộn dây được viết lại:

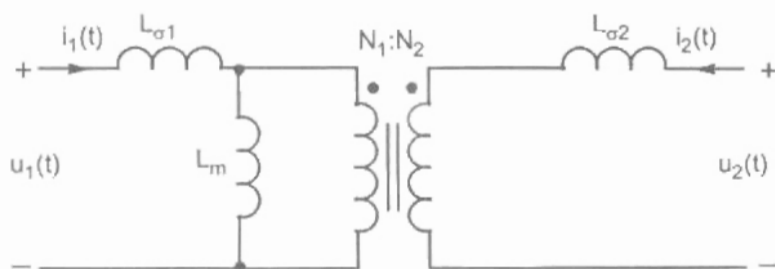
$$e_1 = L_m \cdot \frac{di_m}{dt} \quad (1.61)$$

Điện cảm tản:

Trong các biến áp, có một lượng từ thông chỉ chạy trong một cuộn dây mà không liên hợp với cuộn dây kia, từ thông này có tên gọi là từ thông tản và ký hiệu $\Phi_{\sigma 1}$, $\Phi_{\sigma 2}$. Từ thông tản thường chạy trong không khí. Điện cảm dẫn dòng từ thông này được gọi là điện cảm tản và được tính:

$$L_{\sigma 1} = \frac{N_1 \Phi_{\sigma 1}}{i_1}; L_{\sigma 2} = \frac{N_2 \Phi_{\sigma 2}}{i_2} \quad (1.62)$$

$L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$ — điện cảm tản cuộn dây sơ và thứ cấp.



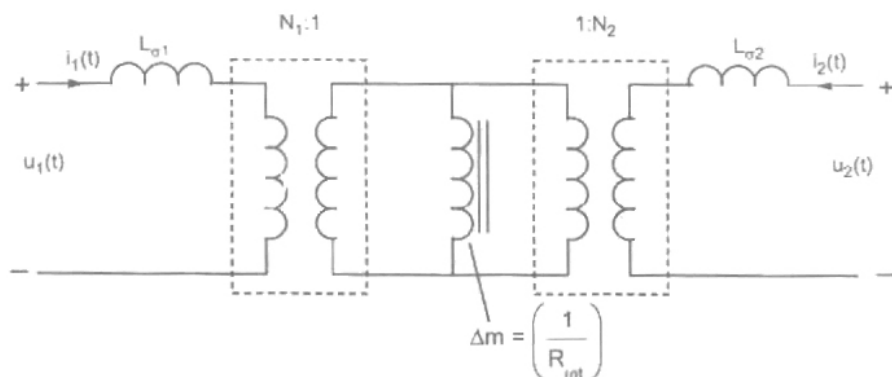
Hình 1.17. Mô hình biến áp hai cuộn dây với điện cảm từ hóa L_m và các điện cảm tản $L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$

Điện cảm riêng của các cuộn dây sơ và thứ cấp:

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= L_{\sigma 1} + L_{m1} = L_{\sigma 1} + M \frac{N_1}{N_2} \\ L_2 &= L_{\sigma 2} + L_{m2} = L_{\sigma 2} + M \frac{N_2}{N_1} \end{aligned} \right\} \quad (1.63)$$

Mặt khác, theo sơ đồ thay thế hình 1.17, các điện cảm từ hóa và hỗ cảm có thể được xác định:

$$\left. \begin{aligned} L_{m1} &= \Lambda_m N_1^2 \\ L_{m2} &= \Lambda_m N_2^2 \\ M &= \Lambda_m N_1 N_2 \\ M &= \frac{L_{m1} N_2}{N_1} = \frac{L_{m2} N_1}{N_2} \\ L_{m2} &= L_{m1} \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (1.64)$$



Hình 1.18. Sơ đồ thay thế máy biến áp

Trong đó: L_{m1} , L_{m2} — điện cảm riêng cuộn dây sơ và thứ cấp;

Λ_m — từ dẫn mạch từ;

M — hồ cảm các cuộn dây.

Phương trình cân bằng điện áp các cuộn dây biến áp:

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2 = M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt}$$

Sự tương đương giữa mạch điện và mạch từ:

Thông số và định luật mạch điện			Thông số và định luật mạch từ		
Đại lượng	Ký hiệu	Đơn vị	Đại lượng	Ký hiệu	Đơn vị
Dòng điện	I	A	Từ thông	Φ	Vebe
			Từ thông móc vòng	ψ	V.s
Mật độ dòng điện,	J	A/m	Từ cảm (mật độ từ thông)	B	T
Điện áp	U	V	Sức từ động MMF	F	A.vg
Cường độ điện trường	E	V/m	Cường độ từ trường	H	A/m
Điện trở $R = \frac{\rho l}{S}$	R	Ω	Từ trở $R_{mt} = \frac{l}{\mu A_c}$	R_{mt}	A.vg/Vebe
Điện trở suất	ρ	m/ Ω	Độ từ thẩm	μ	H/m
Điện dẫn	G	Ω^{-1}	Từ dẫn $\Lambda = \frac{1}{R_{mt}}$	Λ	Vebe/(A.vg)
			Điện cảm	L	H
			Hồ cảm	M	H
			Điện cảm tản	L_σ	H
			Điện cảm từ hóa	L_m	H
Định luật Kirchhoff $\sum i_{nt} = 0$			Định luật Gauss $\sum \Phi_{mt} = 0$		
$\sum u = 0$			$\sum F = 0$		
$I = \frac{U}{R}$			$\Phi = F/R_{mt}$		

1.2. VẬT LIỆU TỪ VÀ ĐẶC TRƯNG CỦA CHÚNG

Vật liệu từ là thành phần tối quan trọng trong thiết kế biến áp và cuộn dây. Các nhà thiết kế vật liệu từ quan tâm tới 3 tiêu chí khi thực hiện một bản thiết kế, đó là: kinh phí, kích thước và hiệu quả. Thông thường, các vật liệu từ được thiết kế sao cho có: hiệu suất lớn nhất, diện dung ký sinh và điện cảm rò nhỏ nhất. Ngày nay vật liệu từ thường được lựa chọn: thép silic, sắt niken (hợp kim pecmali-permalloy), sắt coban (hợp kim permendur), hợp kim vô định hình và ferrit. Cũng có những vật liệu phụ khác nhau như là bột hợp kim pecmali, bột sendust và lõi bột sắt. Từ những vật liệu từ này, người thiết kế sẽ căn cứ vào các đặc tính từ của vật liệu để lựa chọn cho thiết kế của mình. Những đặc tính đó là: độ bão hòa từ B_{BH} ; độ từ thẩm μ ; điện trở suất ρ ; độ từ dư B_d , độ từ kháng H_c . Các kỹ sư làm việc trong lĩnh vực điều khiển thường ít quan tâm đến lĩnh vực vật liệu từ, do đó ở đây giới thiệu sâu hơn một chút về vấn đề này.

1.2.1. Khái quát về vật liệu từ

Vật liệu từ có thể chia thành các nhóm theo tính chất của chúng:

- Vật liệu nghịch từ.
- Vật liệu thuận từ.
- Vật liệu sắt từ.

Độ từ thẩm tương đối của vật liệu thuận và nghịch từ tương đương như nhau. Đặc tính từ hóa của cả hai loại vật liệu có đặc tính tuyến tính.

Vật liệu nghịch từ có độ từ thẩm tương đối μ_r nhỏ hơn. Cường độ từ trường trong vật liệu nghịch từ nhỏ hơn. Nguyên tử của vật liệu nghịch từ không có từ tính lâu dài. Những vật liệu dẫn điện là loại vật liệu nghịch từ. Trong các vật liệu này, có tồn tại một dòng điện chạy trong mạng tinh thể. Dòng điện này chống lại từ trường đặt vào, kết quả là vật liệu không chấp nhận từ trường đặt vào.

Vật liệu thuận từ có độ từ thẩm tương đối μ_r lớn hơn và chúng có độ từ hóa không đáng kể theo từ trường ngoài.

Vật liệu sắt từ có độ từ thẩm μ_r lớn hơn nhiều ($1 \div 100000$). Trong thiết kế điện từ cho các thiết bị điện tử công suất, có ba loại vật liệu: vật liệu sắt từ (là loại vật liệu quan trọng nhất), gồm sắt từ và kim loại. Các vật liệu này có các đường đặc tính từ hóa B-H khác nhau.

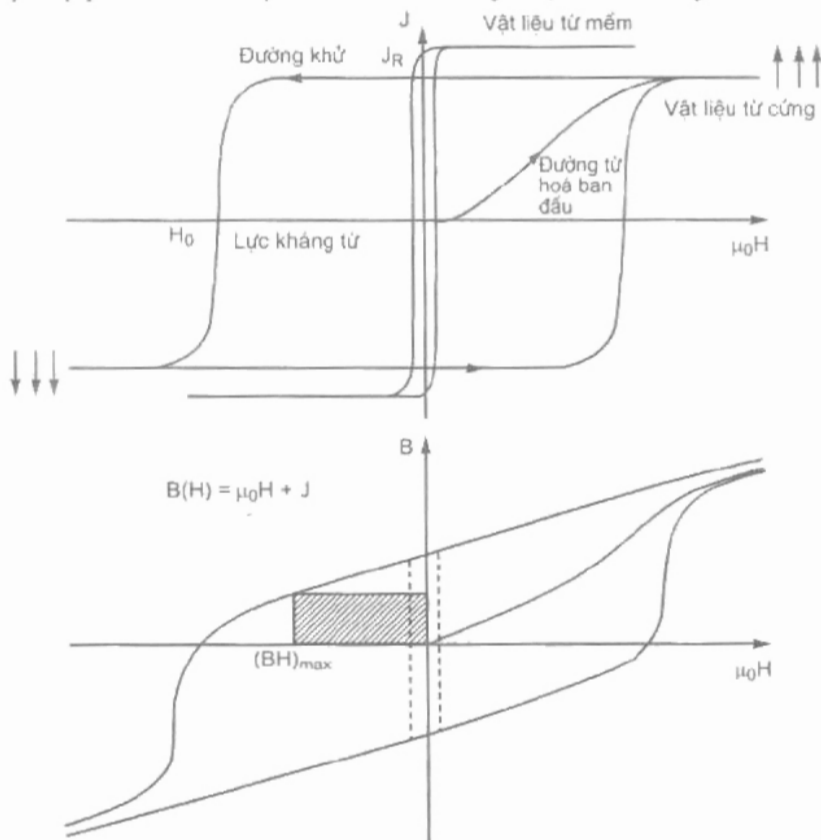
Vật liệu từ trong công nghệ thường được dùng hai loại: vật liệu từ cứng và vật liệu từ mềm. Dưới đây tìm hiểu kỹ hơn về vấn đề này.

1. Vật liệu từ cứng

Vật liệu từ cứng là vật liệu sắt từ, khó khử từ và khó từ hóa. Ý nghĩa của tính từ "cứng" ở đây chính là thuộc tính khó khử từ và khó bị từ hóa, chứ không xuất phát từ cơ tính của vật liệu từ.

Vật liệu từ cứng là loại vật liệu từ được phát hiện và sử dụng sớm trong lịch sử loài người. Người Trung Quốc cho rằng từ những năm 2698 TCN đến 2599 TCN, đã chế tạo ra các kim chỉ nam dùng để xác định phương hướng. Đó là các nam châm có khả năng hút sắt và định hướng Bắc – Nam. Chính sử đầu tiên ghi chép việc chế tạo các la bàn này là đầu đời Nhà Chu (1046 – 771 TCN) và la bàn thực sự xuất hiện nhiều là thế kỷ thứ 7 trước công nguyên (đồng thời ở Trung Quốc và Hy Lạp). Các kim chỉ nam trong la bàn là một dạng của vật liệu từ cứng, là các oxit sắt Fe_3O_4 .

Các vật liệu từ cứng thương phẩm dùng để chế tạo nam châm vĩnh cửu xuất hiện lần đầu tiên vào những năm từ 1740 đến 1750 ở châu Âu và thực sự phát triển mạnh từ cuối thế kỷ 19, đầu thế kỷ 20 đến nay.



Hình 1.19. Đường cong từ trễ

Các đặc trưng của vật liệu từ cứng:

Vật liệu từ cứng có nhiều đặc trưng từ học, sự phụ thuộc của tính chất từ vào nhiệt độ, độ bền, độ chống mài mòn... Dưới đây liệt kê một số đặc trưng quan trọng.

Lực kháng từ:

Lực kháng từ (H_c), là đại lượng quan trọng đặc trưng cho tính từ cứng của vật liệu từ cứng. Vì vật liệu từ cứng là khó từ hóa và khó khử từ, nên ngược lại với vật liệu từ mềm, nó có lực kháng từ cao. Điều kiện tối thiểu là lực kháng từ $> 100 \text{ Oe}$ ($1 \text{ A/cm} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Oe}$), nhưng vật liệu từ cứng phổ biến thường có lực kháng từ cỡ hàng ngàn Oe trở lên. Nguồn gốc của lực kháng từ lớn trong các vật liệu từ cứng chủ yếu liên quan đến dị hướng từ tinh thể lớn trong vật liệu. Các vật liệu từ cứng thường có cấu trúc tinh thể có tính đối xứng kém hơn so với các vật liệu từ mềm và chúng có dị hướng từ tinh thể rất lớn.

Lực kháng từ của vật liệu từ cứng thông thường được biết đến qua công thức:

$$H_c = a \cdot \frac{K_1}{I_s} + b(N_1 - N_2)I_s + c \cdot \frac{\lambda_s \tau}{I_s} \quad (1.65)$$

Trong đó:

– Thành phần thứ nhất có đóng góp lớn nhất với K_1 là hằng số dị hướng từ tinh thể bậc 1, I_s là từ độ bão hòa.

– Thành phần thứ 2, đóng góp nhỏ hơn một bậc với N_1, N_2 là thừa số khử từ do theo hai phương khác nhau.

– Thành phần thứ 3 có đóng góp nhỏ nhất với λ_s là từ giãn bão hòa, τ là ứng suất nội.

– Và a, b, c lần lượt là các hệ số.

Tích trữ năng lượng từ cực đại:

Tích trữ năng lượng cực đại là đại lượng đặc trưng cho độ mạnh yếu của vật liệu từ, được đặc trưng bởi năng lượng từ cực đại có thể tồn trữ trong một đơn vị thể tích vật từ. Đại lượng này có đơn vị là mật độ năng lượng $\text{J}/(\text{m}^3)$.

Tích trữ năng lượng từ cực đại được xác định trên đường cong khử từ (xem hình 1.19) thuộc về góc phần tư thứ 2 trên đường cong từ trễ, là một điểm sao cho giá trị của tích cảm ứng từ B và từ trường H là cực đại. Vì thế, tích năng lượng từ cực đại thường được ký hiệu là $(B.H)_{\max}$.

Vì là tích của B (đơn vị trong hệ CGS^(*) là gauss – G), và H (đơn vị trong CGS là oersted – Oe), nên tích năng lượng từ còn có một đơn vị khác là GOe (đơn vị này thường dùng hơn đơn vị chuẩn SI trong khoa học và công nghệ vật liệu từ $1\text{GOe} = 8.10^{-3} [\text{J/m}^3]$).

Để có tích năng lượng từ cao, vật liệu cần có lực kháng từ lớn và cảm ứng từ dư cao.

Ứng dụng:

Vật liệu từ cứng có thể dùng để chế tạo các nam châm vĩnh cửu hoặc được sử dụng làm vật liệu ghi từ trong các ổ đĩa cứng, các băng từ.

Một số loại vật liệu từ cứng

- *Hợp kim AlNiCo*: Là hợp kim được sử dụng trong nam châm vĩnh cửu, có thành phần chủ yếu là nhôm (Al), niken và coban (Co), có thể có thêm các thành phần phụ gia như đồng (Cu), titan (Ti),... Hợp kim này có từ dư cao, nhưng có lực kháng từ khá nhỏ (thường không vượt quá 2 kOe) và có giá thành cao.

- *Vật liệu từ cứng ferit*: Là các gốm ferit, mà điển hình là ferit bari (BaFe_2O_4), stronsi (SrFe_2O_4) và có thể bổ sung các nguyên tố đất hiếm (ví dụ lanthanum (La)) để cải thiện tính từ cứng. Ferit là vật liệu có 2 phân mạng từ bù trừ nhau, và chứa hàm lượng ôxi lớn nên khó tạo ra từ độ lớn, nhưng lại có lực kháng từ lớn hơn rất nhiều so với AlNiCo. Lực kháng từ của ferit có thể đạt tới 5 kOe. Ferit có điểm mạnh là rẻ tiền, chế tạo dễ dàng và có độ bền cao. Vì thế nó chiếm phần lớn thị phần nam châm thế giới (tới hơn 50%) dù có phẩm chất không phải là cao.

- *Các vật liệu từ cứng liên kim loại chuyển tiếp – đất hiếm*: Điển hình là hai hợp chất $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ và họ SmCo (Samarium–Cobalt), là các vật liệu từ cứng tốt nhất hiện nay. Hợp chất $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ có cấu trúc tứ giác, có lực kháng từ có thể đạt tới trên 10 kOe và có từ độ bão hòa cao nhất trong các vật liệu từ cứng, do đó tạo ra tích năng lượng từ khổng lồ. SmCo là loại vật liệu từ cứng có lực kháng từ lớn nhất (có thể đạt tới 40 kOe), và có nhiệt độ Curie rất cao nên thường sử dụng trong các máy móc có nhiệt độ hoạt động cao (nam châm nhiệt độ cao). Tuy nhiên, nhược điểm của các nam châm đất hiếm là có độ bền không cao (do các nguyên tố đất hiếm dễ

(*) CGS (centimet–gram–second system) là hệ đơn vị của vật lý học dựa trên centimet như là đơn vị của chiều dài, gam là đơn vị khối lượng và giây là đơn vị thời gian. Tất cả các đơn vị sử dụng trong cơ học có thể được xác định bằng các đơn vị cơ bản này.

bị ôxi hóa), có giá thành cao do các nguyên tố đất hiếm có giá thành rất cao, vật liệu NdFeB còn có nhiệt độ Curie không cao lắm (312°C) nên không sử dụng ở điều kiện khắc nghiệt được. Nam châm đất hiếm có tích năng lượng từ kỷ lục là $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ đạt tới 57 MGOe.

- **Hợp kim FePt và CoPt:** Bắt đầu được nghiên cứu từ những năm 1950s. Hệ hợp kim này có cấu trúc tinh thể tứ giác tâm diện (fct), thuộc loại có trật tự hóa học L10, có ưu điểm là có lực kháng từ lớn, có khả năng chống mài mòn, chống ôxi hóa rất cao. Loại hợp kim này hiện nay đang được sử dụng làm vật liệu ghi từ trong các ổ cứng.

- **Nam châm tổ hợp trao đổi đàn hồi:** Loại vật liệu được bắt đầu phát triển từ những thập kỷ 90 của thế kỷ 20, với cấu trúc tổ hợp của 2 loại vật liệu: vật liệu từ mềm cung cấp từ độ bão hòa lớn, vật liệu từ cứng cho lực kháng từ cao, và các hạt tổ hợp ở kích thước nanomet, có liên kết trao đổi với nhau, tạo ra tính chất tổ hợp và sẽ cho loại nam châm mới với tính từ cứng tuyệt vời, lớn hơn tất cả các vật liệu từ cứng đã biết. Tuy nhiên, vào thời điểm hiện tại, các tính chất đạt được trong thực tế còn thua xa dự đoán lý thuyết do chưa tạo được cấu trúc hoàn hảo như dự đoán. Loại vật liệu này vẫn trong giai đoạn nghiên cứu phát triển.

2. Vật liệu từ mềm

Vật liệu từ mềm, hay vật liệu sắt từ mềm (*Soft magnetic material*) là vật liệu sắt từ, "mềm" về phương diện từ hóa và khử từ, có nghĩa là dễ từ hóa và dễ khử từ. Vật liệu sắt từ mềm thường được dùng làm vật liệu hoạt động trong trường bên ngoài đưa vào, ví dụ như lõi biến áp, lõi nam châm điện, các lõi dẫn từ...

- Thông số quan trọng đầu tiên để nói lên tính chất từ mềm của vật liệu từ mềm là lực kháng từ. Lực kháng từ của các vật liệu từ mềm phải nhỏ hơn cỡ 100 Oe. Những vật liệu có tính từ mềm tốt, thậm chí có lực kháng từ rất nhỏ (tới cỡ 0,01 Oe).

- Vật liệu từ mềm có độ từ thẩm ban đầu từ vài trăm, đến vài ngàn, các vật liệu có tính từ mềm tốt có thể đạt tới vài chục ngàn, thậm chí hàng trăm ngàn.

- Có những vật liệu sắt từ mềm có độ từ thẩm cực đại rất cao, tới hàng vài trăm ngàn. Ví dụ như permalloy, hay hợp kim nano tinh thể Finemet...

- Cảm ứng từ bão hòa, B_{BH} hay từ độ bão hòa M_{BH} : Vật liệu từ mềm thường có từ độ bão hòa rất cao. Loại có từ độ cao nhất là hợp kim Fe65Co35 có từ độ bão hòa đạt tới 2,34 T.

Các thông số đáng chú ý khác:

• **Tổn hao dòng xoáy:** Như đã biết, vật liệu từ mềm được sử dụng trong từ trường ngoài, và nếu sử dụng trong trường xoay chiều, sẽ sinh ra các dòng điện Foucault gây mất mát năng lượng và tỏa nhiệt. Công suất tổn hao Foucault được tính theo công thức:

$$P_{\text{Foucault}} = \frac{4 \cdot B_{BH}^2 \cdot d^2 \cdot k_f^2 \cdot f^2}{3 \cdot \gamma \cdot \rho} \quad (1.66)$$

với: B_{BH} – cảm ứng từ bão hòa của lõi;
 d – độ dày của lõi;
 k_f – một hệ số đặc trưng;
 f – tần số từ trường xoay chiều;
 γ – khối lượng riêng vật liệu;
 ρ – điện trở suất.

Từ công thức này lý giải được việc các lõi biến áp tôn Si (FeSi) được chế tạo thành các lá mỏng nhằm làm giảm độ dày, giảm tổn hao dòng xoáy. Đồng thời, lõi FeSi chỉ có thể sử dụng cho biến áp tần số thấp vì ở tần số cao, tổn hao sẽ rất lớn (do FeSi có điện trở suất thấp), trong khi các vật liệu gốm ferit có thể sử dụng ở các tần số rất cao do chúng có bản chất gốm, có điện trở suất rất lớn, làm giảm tổn hao dòng xoáy.

• **Tổn hao trễ (Hysteresis Loss):** khi vật liệu từ mềm được sử dụng trong trường ngoài, nó sẽ bị từ hóa và tạo ra chu trình trễ, và sẽ có năng lượng bị tổn hao cho việc từ hóa vật liệu.

• **Đặc trưng tần số:** khi sử dụng ở tần số càng cao, phẩm chất của vật liệu càng bị suy giảm, do đó sự thay đổi của phẩm chất theo tần số là một thông số rất đáng quan tâm trong các bộ biến đổi công suất.

• **Từ giảo:** về bản chất, từ giảo là sự thay đổi hình dạng vật liệu từ dưới tác dụng của từ trường ngoài. Việc khử từ giảo giúp cho việc tạo ra tính từ mềm tốt. Có những vật liệu có từ giảo bằng 0 như vật liệu vô định hình nền Co.

1.2.2. Các vật liệu từ mềm và đặc trưng của chúng

1. Thép silic



Thép silic là một trong những hợp kim hàng đầu được sử dụng làm mạch từ trong máy biến áp và các cuộn cảm. Nó được cải thiện qua từng năm và có lẽ là vật liệu từ được sử dụng rộng rãi, phổ biến nhất. Một trong những hạn chế của việc sử dụng thép là vật liệu

từ trở nên già hơn và tổn hao tăng. Với việc thêm silic vào thép, lợi thế đã tăng gấp đôi: nó làm tăng điện trở suất, do đó làm giảm tổn hao dòng xoáy và cải thiện tính bền vững theo thời gian.

Thép silic làm cho mật độ từ thông bão hòa tăng cao, mật độ từ thẩm khá tốt ở mật độ từ thông cao, tổn hao ít hơn ở tần số thấp. Một trong những cải tiến quan trọng nhất từ thép silic là trong quá trình cán nguội, định hình, AISI M6. Thép định hình M6 có độ từ thẩm cao và tổn hao đặc biệt thấp. Nó thường được sử dụng trong những ứng dụng đòi hỏi hiệu suất cao và tổn hao là nhỏ nhất.

Bảng 1.2. Thông số của một số vật liệu từ

Loại vật liệu	Tên vật liệu	Thành phần	Độ từ thẩm ban đầu μ	Từ cảm B (T)	Nhiệt độ tối đa $^{\circ}\text{C}$	Cường độ từ trường (Oe)	Tỷ trọng g/cm^3	Hệ số trọng lượng	Tần số làm việc
Hợp kim sắt	Silic	3–97 SiFe	1500	1,5–1,8	750	0,4–0,6	7,63	1,000	<2kHz
	Supremendor	49–49–2 CoFeV	800	1,9–2,2	940	0,15–0,35	8,15	1,068	<1kHz
	Orthonol	50–50 NiFe	2000	1,42–1,58	500	0,1–0,2	8,24	1,080	<2kHz
	Permaloy	80–20 NiFe	25000	0,66–0,82	460	0,02–0,04	8,73		<25kHz
	Supermaloy	78–17–5 NiFeMo	10000–50000	0,65–0,82	460	$(3–8) \cdot 10^{-3}$	8,76	1,148	<25kHz
Lõi vật liệu vô định hình	26055C	81–13,5–3,5 FeBSi	1500	1,5–1,6	370	0,4–0,6	7,32	0,997	<250kHz
	2714AF	66–15–4 CoSiFe	2000	0,5–0,65	205	0,1–0,2	7,59	0,995	<250kHz
	Nanocrystal	73,5–1–15,5 FeCuSi	30000	1,0–1,2	460	0,02–0,04	7,73	1,013	<250kHz
Lõi ferit	Ferit	MnZn	750–15000	0,5	300	0,04–0,25	4,8	4,8	<2MHz
		NiZn	15–1500	0,5	450	0,3–0,5	4,8		<100MHz
	MnZn	K	1500	0,48	>230	0,2	4,7		
		R	2300	0,5	>230	0,18	4,8		
		P	2500	0,5	>230	0,18	4,8		
		F	5000	0,49	>250	0,2	4,8		
		W	10000	0,43	>125	0,15	4,8		
		H	15000	0,43	>125	0,15	4,8		
Lõi bột ép	MPP	80–20 NiFe	14–550	0,7	450	0,3	8,5		
	High Flux	50–50 NiFe	14–160	1,5	260	1	8		
	Sendust	85,9–6 FeSiAl	26–125	1	740	0,5	6,15		
	Iron Powder	Fe	40–100	0,5–1,4	770	5,0–9,0	3,3–7,2		

$$\text{A/cm} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{Oe (oersteds)}$$

2. Hợp kim Nikel cán mỏng

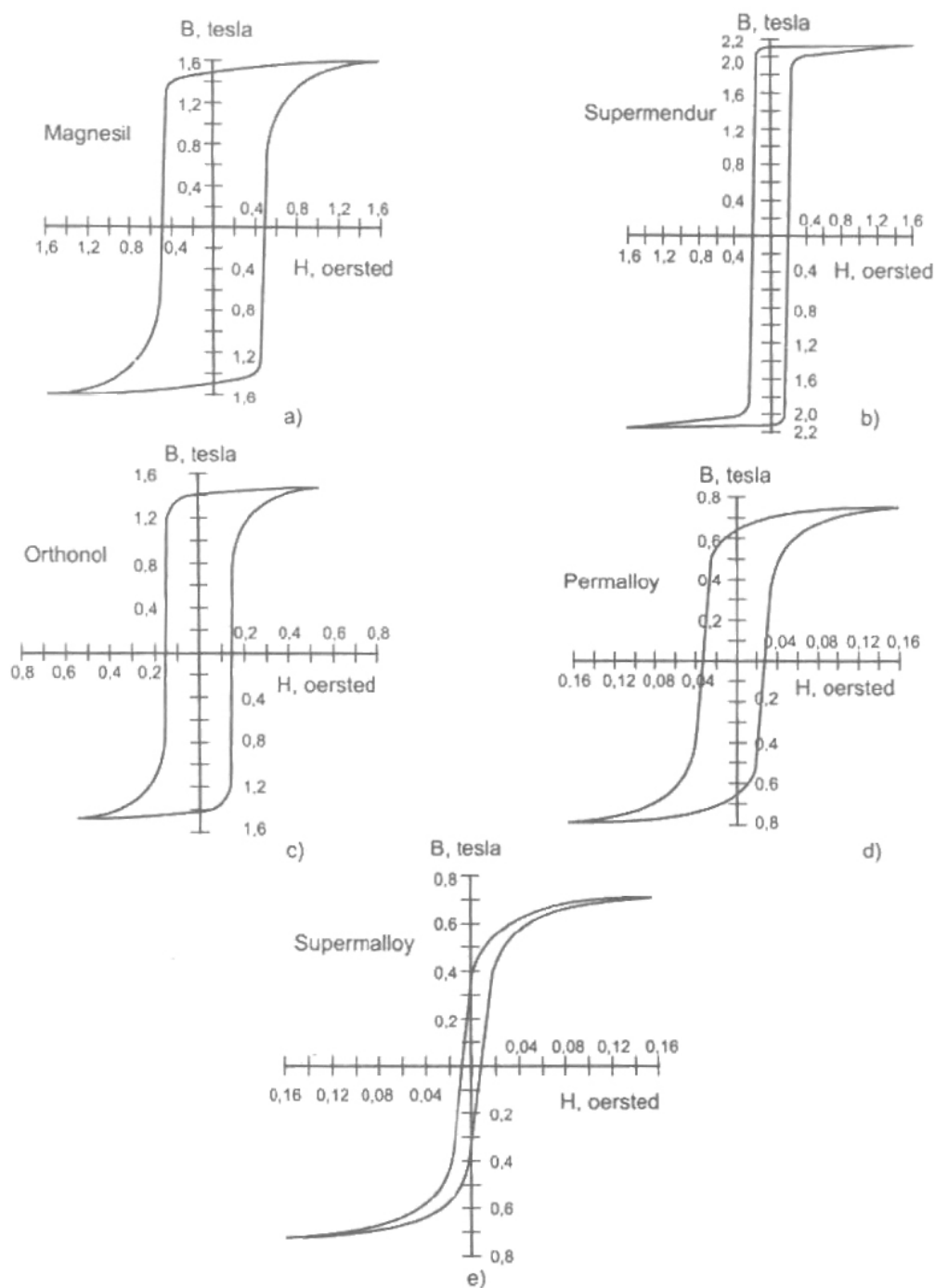


Hợp kim có độ từ thẩm cao được chế tạo dựa trên vật liệu sắt-nikel. Mặc dù hợp kim sắt-nikel được Hopkinson tìm ra từ năm 1889, nó vẫn không được nghiên cứu. Cho đến khi Elmen bắt đầu nghiên cứu khoảng năm 1913, dựa trên những đặc tính trong từ trường yếu và hiệu ứng xử lý nhiệt, tầm quan trọng của hợp kim sắt-nikel đã được thấy rõ. Elmen gọi hợp kim sắt-nikel của ông là "Permalloy", và bằng sáng chế của ông đã được cấp năm 1916. Cấu trúc được quan tâm hơn của ông là hợp kim 78Ni-Fe. Một thời gian ngắn sau Elmen, Yensen đã bắt đầu nghiên cứu độc lập mà kết quả là cho ra hợp kim 50Ni-50Fe, hợp kim mà diện trở suất và độ từ thẩm thấp hơn, nhưng độ bão hòa lớn hơn hợp kim permalloy 78 (1,5 tesla so với 0,75 tesla), khiến nó trở nên hữu ích hơn trong các thiết bị công suất.

Sự cải tiến hợp kim Ni-Fe đã được hoàn tất bởi kỹ thuật nhiệt luyện trong môi trường khí hiđro, lần đầu tiên được Yensen công bố. Sự cải tiến tiếp theo được thực hiện bởi việc sử dụng vật liệu định hình và nhiệt luyện nó trong một từ trường và đồng thời trong môi trường khí hiđro. Công việc này đã được Kelsall và Bozorth thực hiện. Sử dụng hai cách này, một vật liệu mới gọi là *supermalloy* đã ra đời. Nó có độ từ thẩm cao hơn, độ kháng từ thấp hơn và mật độ từ thông ngang bằng permalloy 78. Có lẽ nhân tố quan trọng nhất của lĩnh vực này là vật liệu từ được nhiệt luyện, nó không chỉ làm tăng độ từ thẩm, mà còn cho đường cong từ hóa vuông, rất quan trọng trong các thiết bị biến đổi công suất tần số cao.

Để có diện trở cao, nhằm mục đích tổn hao lõi sẽ nhỏ hơn trong những ứng dụng tần số cao, có hai cách để tiếp cận: 1 - thay đổi hình dạng hợp kim, 2 - phát triển những oxit từ tính. Kết quả là hợp kim dạng cán mỏng và bột phát triển vào những năm 1920 và cán mỏng vào những năm 1950. Sự phát triển của cán mỏng được thúc đẩy bởi những nhu cầu của hàng không vũ trụ và trong các bộ biến đổi điện tử công suất từ những năm 1960 đến nay.

Hợp kim Ni-Fe có thể đạt độ dày tới 2mil; 1mil; 0,5mil; 0,25 và 0,125mil (1mil = 10^{-3} inch = $25,4 \cdot 10^{-3}$ mm = 0,0245mm = 0,028 yd = 0,083 ft). Vật liệu có thể đạt được với đặc tính từ trễ B-H tròn hoặc vuông. Nhờ đó người thiết kế có nhiều sự lựa chọn hơn trong thiết kế. Những đặc tính của một số hợp kim sắt phổ biến nhất được cho trong bảng 1.2. Đường đặc tính B-H của hợp kim sắt được vẽ tương ứng trên hình 1.20 a, b, c, d, e.



Hình 1.20. Đặc tính B-H của các loại hợp kim sắt

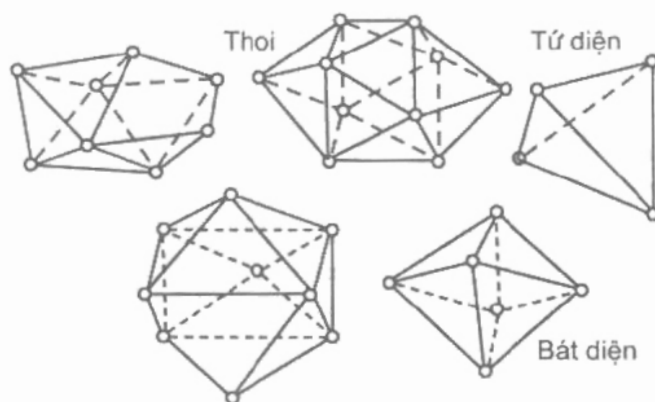
3. Vật liệu vô định hình



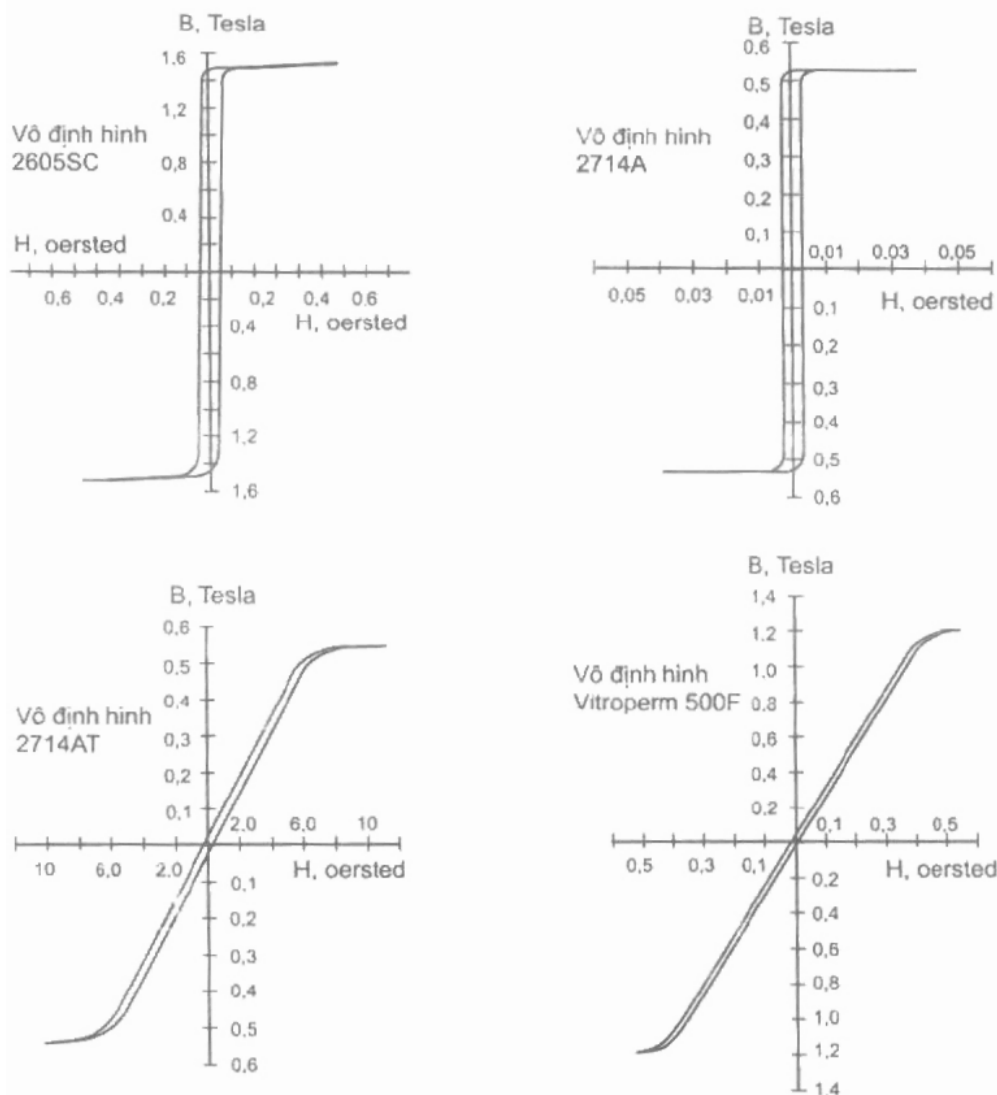
Vật liệu vô định hình là chất rắn không có trật tự (hay cấu trúc tuần hoàn) về vị trí cấu trúc nguyên tử (chất rắn có trật tự về vị trí cấu trúc nguyên tử gọi là chất rắn tinh thể). Hầu hết các nhóm vật liệu có thể thấy hoặc được cấu trúc từ dạng vô định hình. Ví dụ, thủy tinh là gốm vô định hình, nhiều polymer (như polystyrene) là vô định hình.

Cấu trúc vô định hình. Cấu trúc tinh thể là cấu trúc có tính chất sắp xếp tuần hoàn trong mạng tinh thể. Cấu trúc vô định hình là trạng thái của vật liệu, gồm những nguyên tử được sắp xếp một cách bất trật tự, sao cho một nguyên tử có các nguyên tử bao bọc một cách ngẫu nhiên nhưng xếp chặt xung quanh nó. Khi xét một nguyên tử làm gốc thì bên cạnh nó với khoảng cách d dọc theo một phương bất kỳ (d là bán kính nguyên tử) có thể tồn tại một nguyên tử khác nằm sát với nó, nhưng ở khoảng cách $2d, 3d, 4d...$ thì khả năng tồn tại của nguyên tử loại đó giảm dần. Cách sắp xếp như vậy tạo ra một trật tự nào đó. Vật rắn vô định hình được mô tả giống như những quả cầu cứng xếp chặt trong túi cao su bó chặt một cách ngẫu nhiên tạo nên trật tự gần (theo mô hình quả cầu rắn xếp chặt của Berna và Scot).

Cấu trúc vô định hình được hình thành từ năm loại mạng chính (hình 1.21), tỷ lệ nguyên tử chiếm 65% thể tích, còn lại 35% là lỗ trống, và số lân cận gần nhất là 5.



Hình 1.21. Năm loại mạng cơ bản trong cấu trúc trật tự gần theo mô hình Berna



Hình 1.22. Đặc tính B-H của các loại vật liệu vô định hình

Hợp kim vô định hình và nano tinh thể:

Là các hợp kim nền sắt hay coban ở trạng thái vô định hình, do đó có điện trở suất cao hơn nhiều so với các hợp kim tinh thể, đồng thời có khả năng chống ăn mòn, độ bền cơ học cao, và có thể sử dụng ở tần số cao hơn so với các vật liệu tinh thể nền kim loại. *Vật liệu vô định hình không có cấu trúc tinh thể, nên triệt tiêu dị hướng từ tinh thể, vì thế nó có tính từ mềm rất tốt.* Vật liệu vô định hình nền Co còn có từ giảo bằng 0 nên còn có lực kháng từ cực nhỏ. Khi kết tinh từ trạng thái vô định hình, ta có

vật liệu nano tinh thể, là các hạt nano kết tinh trên nền vô định hình dư, triệt tiêu từ giảo từ tổ hợp hai pha vô định hình và tinh thể nên có tính từ mềm cực tốt và có thể sử dụng ở tần số cao. Vật liệu từ mềm nano tinh thể thương phẩm tốt nhất là [FINEMET] ($\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$) được Yoshizawa (Hitachi Metal Ltd, Nhật Bản) phát minh năm 1988 và nhiều thế hệ khác phát triển sau đó.

Có 4 vật liệu vô định hình thường được sử dụng trong những ứng dụng tần số cao: 2605SC, 2714A, 2714AF và vitroperm 500F.

Vật liệu 2714A là một vật liệu coban có điện trở suất, tỷ số $\frac{B_d}{B_{BH}}$ cao và tổn hao lõi thấp, làm cho nó phù hợp với các máy biến áp hàng không vũ trụ cao tần.

Vật liệu vitroperm 500F có vật liệu nền là sắt với độ bão hòa 1,2 tesla và thích hợp tốt cho các máy biến áp cao tần và các cuộn cảm có khe hở. Tổn hao lõi cao tần cho vật liệu 500F thấp hơn ở một số ferit, ngay cả hoạt động trong mật độ từ thông cao. Những đặc tính vô định hình trong số những vật liệu phổ biến nhất được cho ở bảng 1.2. Đặc tính B-H của mỗi vật liệu từ tương ứng được cho trên hình 1.22.

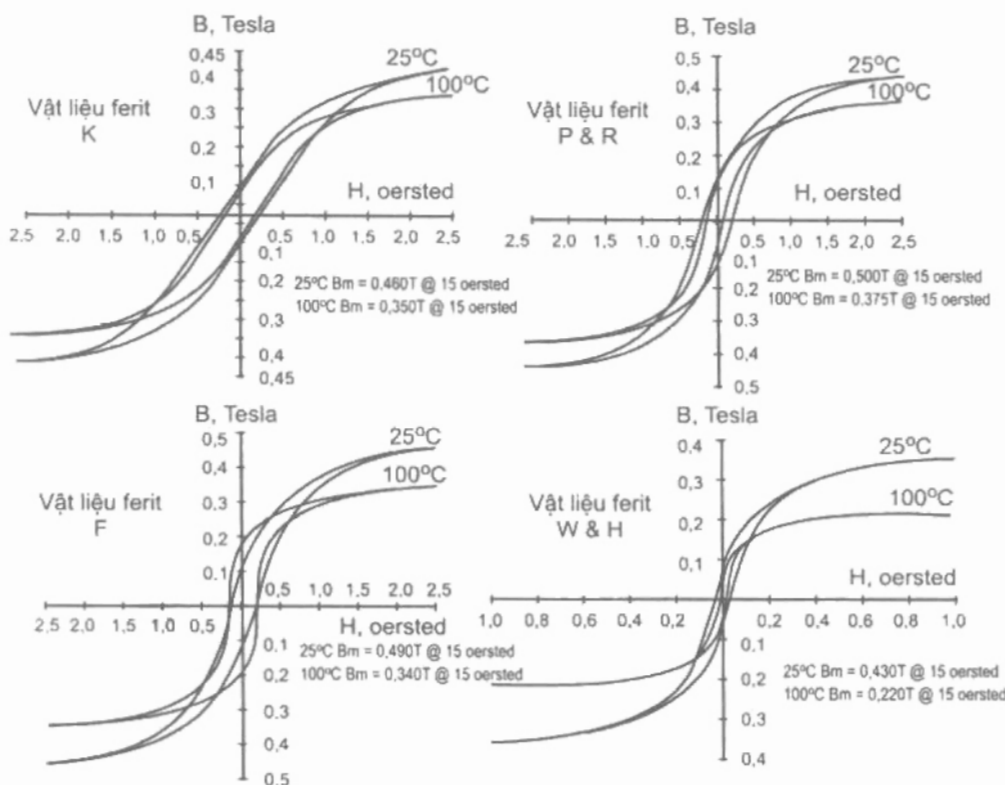
4. Vật liệu từ ferit



Trong những ngày đầu của nền công nghiệp điện, nhu cầu vật liệu từ thiết yếu đã được đáp ứng bởi sắt và hợp kim từ tính của nó. Tuy nhiên với sự tiếp cận tần số cao hơn, công nghệ tương ứng để giảm tổn hao dòng xoáy (sử dụng lõi cán mỏng hay lõi bột sắt) không còn hiệu suất cao và hiệu quả kinh tế nữa. Điều này đã khuyến khích một sự quan tâm mới tới vật liệu từ, lần đầu tiên được công bố bởi S. Hilpert người Đức năm 1909. Nó đã được ngầm hiểu rằng, nếu điện trở suất của oxit cao có thể phối hợp với đặc trưng từ tính mong muốn, kết quả là một vật liệu phù hợp một cách đặc biệt với các hoạt động ở tần số cao cần được chế tạo.

Những nghiên cứu phát triển vật liệu đã được nhà khoa học thực hiện trong các phòng thí nghiệm khác nhau trên khắp thế giới, ví dụ như V. Kato, T. Takei, và N. Kawai vào năm 1930 ở Nhật và J. Snoek của phòng nghiên cứu của Philip vào giai đoạn 1935 – 1945 ở Hà Lan. Vào khoảng 1945, Snoek đã đặt những nguyên tắc cơ bản cho vật lý học và công nghệ về vật liệu ferit. Vào năm 1948, học thuyết Neel về

tính chất sắt từ đã cung cấp những hiểu biết về lý thuyết của loại vật liệu từ này.



Hình 1.23. Đường cong từ hóa của một số vật liệu Ferrit

Ferit thuộc đồ gốm sứ, là vật liệu đồng nhất bao gồm các oxit; oxit sắt là thành phần chính. Ferit mềm có thể được chia làm hai loại chính: mangan-kẽm (Mn-Zn) và niken-kẽm (Ni-Zn). Trong mỗi loại, sự thay đổi thành phần hóa học, hoặc công nghệ chế tạo có thể chế tạo ra nhiều chủng loại vật liệu Mn-Zn và Ni-Zn khác nhau. Hai họ vật liệu ferit Mn-Zn và Ni-Zn bổ sung lẫn nhau và cho phép sử dụng vật liệu ferit từ tần số âm tần đến vài trăm MHz. Các nhà sản xuất không muốn sử dụng ferit Mn-Zn với Ni-Zn trong cùng một vùng, hoặc cùng thiết bị, bởi cái này sẽ làm hỏng cái kia và sẽ dẫn đến kém hiệu suất. Sự khác nhau cơ bản giữa Mn-Zn và Ni-Zn được cho ở bảng 1.3.

Trong bảng 1.3 cho thông số một số vật liệu ferit phổ biến nhất K, R, P, F, W, H của hãng Magnetic.

Ferit Mn-Zn. Loại ferit Mn-Zn là loại phổ biến nhất, và được sử dụng trong nhiều lĩnh vực hơn ferit Ni-Zn. Ferit Mn-Zn có nhiều loại

khác nhau (các loại K, R, P, F, W, H). Ferit Mn–Zn được sử dụng chủ yếu ở tần số nhỏ hơn 2MHz.

Ferit Ni–Zn. Nhóm vật liệu ferit Ni–Zn được đặc trưng bởi điện trở suất cao của nó, Một vài đại lượng cao hơn ferit Mn–Zn. Bởi điện trở suất cao hơn, Ferit Ni–Zn là vật liệu được chọn cho các hoạt động trong dải tần từ 1.2 MHz đến vài trăm MHz.

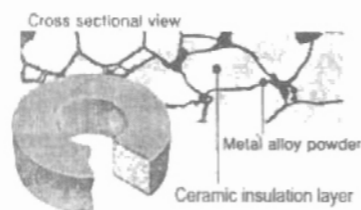
Đường đặc tính từ hóa B–H của Ferit được vẽ trên hình 1.23.

Hiện nay có nhiều hãng trên thế giới chế tạo lõi từ Ferit như: Magnetic, Ferroxcube, Fair–Rite, Siemens, TDK Corp., Tokin ... Các hãng này chế tạo vật liệu từ Ferit có các thông số không hoàn toàn trùng khớp nhau, bảng 1.3 cho ký hiệu và thông số độ từ thẩm μ các loại vật liệu từ Ferit của một số hãng chế tạo.

Bảng 1.3. So sánh độ từ thẩm ferit của một số hãng chế tạo

Magnetic	K	R	P	F	J	W	H
Độ từ thẩm μ	1500	2300	2500	3000	5000	10000	15000
Sử dụng	CS	CS	CS	CS	Lọc	Lọc	Lọc
Ferroxcube	3F35	3F3	3C94	3C81	3E27	3E5	3E7
Độ từ thẩm μ	1400	2000	2300	2700	6000	10000	15000
Siemens	N49	N67	N87	T41	T35	T38	T46
Độ từ thẩm μ	1300	2100	2200	3000	6000	10000	15000
TDK Corp.	PC50	PC40	PC44	H5A	HP5	H5C2	H5C3
Độ từ thẩm μ	1400	2300	2400	3300	5000	10000	15000
Ceramic Mag	MN67	MN80	MN80	MN8CX	MN60	MC25	MC15K
Độ từ thẩm μ	1000	2000	2000	3000	6000	10000	15000
Ferit Int.	TSF–5099	TSF–7099	TSF–7070	TSF–8040	TSF–5000	TSF–010K	
Độ từ thẩm μ	2000	2000	2200	3100	5000	10000	
MMG		F44	F5	F5C	F10	F39	
Độ từ thẩm μ		1900	2000	3000	6000	10000	
Fair–Rite			78		75	76	
Độ từ thẩm μ			2300		5000	10000	
Tokin		HBM	825	B3100	H5000	H12000	
Độ từ thẩm μ							
CS – cho ứng dụng công suất							

5. Lõi bột ép



Hợp kim (Ni-Fe) có độ từ thẩm cao được phát hiện vào những năm 20 của thế kỷ XX, được sử dụng rất thành công trong sản xuất lõi.

Vào đầu những năm 1940, một vật liệu mới, tên thương mại là Molybdenum Permalloy

Powder (MPP), đã được phòng thí nghiệm điện thoại Bell nghiên cứu và chế tạo. Vật liệu mới này được phát triển cho các cuộn phụ tải, các cuộn lọc, và máy biến áp tần số âm thanh và tần số sóng mang trong các điện thoại. Cách sử dụng của những lõi như vậy đã được mở rộng cho nhiều mạch điện công nghiệp và quốc phòng. Sự ổn định của độ từ thẩm và tổn hao lõi theo thời gian, nhiệt độ và các mức độ từ thông khác nhau là tối quan trọng trong việc thiết kế những mạch cộng hưởng và những mạch định thời. Vật liệu mới này đã cho độ tin cậy và hiệu suất cao hơn tất cả các vật liệu lõi bột trước đó.

Trong lĩnh vực điện tử công suất, lõi MPP đã có những tác dụng lớn trong những bộ nguồn chuyển mạch. Việc sử dụng lõi MPP và các van công suất MOSFET đã cho phép tăng tần số, dẫn đến sự hoạt động chắc chắn hơn và giảm khối lượng trong hệ thống. Khi bộ nguồn cấp điện (bộ nguồn là trái tim của cả hệ thống) được thiết kế một cách chính xác, sự tăng nhiệt độ từ từ, hệ thống sẽ ổn định và có tuổi thọ cao. Trong bộ nguồn này, có những điện cảm chuyển mạch, những cuộn kháng chặn, những bộ lọc kiểu dao động thông thường, những bộ lọc đầu vào, những bộ lọc đầu ra, những máy biến áp công suất, máy biến dòng và các máy biến áp xung. Không phải tất cả chúng đều được thiết kế tối ưu khi sử dụng lõi MPP. Nhưng trong một vài trường hợp, lõi MPP là sự lựa chọn duy nhất khi lắp ráp trong không gian sẵn có với sự tăng nhiệt độ thích hợp.

Sự phát triển của lõi bột sắt ép như là một vật liệu từ cho những cuộn cảm, được xuất phát từ nỗ lực của các kỹ sư của phòng thí nghiệm điện thoại Bell để tìm ra vật liệu thay thế cho lõi sắt nguyên chất. Lõi bột sắt được Heaviside đưa vào sử dụng, vào năm 1887, và Dolezalek vào năm 1900.

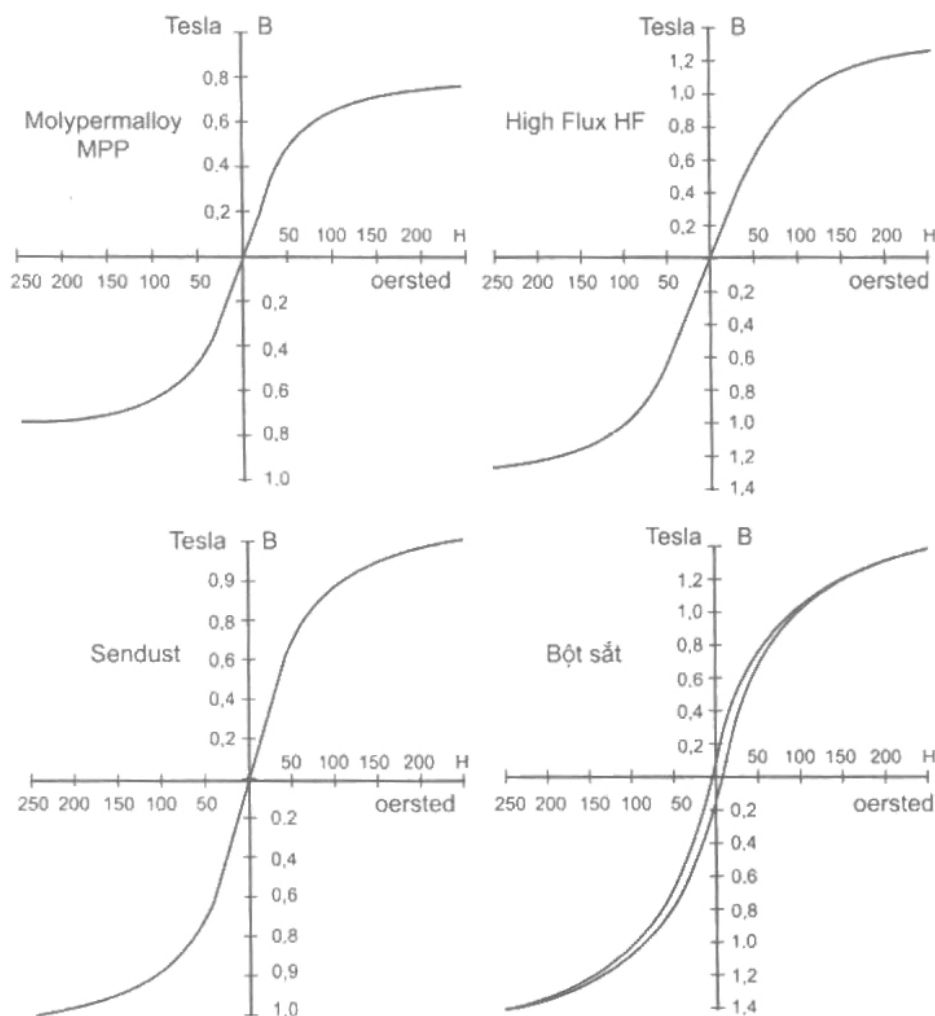
Lõi bột sắt đầu tiên có những thuộc tính thương mại có giá trị đã được Buckner Speed mô tả, ở Mỹ (U.S.) thông qua bằng sáng chế số 1274952,

vào năm 1918. Buckner Speed và G.W. Elman đã công bố bài báo trên "the A.I.E.E" (những văn kiện hội nghị khoa học "Những đặc tính từ của lõi bột sắt ép") vào năm 1921. Bài báo này đã công bố một vật liệu từ thích hợp tốt cho chế tạo lõi của các cuộn cảm và máy biến áp nhỏ và đã được sử dụng trong hệ thống điện thoại. Những lõi bột sắt này được làm từ những bột sắt điện phân. Vật liệu này đã được tôi, sau đó được cách điện bởi việc oxí hóa bề mặt của những hạt. Theo cách này, người ta đã đạt được một lớp cách ly rất mỏng và bền, lớp này sẽ không bị hỏng khi lõi được nén, ép lại. Một dung dịch vecni được thêm vào bột cách ly như là keo và chất cách ly. Đó là cách chế tạo lõi bột sắt hình xuyên của hãng Western Electric Company đến tận năm 1929. Ngày nay, lõi bột sắt được sản xuất bằng nhiều cách, sử dụng bột sắt có độ tinh khiết cao hơn và một lượng nhiều chất keo và chất cách ly bên ngoài. Những bột đã được chuẩn bị trên được nén dưới áp suất rất lớn để tạo thành một lõi đặc. Quá trình này tạo ra một cấu trúc từ tính với khe hở được phân bố theo một kiểu nào đấy. Mật độ từ thông bão hòa lớn vốn có của sắt, được kết hợp với khe hở chế tạo ra vật liệu làm lõi với độ từ thẩm ban đầu nhỏ hơn 100 và với khả năng dự trữ năng lượng cao.

Dòng một chiều không phát sinh tổn hao lõi, nhưng dòng xoay chiều hoặc dòng nhấp nhô thì lại sinh ra tổn hao lõi. Vật liệu bột sắt có tổn hao lõi cao hơn một số vật liệu khác. Hầu hết những cuộn cảm định thiên một chiều có tỷ lệ dòng nhấp nhô tương đối nhỏ, vì vậy tổn hao lõi sẽ là tối thiểu. Tuy nhiên, tổn hao lõi đôi khi sẽ trở thành nhân tố giới hạn trong những ứng dụng với những dòng nhấp nhô tương đối cao ở tần số cao. *Bột sắt không được khuyến cáo cho các cuộn cảm dùng cho dòng gián đoạn hoặc máy biến áp với dòng dao động lớn.*

Tổn hao thấp, lõi bột sắt là loại được sử dụng điển hình ngày nay, những ứng dụng biến đổi công suất tần số cao và thấp, cho các chế độ vi sai, các cuộn cảm công suất đầu ra và đầu vào. Vì lõi bột sắt có độ từ thẩm thấp như vậy, nên cần một số vòng dây tương đối lớn để có điện cảm thích hợp. Nhược điểm của việc sử dụng lõi bột thường được thấy kích thước lớn và hiệu suất thấp hơn của các thành phần từ khác.

Có 4 loại bột tiêu chuẩn sẵn có trên thị trường cho những thiết bị từ tính công suất: lõi bột Molypermalloy (MPP) ; lõi bột từ thông lớn (High Flux – HF) ; lõi bột Sendust ; và lõi bột sắt. Thành phần hóa học và thông số của các loại lõi này được cho trong bảng 1.2, đặc tính từ hóa B-H vẽ trên hình 1.24.



Hình 1.24. Đặc tính từ hóa của các loại lõi bột ép

1.2.3. Tổn hao lõi

Người thiết kế những phần diện từ cho các thiết bị điện tử công suất, như là máy biến thế và cuộn cảm, đòi hỏi sự hiểu biết rõ về những đặc tính điện và từ của vật liệu từ được sử dụng trong những thiết bị này. Có hai đặc tính từ được quan tâm, đặc tính dòng một chiều và đặc tính dòng xoay chiều. Vòng từ trễ B-H một chiều là một chỉ dẫn rất hữu ích để so sánh những loại vật liệu từ khác nhau. Những đặc tính từ xoay chiều thì được những người thiết kế quan tâm hơn. Một trong những đặc tính xoay chiều quan trọng nhất là tổn hao lõi. Tổn hao lõi xoay chiều là một hàm của vật liệu từ, bề dày của vật liệu từ, mật độ từ thông B_{ac} , tần

số f và nhiệt độ làm việc. Vì vậy, sự lựa chọn vật liệu từ dựa vào những đặc tính tốt nhất tối ưu về giá thành, kích thước và hiệu suất.

Các nhà sản xuất tính toán tổn hao lõi bằng công thức:

$$\Delta P_{Fe} = W_g \cdot M_{Fe} \quad (1.67)$$

Trong đó: W_g – suất tổn hao theo trọng lượng;

M_{Fe} – trọng lượng lõi.

Suất tổn hao theo trọng lượng được tính từ công thức:

$$W_g = k_{Fe} \cdot f^{(m)} \cdot B^{(n)} \quad (1.68)$$

Trong đó:

k_{Fe} – hệ số tổn hao lõi, hệ số này là hàm của f , B , T ;

B – giá trị từ cảm đỉnh – đỉnh của điện cảm với sóng xoay chiều;

f – tần số làm việc;

m – số mũ tần số;

n – số mũ từ cảm.

Các hệ số k_{Fe} , m , n của các loại vật liệu từ bột ép được cho trong bảng 1.4, vật liệu từ hợp kim sắt trong bảng 1.5, vật liệu từ vô định hình trong bảng 1.6, vật liệu ferit trong bảng 1.7

Bảng 1.4. Các hệ số của vật liệu từ bột ép

Vật liệu	Độ từ thẩm	Hệ số k_{Fe}	Hệ số m	Hệ số n
MPP	14	0,005980	1,320	2,210
MPP	26	0,0011 90	1,410	2,180
MPP	60	0,000788	1,410	2,240
MPP	125	0,001780	1,400	2,310
MPP	147–160–173	0,000489	1,500	2,250
MPP	200–300	0,000250	1,640	2,270
MPP	550	0,001320	1,590	2,360
High Flux	14	4,8667(10 ⁻⁷)	1,26	2,52
High Flux	26	3,0702(10 ⁻⁷)	1,25	2,55
High Flux	60	2,0304(10 ⁻⁷)	1,23	2,56
High Flux	125	1,1627(10 ⁻⁷)	1,32	2,59
High Flux	147	2,3209(10 ⁻⁷)	1,41	2,56
High Flux	160	2,3209(10 ⁻⁷)	1,41	2,56
Sendust	26	0,000693	1,460	2,000
Sendust	60	0,000634		
Sendust	75	0,000620		
Sendust	90	0,000614		
Sendust	125	0,000596		

Bảng 1.5. Các hệ số của vật liệu từ hợp kim sắt

Vật liệu	Độ dày mil	Tần số	Hệ số k_p	Hệ số m	Hệ số n
50/50 Ni-Fe	1,00		0,0028100	1,210	1,380
	2,00		0,0005590	1,410	1,270
	4,00		0,0006180	1,480	1,440
Supexmendur	2,00		0,0236000	1,050	1,300
	4,00	400Hz	0,0056400	1,270	1,360
Permalloy 80	1,00		0,00007 74	1,500	1,800
	2,00		0,0001650	1,410	1,770
	4,00		0,0002410	1,540	1,990
Supermalloy	1,00		0,0002460	1,350	1,910
	2,00		0,0001790	1,430	2,150
	4,00		0,0000936	1,660	2,060
Silicon	1,00		0,0593000	0,995	1,740
	2,00		0,0059700	1,260	1,730
	4,00		0,0035700	1,320	1,710
	12,00		0,0014900	1,550	1,870
	14,00		0,0005570	1,680	1,850
	24 M27 nom-or	50-60 kHz	0,0386000	1,000	2,092

Bảng 1.6. Các hệ số của vật liệu từ vô định hình

Vật liệu	Độ dày mil	Hệ số k_p	Hệ số m	Hệ số n
2605SC	0,80	$8,79(10^{-6})$	1,730	2,230
2714A	0,80	$10,1(10^{-6})$	1,550	1,670
Vitroperm 500	0,80	$0,864(10^{-6})$	1,834	2,112

Bảng 1.7. Các hệ số của vật liệu ferit của hãng Magnetic

Vật liệu	Tần số	Hệ số k_p	Hệ số m	Hệ số n
K	$f < 500\text{kHz}$	$2,524(10^{-4})$	1,50	3,15
	$500\text{kHz} \leq f < 1.0\text{MHz}$	$8,147(10^{-6})$	2,19	310
	$f \geq 1.0\text{MHz}$	$1,465(10^{-10})$	4,13	2,98
R	$f = 100\text{kHz}$	$5.597(10^{-4})$	1,43	2,85
	$100\text{kHz} \leq f < 500\text{kHz}$	$4,316(10^{-5})$	1,64	2,68
	$f \geq 500\text{kHz}$	$1,678(10^{-6})$	1,84	2,28
P	$f < 100\text{kHz}$	$1,983(10^{-3})$	1,36	2,86
	$100\text{kHz} \leq f < 500\text{kHz}$	$4,855(10^{-5})$	1,63	2,62
	$f \geq 500\text{kHz}$	$2,068(10^{-15})$	3,47	2,54
F	$f \leq 10\text{kHz}$	$7,698(10^{-2})$	1,06	2,85
	$10\text{kHz} < f < 100\text{kHz}$	$4,724(10^{-6})$	1,72	2,66
	$100\text{kHz} \leq f < 500\text{kHz}$	$5,933(10^{-6})$	1,66	2,68
	$f \geq 500\text{kHz}$	$1,173(10^{-6})$	1,88	2,29
J	$f < 20\text{kHz}$	$1,091(10^{-3})$	1,39	2,50
	$f \geq 20\text{kHz}$	$1,658(10^{-8})$	2,42	2,50
W	$f \leq 20\text{kHz}$	$4,194(10^{-3})$	1,26	2,60
	$f \geq 20\text{kHz}$	$3,638(10^{-3})$	2,32	2,62
H	$f < 20\text{kHz}$	$1,698(10^{-4})$	1,50	2,25
	$f \geq 20\text{kHz}$	$5,372(10^{-6})$	1,62	2,15

Đối với những vật liệu bột sắt siêu nhỏ, tỷ suất tổn hao được tính:

$$\text{watts / kilogram} = k \left(\frac{f B_{ac}^3 (10^9)}{(a) + 681(b) B_{ac}^{0.7} + 2.512(c) B_{ac}^{1.25}} \right) + 100(d) f^2 B_{ac}^2 \quad (1.69)$$

Các hệ số của phương trình (1.69) được cho trong bảng 1.8.

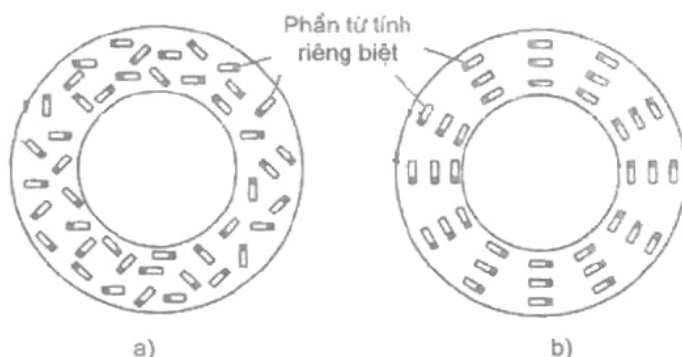
Bảng 1.8. Các hệ số của vật liệu bột sắt siêu nhỏ

Vật liệu	Độ từ thẩm	Hệ số a	Hệ số b	Hệ số c	Hệ số d
Mis-08	35	0.01235	0.8202	1.4694	$3.85(10^{-7})$
Mis-IS	55	0.00528	0.7079	1.4921	$4.70(10^{-7})$
Mix-26	75	0.00700	0.4858	3.340S	$2.71(10^{-6})$
Mtx-52	75	0.00700	0.4858	3.6925	$9.86(10^{-7})$

1.2.4. Bảo hòa vật liệu từ

1. Lý thuyết bảo hòa vật liệu từ

Lý thuyết của từ tính dựa trên giả thuyết rằng tất cả vật liệu từ hợp thành từ các phần tử nam châm riêng biệt. Các phần tử nhỏ này có khả năng chuyển động bên trong vật liệu. Khi một vật liệu từ bị mất từ tính, thì các phần tử từ riêng biệt được sắp xếp bất kỳ và không chịu ảnh hưởng lẫn nhau (hình 1.25a), ở đây các phần tử từ rất nhỏ được sắp xếp không theo quy tắc (cực bắc là đầu được bôi đen trên mỗi phần tử từ). Khi vật liệu bị từ hóa, các phần tử riêng biệt được xếp thẳng hàng hoặc theo một hướng xác định (hình 1.25b).

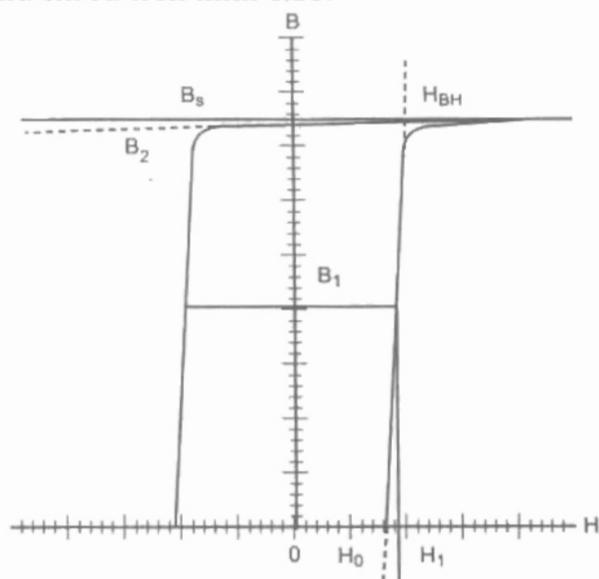


Hình 1.25. Sắp xếp các phần tử trong vật liệu từ
a) Khi mất từ tính; b) Khi được từ hóa.

Nhiệt độ của vật liệu từ phụ thuộc vào nhiệt độ sắp xếp của các phần tử. Lực từ bên ngoài có thể tiếp tục ảnh hưởng lên vật liệu tới điểm bão hòa, điểm mà tại đó về bản chất tất cả các phần tử được xếp theo cùng một hướng.

Ở loại lõi hình xuyên, khe hở không khí có ích nhỏ hơn 10^{-6}cm . Do khe hở không khí không đáng kể so với chiều dài mạch từ. Nếu hình xuyên được đưa vào từ trường mạnh (dủ để gây bão hòa), tất cả các phần tử có thể xếp theo cùng một hướng. Nếu đột nhiên từ trường bị mất ở B_m , các phần tử này vẫn có thể sắp xếp thành hàng và hình thành từ tính dọc theo trục đó. Mật độ từ thông còn lại được gọi là từ dư, B_d .

Điểm bão hòa có thể được xác định một vài điểm trên đường đặc tính B-H, như chỉ ra trên hình 1.26.



Hình 1.26. Xác định điểm bão hòa mạch từ

2. Đặc tính bão hòa

Đường thẳng đi qua điểm $(H_0, 0)$ và (H_{BH}, B_{BH}) có thể viết như sau:

$$B = \frac{\Delta B}{\Delta H}(H - H_0) \quad (1.70)$$

Đường đi qua điểm $(0, B_2)$ và (H_{BH}, B_{BH}) thực chất là không dốc và có thể viết:

$$B \approx B_2 \approx B_{BH}$$

Do đó, điều kiện bão hòa như sau:

$$B_{BH} = \frac{\Delta B}{\Delta H}(H_{BH} - H_0) \quad (1.71)$$

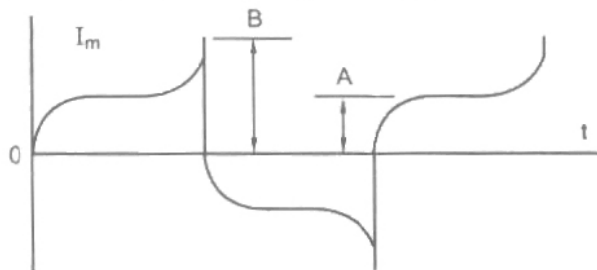
Giải phương trình (1.71) trên đường H_{BH} :

$$H_{BH} = H_0 + \frac{B_{BH}}{\mu_0} \quad (1.72)$$

Ở đây định nghĩa:

$$\mu_0 = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (1.73)$$

Với định nghĩa này, như chỉ ra trên hình 1.27 bão hòa xảy ra khi dòng từ hóa cực đại (điểm B) gấp đôi dòng từ hóa trung bình (điểm A). Theo giải tích, điều này nghĩa là: $H_{\max} = 2H_{BH}$.



Hình 1.27. Ví dụ xác định dòng kích thích

Giải (1.71) để tìm H_1 , chúng ta thu được:

$$H_1 = H_0 + \frac{B_1}{\mu_0} \quad (1.74)$$

Để tìm đường biên một chiều trước bão hòa (ΔH), lấy (1.72) trừ (1.74):

$$\Delta H = H_{BH} - H_1 = \frac{B_{BH} - B_1}{\mu_0} \quad (1.75)$$

Thực tế dòng một chiều không cân bằng mà bị giới hạn bởi:

$$I_{dc} = \frac{\Delta H \cdot l_{mt}}{N} \quad (1.76)$$

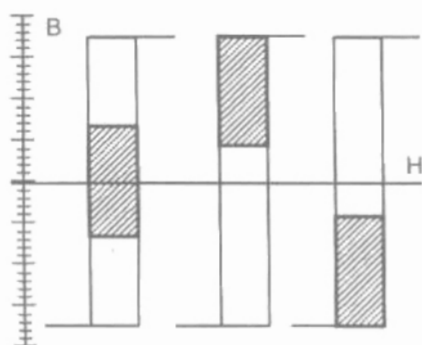
Trong đó: N — số vòng dây

l_{mt} — chiều dài mạch từ

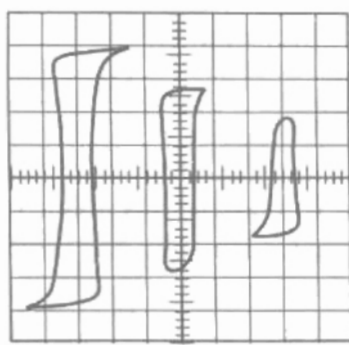
Kết hợp biểu thức (1.75) và (1.76) dẫn đến:

$$I_{dc} = \frac{(B_{BH} - B_1) \cdot l_{mt}}{\mu_0 \cdot N} \quad (1.77)$$

Như đã đề cập trong các tài liệu [5, 7, 8, 9], điều khiển các Mosfet đối xứng có ảnh hưởng rất rõ đến mức độ bão hòa lõi. Sự ảnh hưởng của bão hòa lõi, dùng lõi không mài hoặc không rãnh, như ở hình 1.28 minh họa ảnh hưởng của vòng B–H điện áp DC đối xứng và dịch về phía dương và âm. Hình 1.29 chỉ ra các loại vòng B–H của vật liệu 50 – 50 NiFe được kích thích bởi một nguồn xoay chiều, với kích thích giảm dần; tỷ lệ theo chiều đứng là 0,4 T/cm. Ảnh hưởng của bão hòa lõi là sinh ra các xung nhọn, có thể phá hủy các đèn bán dẫn.



Hình 1.28. Đường cong B-H với điện áp DC lệch

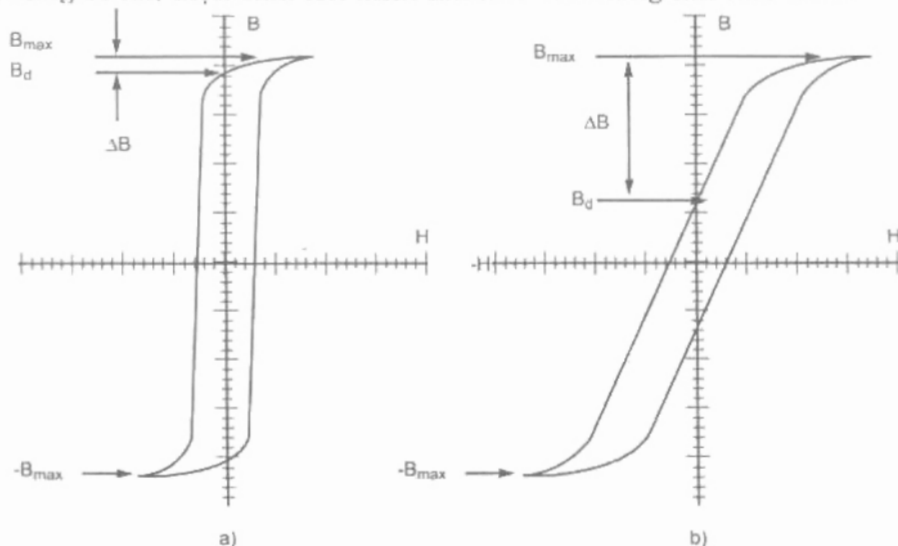


Hình 1.29. Một số đường từ hóa khi nguồn DC bị lệch

3. Ảnh hưởng khe hở không khí

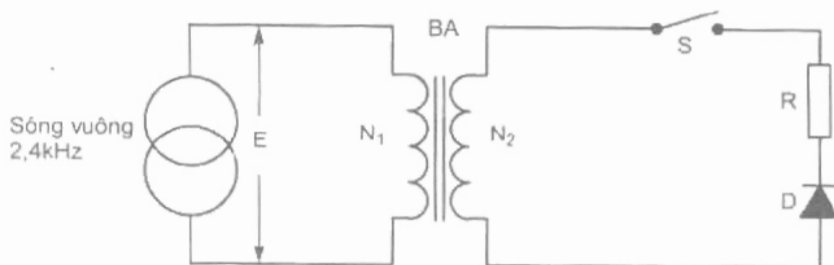
Khe hở không khí được đưa vào trong lõi tạo nên khử từ lớn, dẫn đến “biến dạng ngoài” của vòng trễ và làm giảm đáng kể độ dẫn từ của những vật liệu có độ từ thẩm cao. Các dòng kích thích một chiều chảy theo cùng một dạng. Tuy nhiên, sự lệch đặc tính của lõi ít ảnh hưởng đến đặc tính từ trường, do khe hở không khí đưa vào nhỏ. Ảnh hưởng của độ lớn khe hở không khí phụ thuộc vào chiều dài trung bình của đường sức từ và đường đặc tính của lõi không khe hở. Với những khe hở không khí như nhau, độ dẫn từ giảm nhiều hơn trong lõi có mạch từ dài hơn.

Hình 1.30 đưa ra so sánh của các vòng trễ B-H của lõi xuyên, không và có khe hở. Khe hở tăng ảnh hưởng đến chiều dài của đường sức từ. Với từng cỡ lõi, diện cảm lớn nhất khi khe hở không khí nhỏ nhất.



Hình 1.30. So sánh vòng trễ B-H của vật liệu từ
a) Không khe hở, b) Có khe hở.

Xét biến áp trong sơ đồ mạch biến đổi sóng vuông hình 1.31.



Hình 1.31.

Khi S đóng, dòng một chiều không đối xứng chạy trong cuộn thứ cấp có N_2 vòng, lõi được đưa vào cường độ từ trường một chiều, do đó từ cảm có thể biểu diễn như sau:

$$B_{dc} = \frac{0,4\pi N_2 I_{dc} \cdot 10^{-4}}{l_{kh} + \left(\frac{l_{mt}}{\mu_m}\right)} \quad (1.78)$$

Trong đó: B_{dc} – từ cảm một chiều của biến áp;

I_{dc} – thành phần dòng điện một chiều;

l_{kh} – độ dài khe hở lõi;

l_{mt} – chu vi (chiều dài) trung bình mạch từ;

μ_m – hệ số từ thẩm mạch từ.

Trong tính toán nghịch lưu, từ thông một chiều này được làm tăng bởi từ thông xoay chiều:

$$B_{ac} = \frac{E \cdot 10^{-4}}{k_s N_2 f A_c} \quad (1.79)$$

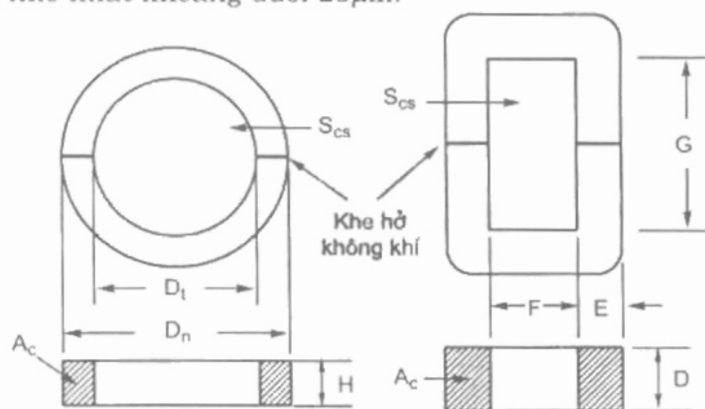
Trong đó: E – sức điện động thành phần xoay chiều;

k_s – hệ số dạng sóng điện áp;

f – tần số điện áp.

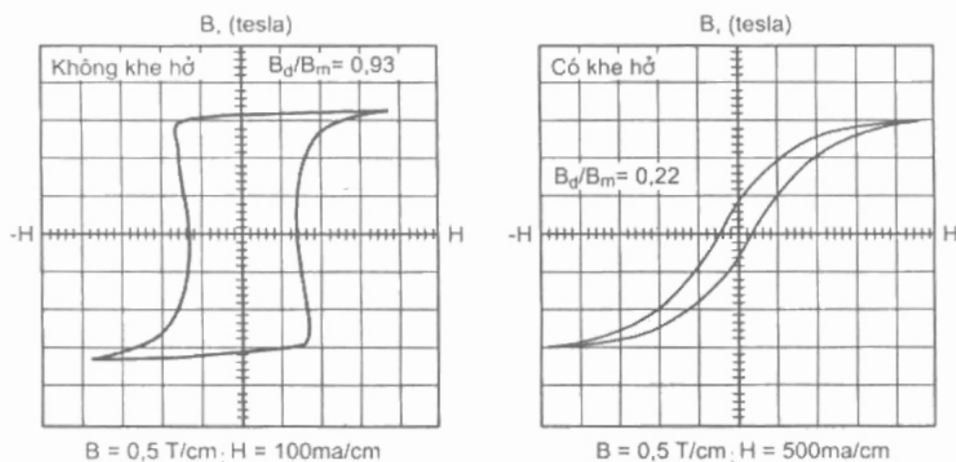
Từ đường cong B–H hình 1.30 cho thấy từ cảm cực đại B_{max} , và từ dư B_d , cho những lõi có và không có khe hở, và từ thông xoay chiều được xác định là ΔB (là sự chênh lệch giữa B_{max} và B_d). Chú ý rằng, trong hình 1.30a, B_d xấp xỉ B_{max} , nhưng trong hình 1.30b, có sự chênh lệch ΔB khá lớn giữa chúng. Hiển nhiên, việc đưa khe hở không khí vào làm giảm B_d và làm tăng mật độ từ thông. Do đó, việc đưa thêm khe hở không khí vào lõi sẽ loại trừ hoặc làm giảm rõ rệt các xung điện áp được sinh ra do điện cảm rò, do bão hòa biến áp.

Hai hình dạng lõi được xét ở đây, khi có và không khe hở không khí: lõi xuyên và lõi C có khe hở hai bên (hình 1.32). Để làm tăng độ hở, các lõi này được cắt tự nhiên làm hai phần và mép cắt được mài, dùng ăn mòn axit để khử mảnh vỡ cắt, được đại thành các dạng lõi. Một khe hở không khí nhỏ nhất khoảng dưới $25\mu\text{m}$.

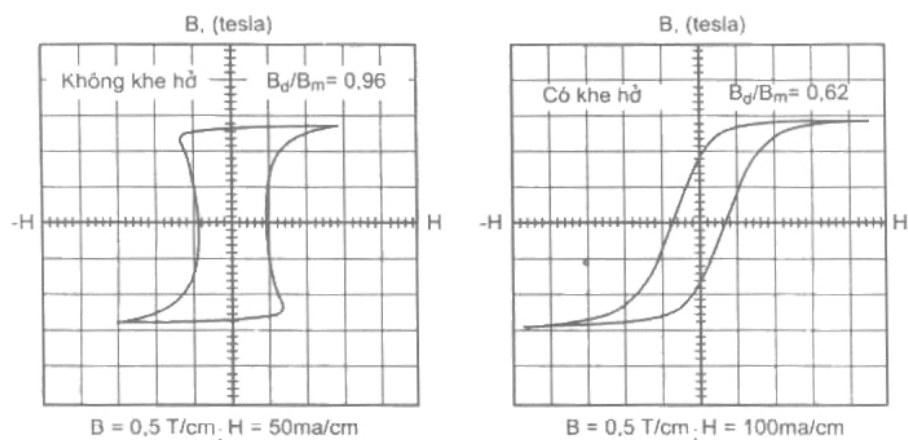


Hình 1.32. Hình dạng và loại lõi
a) Lõi xuyên; b) Lõi C.

Các hình vẽ từ hình 1.33 đến hình 1.36 chỉ ra các vòng B-H của các lõi có khe hở không khí và không khe hở không khí, từ các đường cong thấy rằng ảnh hưởng của khe hở là giống nhau cho cả lõi hình xuyên và lõi chữ C. Tuy nhiên, cần chú ý, sự xẻ rãnh của lõi hình xuyên sinh ra đặc tính ít vuông góc của đặc tính từ trễ B-H, tỷ lệ giữa từ cảm dư và từ cảm cực đại của các vật liệu khi có và không khe hở không khí có sự khác nhau rõ rệt.

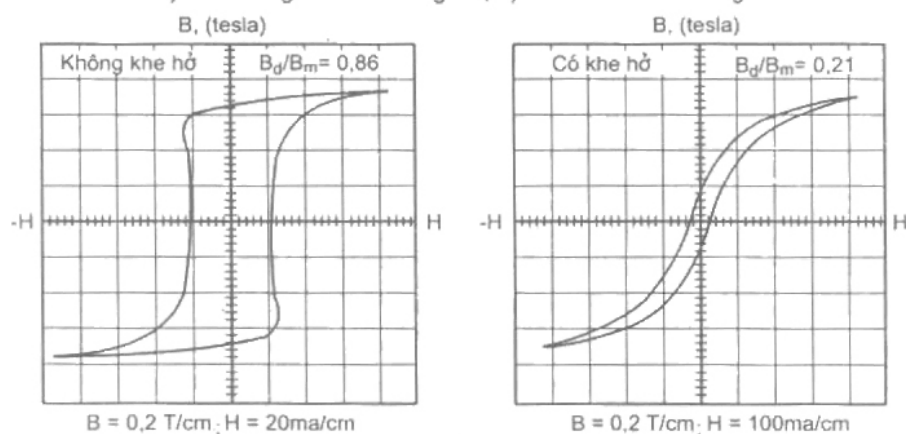


Hình 1.33. Vòng từ trễ của thép silic 52029-2K
a) Khi không khe hở không khí; b) Khi có khe hở không khí.



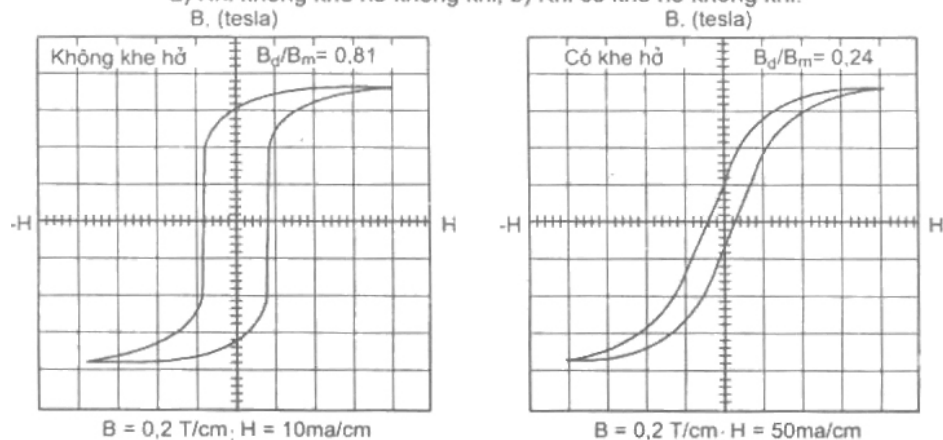
Hình 1.34 Vòng từ trễ của Orthonil 52029-2A

a) Khi không khe hở không khí; b) Khi có khe hở không khí.



Hình 1.35. Vòng từ trễ của Permali 52029-2D

a) Khi không khe hở không khí; b) Khi có khe hở không khí.

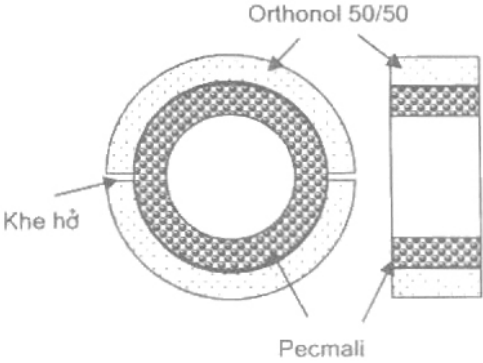


Hình 1.36. Vòng từ trễ của Supermali 52029-2F

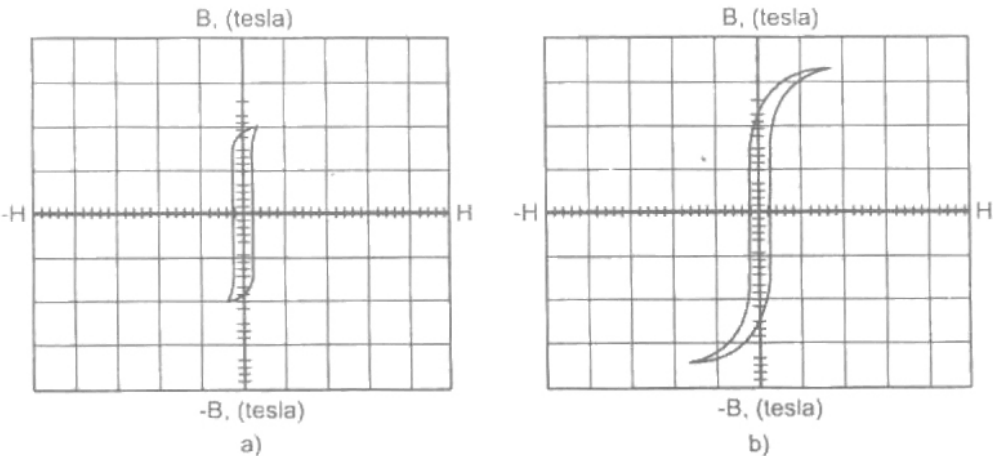
a) Khi không khe hở không khí; b) Khi có khe hở không khí.

Một kiểu lõi hỗn hợp được lựa chọn cho các máy biến áp nhằm kết hợp việc bảo vệ đặc tính của lõi có khe hở với dòng từ hóa yêu cầu thấp hơn nhiều so với lõi không khe hở không khí. Chức năng của lõi không khe hở không khí ở những điều kiện làm việc thông thường và lõi có khe hở không khí ở những điều kiện bất thường nhằm ngăn cản việc chuyển mạch của các van bán dẫn và phá hủy chúng.

Cấu hình của lõi hỗn hợp gồm có khe hở và không khe hở kết hợp với nhau một cách đồng tâm (hình 1.37), với lõi không khe hở được lồng vào trong lõi có khe hở không khí. Lõi không khe hở không khí có độ dẫn từ cao, do đó yêu cầu dòng từ hóa rất nhỏ. Mặt khác, lõi có khe hở không khí có độ dẫn từ thấp, nên yêu cầu dòng từ hóa cao hơn. Lõi không khe hở không khí được thiết kế để làm việc ở mật độ từ thông thông thường cho các bộ biến đổi. Lõi không khe hở không khí có thể bão hòa ở điều kiện làm việc thông thường, đã được giới thiệu ở trên. Lõi có khe hở không khí sau khi chịu đựng điện áp đặt, thì dòng điện dư không chảy qua. Trong một thử nghiệm, nó hoạt động giống như một điện trở đệm trong một vài mạch để giới hạn dòng chảy qua ở mức an toàn.



Hình 1.37. Cấu hình lõi hỗn hợp



Hình 1.38. Đường cong từ hóa của:
a) Lõi đơn không khe hở; b) Lõi hỗn hợp.

Hình 1.38 chỉ ra những đường cong từ hóa cho lõi không khe hở không khí và lõi hỗn hợp của cùng một vật liệu ở cùng mật độ từ thông.

Để toàn bộ đặc tính đồng nhất cho các lõi có khe hở, kích thước một khe hở vào khoảng $50\mu\text{m}$. Ở lõi hỗn hợp, khe này đạt được bằng cách chèn một tờ giấy giữa các đầu lõi trong khi phân lớp.

Đặc tính bảo vệ giống nhau có thể đạt được trong máy biến áp có lõi cán mỏng ghép lớp. Khi các lá thép mỏng được xếp chồng với nhau, sẽ có những khe hở không khí nhỏ.

Kết luận

Vật liệu làm lõi hình xuyên quán bằng lá thép tổn hao thấp, có đặc tính từ trễ rất vuông, được dùng rộng rãi trong biến áp của tàu vũ trụ, hàng không. Do đặc tính B-H vuông, máy biến áp được thiết kế với các vật liệu này thường bão hòa sớm, năng lượng bất thường đặt lên mạch điện tử làm cho xung dòng điện và điện áp lớn. Bão hòa xảy ra khi có sự bất đối xứng trong mạch điều khiển AC tới máy biến áp, hoặc khi tồn tại dòng từ hóa một chiều. Cũng do đặc tính vuông góc, trạng thái từ dư cao có thể vẫn còn khi ngắt kích từ. Sự cấp lại kích từ theo chiều cũ có thể là lý do của bão hòa sâu và xung dòng điện cực lớn chỉ được giới hạn bởi trở kháng nguồn và điện trở cuộn dây biến áp. Điều này có thể gây ra sự cố bất ngờ.

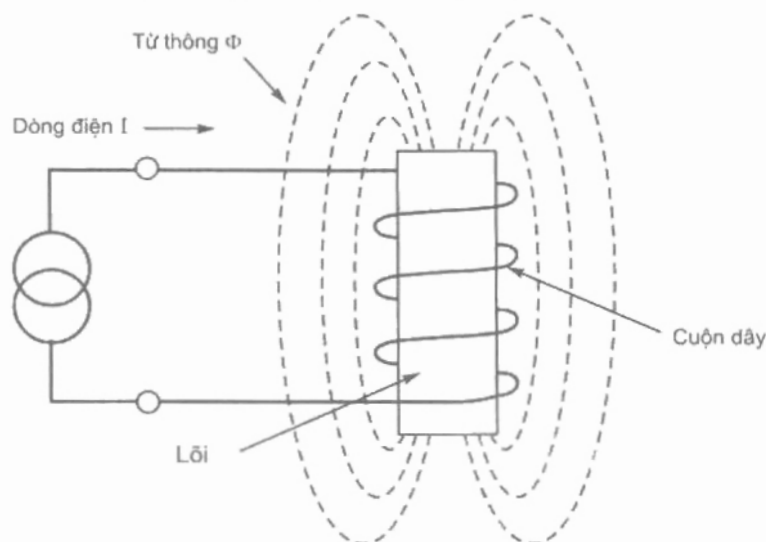
Bằng việc đưa vào lõi một khe hở không khí nhỏ (dưới $25\mu\text{m}$), những vấn đề đã đề cập ở trên có thể tránh được trong khi vẫn giữ được đặc tính tổn hao ít của những vật liệu này. Khe hở không khí có ảnh hưởng biến dạng tới vòng B-H của vật liệu, vì thế từ dư thấp và mật độ từ thông làm việc khi bão hòa cao. Khe hở không khí do đó có tính khử từ mạnh ảnh hưởng lên đặc tính vuông của vật liệu. Thực chất việc thiết kế các máy biến áp dùng các vật liệu đặc tính vuông cho lõi chữ C hoặc lõi hình xuyên có khe; sẽ không gây bão hòa khi chuyển mạch mở khóa và có thể chịu đựng một giá trị cho trước của mạch không đối xứng hoặc mạch kích thích DC.

Ngoài ra, cần nhấn mạnh rằng, do tính tự nhiên của vật liệu và kích thước nhỏ của khe hở không khí nên cần bảo quản cẩn thận và việc điều khiển phải được thực hiện với khe hở làm việc. Mặt khác, mong muốn hiệu quả của khe hở sẽ không đạt được như đã nói ở trên, và đặc tính tổn hao thấp sẽ bị mất. Những lõi này phải được cắt một cách cẩn thận, mài nhẵn bề mặt.

1.3. LỖI TỪ

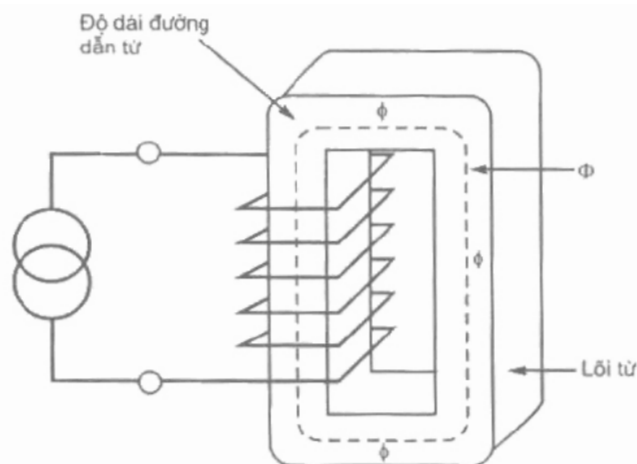
Thành phần quan trọng trong một thiết bị từ tính là từ trường (từ thông) tạo ra khi dòng điện chạy qua cuộn dây. Khả năng điều khiển từ trường có tính quyết định tới việc kiểm soát hoạt động của thiết bị từ tính.

Khả năng dẫn từ thông của vật liệu được gọi là độ từ thẩm. Chân không là môi trường mà trong đó độ từ thẩm bằng 1,0 và độ từ thẩm của các vật liệu khác được đo dựa vào cơ sở này. Hầu hết các vật liệu như không khí, giấy và gỗ có khả năng dẫn từ kém nên có độ từ thẩm thấp. Nếu cuộn dây quấn quanh trụ, sẽ tạo ra đường sức như hình 1.39. Có một vài vật liệu như sắt, niken, coban và các hợp kim của chúng có độ từ thẩm cao, có thể đạt tới hàng trăm nghìn. Những vật liệu này là những vật liệu cơ bản được dùng để tạo ra các vật liệu làm lõi từ.



Hình 1.39. Lõi không khí với từ trường được tăng cường

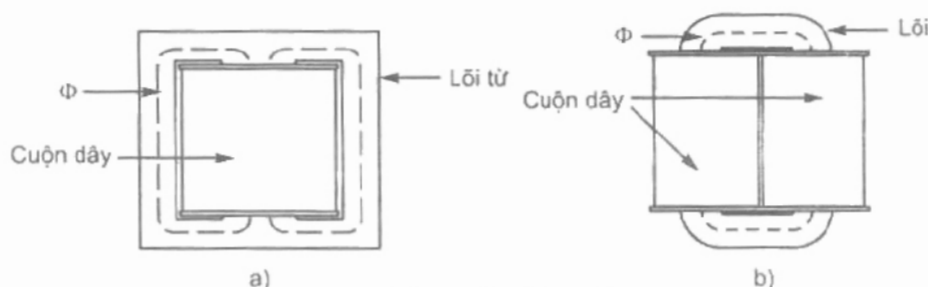
Chức năng chính của lõi là chứa từ thông và tạo đường đi thông suốt cho từ thông. Đoạn đường này được hiểu là khoảng cách được bao bọc bởi dòng từ thông trong vật liệu từ và được gọi là độ dài đường dẫn từ. Độ dài đoạn dẫn từ và độ từ thẩm là hai yếu tố rất quan trọng để biết trước đặc điểm hoạt động của các thiết bị từ tính. Việc lựa chọn dạng và vật liệu lõi từ luôn phụ thuộc vào sự cân bằng các yêu cầu mâu thuẫn với nhau như kích thước, trọng lượng, nhiệt độ, mật độ từ thông, tổn hao lõi và tần số hoạt động.



Hình 1.40. Lõi từ giới hạn từ trường

1.3.1. Cấu trúc biến áp

Biến áp và cuộn cảm được cấu thành từ hai thành phần chính: lõi từ và cuộn dây. Có hai kiểu cấu trúc cho biến áp: kiểu hộp (hình 1.41a) và kiểu lõi (hình 1.41b). Ở kiểu hộp, lõi bao quanh cuộn dây. Tại đây, từ trường đi vòng quanh phía ngoài cuộn dây. Ưu điểm của kiểu này là chỉ cần một cuộn dây. Ở kiểu lõi, cuộn dây lại ở phía ngoài lõi, nên để làm việc đối xứng thường có hai cuộn dây ở hai bên của lõi O.



Hình 1.41. Cấu trúc biến áp:

a) Kiểu hộp – lõi bao ngoài cuộn dây; b) Kiểu lõi – cuộn dây bao quanh lõi từ.

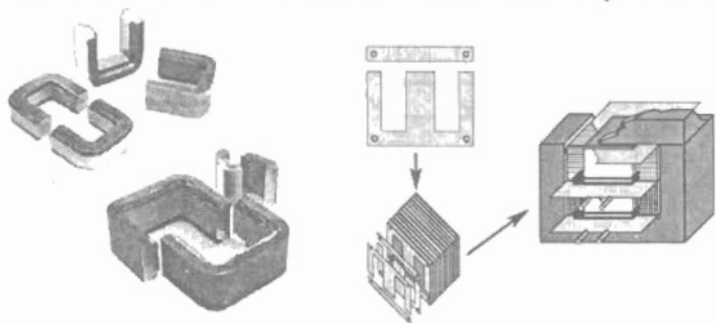
1.3.2. Các loại vật liệu lõi

Như đã biết ở phần trên, hiện nay về cơ bản có 3 loại vật liệu làm lõi: đó là hợp kim, bột ép và cuối cùng là ferit.

1. Hợp kim

Hợp kim qua lò luyện kim chuyển thành dạng thỏi. Sau đó chúng được đưa vào quá trình cán nóng và cán lạnh. Quá trình cán sẽ tạo ra tấm vật liệu có độ dày từ 0,004 đến 0,031 inches (0,1016 đến 0,7874mm)

mà có thể dập thành những tấm mỏng. Nó còn có thể được cán đến độ dày từ 0,002 đến 0,000125 inches (0,0508 đến 0,003175mm) sau đó cắt và uốn thành lõi như lõi kiểu C, lõi kiểu E và các mạch từ hình xuyên.



2. Lõi bằng bột ép

Ví dụ như bột hợp kim pecmali (hợp kim có tính từ thẩm cao, thành phần gồm các kim loại như sắt, niken, coban, crom, vanadi và molybdenum) và bột sắt, được ép thành lõi hình xuyên, lõi EE và lõi kim loại. Quá trình tạo ra lõi bột bắt đầu từ dạng thỏi, qua các bước nghiền vụn khác nhau cho đến khi có nồng độ bột đều như yêu cầu. Bình thường, lõi bột không cần phải gia công trên máy sau quá trình trên.

3. Ferit

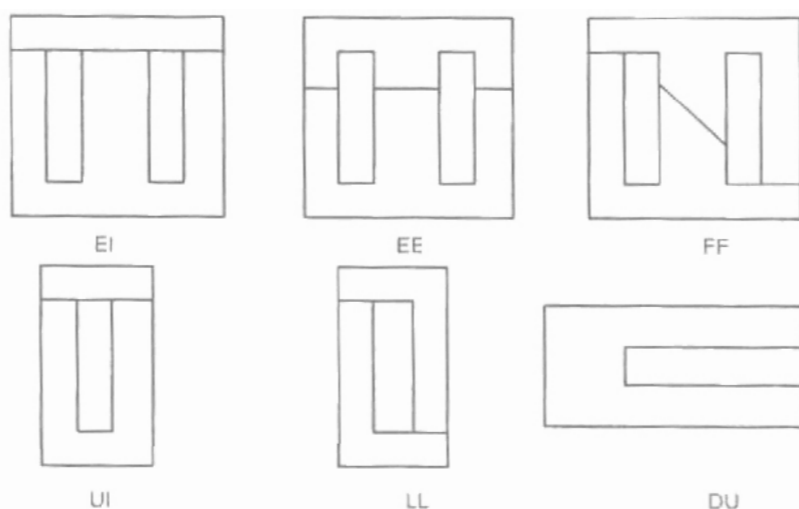
Là vật liệu gồm của oxit sắt, hợp kim của các oxit và cacbon của mangan, kẽm, niken, magiê hoặc coban. Các hợp kim được chọn lựa và trộn với nhau, dựa vào độ từ thẩm của lõi. Sau đó, hỗn hợp này được đúc vào khuôn theo yêu cầu dưới áp suất xấp xỉ 150 – 200 tấn/inch² (22800 – 30400bar) và được đốt ở nhiệt độ khoảng 20000F (1093,33°C). Sau các giai đoạn trên, chúng được làm nhẵn để loại bỏ các gờ và cạnh sắc nhọn. Ferit có thể gia công bằng máy để có được hình dạng mong muốn.

Có một số cấu tạo lõi: lõi từ những lá thép kỹ thuật ghép lại, lõi “băng”, lõi bột ép, lõi khối đúc.

1.3.3. Cấu tạo lõi thép cán

1. Hình dạng và sắp xếp lá thép

Các lá thép có nhiều hình dạng và kích thước khác nhau. Công nghệ của các máy dập tấm để tạo ra các lá thép đã phát triển vượt bậc. Các loại lá thép thường được sử dụng nhất là EI, EE, FF, UI, LL và DU (hình 1.42). Các lá thép phân biệt với nhau nhờ đoạn cắt của đường dẫn từ. Các đoạn cắt này sinh ra khe hở không khí là nguyên nhân của tổn hao từ. Để giảm khe hở không khí, các lá thép phải được xếp sao cho các khe hở không khí ở mỗi lớp xen kẽ nhau.



Hình 1.42. Các dạng lá thép thông dụng

2. Ứng suất

Một trong những chỉ số quan trọng nhất của thép làm lõi máy biến áp là độ từ thẩm. Bất kỳ ứng suất hay biến dạng nào của vật liệu từ đều sẽ tác động đến độ từ thẩm. Ứng suất có thể là nguyên nhân làm tăng dòng từ hoá hoặc làm giảm cách điện. Khi máy biến áp được lắp ráp và các lá thép bị uốn cong (không trở lại hình dạng ban đầu), lúc đó các lá thép đã chịu ứng suất và nên thay thế.

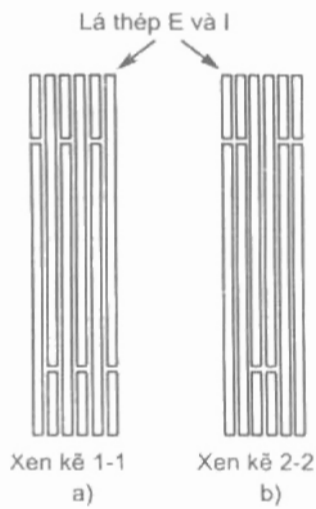
Vài đặc tính từ quan trọng đã bị mất đi do ứng suất và biến dạng sau khi gia công. Các đặc tính mất đi hoặc giảm xuống rõ rệt, có thể phục hồi bằng cách nung. Về bản chất, sự giảm ứng suất được hoàn trả bằng cách nung vật liệu từ đến một nhiệt độ thích hợp, sau đó được làm mát đến nhiệt độ phòng. Quá trình nung phải được hoạt động dưới sự điều khiển có điều kiện về thời gian và nhiệt độ, nếu không môi trường xung quanh sẽ phá huỷ và tạo những thay đổi tiêu cực đến kết cấu của thép.

3. Sắp xếp lá thép

Các cạnh của vật liệu từ khi dập, cắt, sẽ tạo ra gờ sắc nhọn. Chất lượng của dụng cụ gia công lõi sẽ làm giảm đến mức tối thiểu các gờ đó. Các gờ này làm cho lá thép phân cực. Khi máy biến áp được lắp ráp, các lá thép chiếm một không gian để lấp đầy lõi.

Nếu các lá thép được sắp xếp hợp lý (theo chiều dập), phần cuối của các gờ sẽ cùng chiều với nhau, nếu không chúng sẽ quay vào nhau và ảnh hưởng đến hệ số ép chặt. Hệ số ép chặt tác động trực tiếp đến mặt

cất của lõi. Điều này có thể dẫn đến sự sớm bão hoà, như sự tăng lên của dòng từ hoá hay tổn hao của điện cảm.

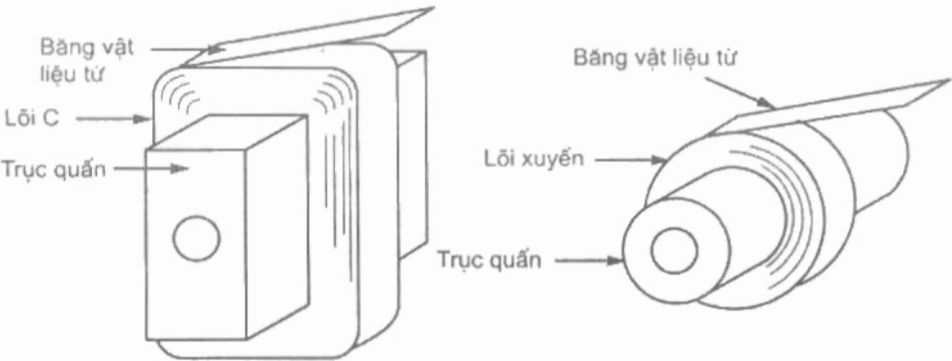


Hình 1.43. Sắp xếp lá thép

Có một vài phương pháp được dùng để sắp xếp các lá thép trong máy biến áp. Kỹ thuật thông dụng nhất được dùng trong sắp xếp các lá thép là phương pháp so le (hình 1.43a). Phương pháp này cho ta khe hở không khí nhỏ nhất và độ từ thẩm tốt nhất. Một phương pháp khác để sắp xếp các lá thép đó là xen kẽ 2-2 (hình 1.43b). Phương pháp này có thể nhóm 2 hoặc nhiều hơn. Điều này làm giảm thời gian lắp ráp. Tổn hao trong cách sắp xếp này, khác với cách sắp xếp 1-1, là dòng từ hoá tăng lên và tăng tổn hao độ từ thẩm.

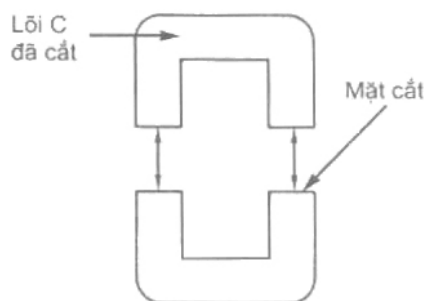
4. Cấu tạo lõi thép lá

Lõi băng được tạo nên bằng cách: vật liệu từ được gia công thành băng (như băng vải, hay cuộn băng, cuộn phim) có bản rộng phù hợp, sau đó quấn quanh lõi trục (hình 1.44). Vật liệu làm lõi “băng” là các hợp kim sắt, cộng thêm các vật liệu vô định hình. Bề dày của băng dao động trong khoảng 0.0005 inch (0,0127mm) đến 0.012 inch (0,305mm). Mong muốn ở cấu trúc này là từ thông song song với hướng cán của vật liệu từ. Điều này cho ta hiệu suất sử dụng từ thông cao nhất với lực từ nhỏ nhất.

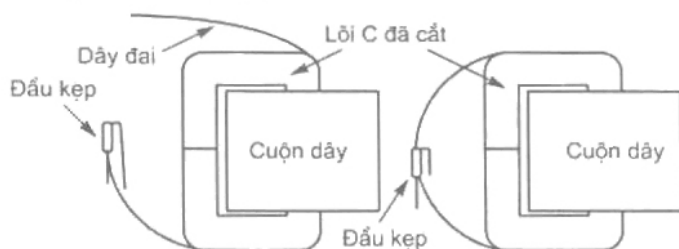


Hình 1.44. Cách thức quấn lõi băng

Có hai điều không mong muốn ở cấu trúc này. Khi lõi bị cắt đôi (hình 1.45), mặt cắt phải được mài, sau đó được mài bằng acid, để có được một bề mặt cắt bằng phẳng, nhẵn với khe hở không khí nhỏ nhất và độ từ thẩm tốt nhất. Điều không mong muốn khác là khi ghép lõi lại, người ta cần phải có dây đai xung quanh lõi và đầu kẹp để cố định (hình 1.46). Biến áp chế tạo bằng lõi C có lựa chọn một trong ba kết cấu như hình 1.47.

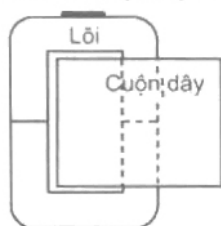


Hình 1.45. Hai nửa lõi C đã cắt

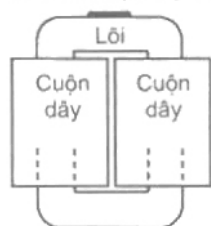


Hình 1.46. Nối dây cho lõi C đã cắt

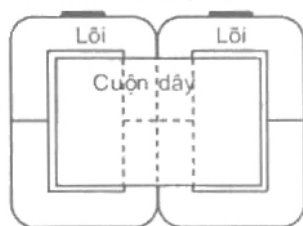
Lõi đơn, cuộn dây đơn



Lõi đơn, cuộn dây đôi

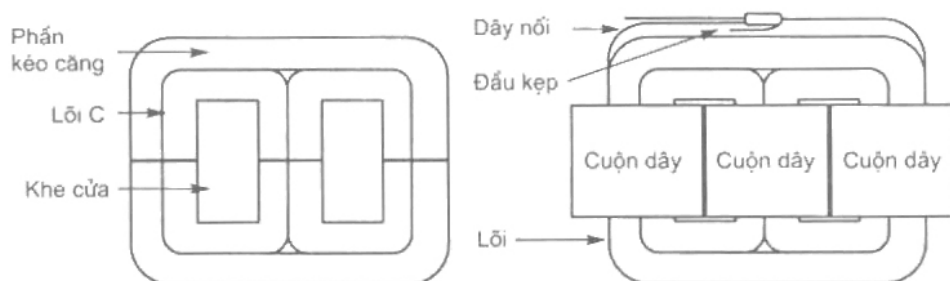


Lõi đôi, cuộn dây đôi



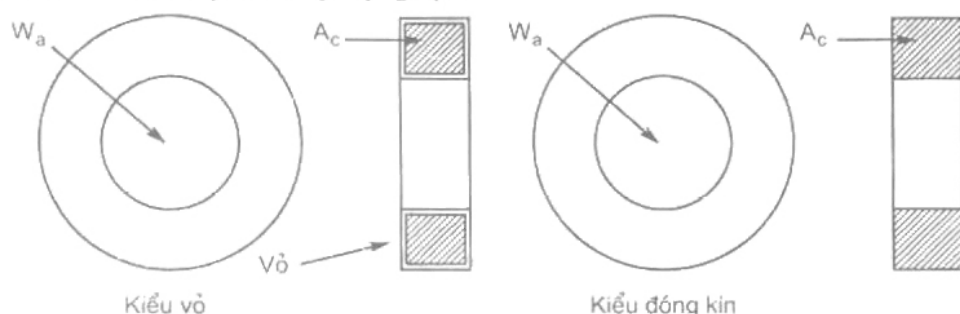
Hình 1.47. Ba kiểu cấu hình lõi C

Lõi EE được tạo ra cũng như lõi C, nhưng chúng được kéo căng hơn (hình 1.48).



Hình 1.48. Lõi EE 3 pha đã cắt

Lõi “băng” hình xuyên được tạo ra cũng theo cách như của lõi “băng” C, bằng cách quấn các vật liệu từ quanh lõi trục (hình 1.44). Lõi “băng” hình xuyên thường có 2 cấu hình, kiểu vỏ và kiểu đóng kín (hình 1.49). Kiểu vỏ yêu cầu tính dẫn điện cao hơn và phải được bảo vệ cuộn dây tốt hơn. Kiểu đóng kín được sử dụng khi không cần thiết yêu cầu các đặc tính tốt như máy biến áp động lực.



Hình 1.49. Bản vẽ phác của lõi từ hình xuyên lõi vỏ và kiểu đóng kín (không vỏ)

5. Hệ số ép chặt

Hệ số ép chặt cho các loại lõi “băng”, lõi dũa cắt và quấn, thép lá có thể đạt được theo loại lõi cũng như độ dày lá thép được cho trong bảng 1.9:

Bảng 1.9. Hệ số ép chặt cho các loại lõi

Độ dày lá mils	Lõi băng	Lõi quấn và cắt	Lõi thép lá		(S.F.) ²
			Butt Stack	Interleave 1x1	
0,125	0,250				0,062
0,250	0,375				0,141
0,500	0,500				0,250
1,000	0,750	0,830	0,900	0,800	0,562
2,000	0,850	0,890			0,722
4,000	0,900	0,900			0,810
6,000	0,940	0,900	0,900	0,850	0,610
12,000	0,940	0,950	0,950	0,900	0,884
14,000		0,950			0,902
18,000			0,950	0,900	0,810
25,000			0,950	0,920	0,846

$$1\text{mil} = 10^{-3}\text{inch} = 25,4 \cdot 10^{-3}\text{mm} = 0,0245\text{mm} = 0,028\text{yd} = 0,083\text{ft}$$

1.3.4. Cấu tạo lõi khối

1. Lõi từ băng bột ép (hình 1.50)

Đã giúp cho các nhà thiết kế một công cụ tăng tốc những bước thiết kế ban đầu. Lõi từ băng bột ép đã có sẵn khe hở không khí. Đó là do vật

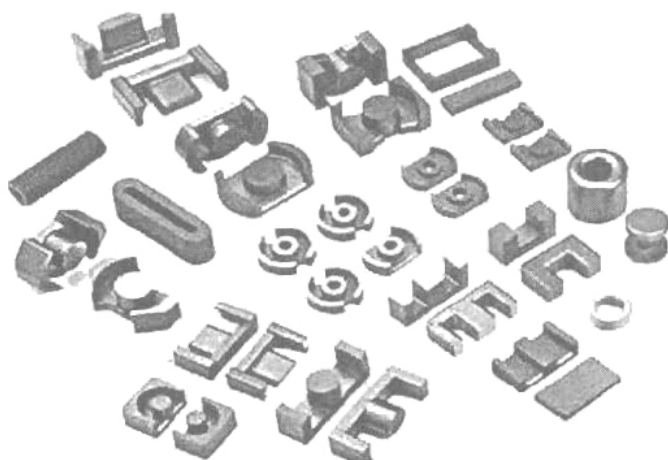
liệu dưới dạng bột và rất bền với thời gian và nhiệt độ. Loại lõi này được sản xuất với sự hỗ trợ tốt về kỹ thuật. Các nhà máy đưa ra catalog về các lõi (phụ lục 2), họ đưa ra không chỉ có kích thước mà còn có cả độ từ thẩm và mH/1000 vòng. Các dữ liệu có được giúp cho các kỹ sư tốn ít thời gian thiết kế mà vẫn cho kết quả tốt.



Hình 1.50. Bản vẽ phác của lõi từ hình xuyên bằng bột ép

2. Lõi ferit

Vật liệu từ ferit thuộc đồ gốm sứ, là vật liệu đồng nhất bao gồm các oxit; sắt oxit là thành phần chính. Do đó các lõi ferit thường được đúc thành khối và có nhiều hình dạng (hình 1.51) khác nhau: dạng E, I, C, kiểu bát... Lõi loại này thường được thiết kế cho làm việc với tần số cao.



Hình 1.51. Hình dạng lõi ferit

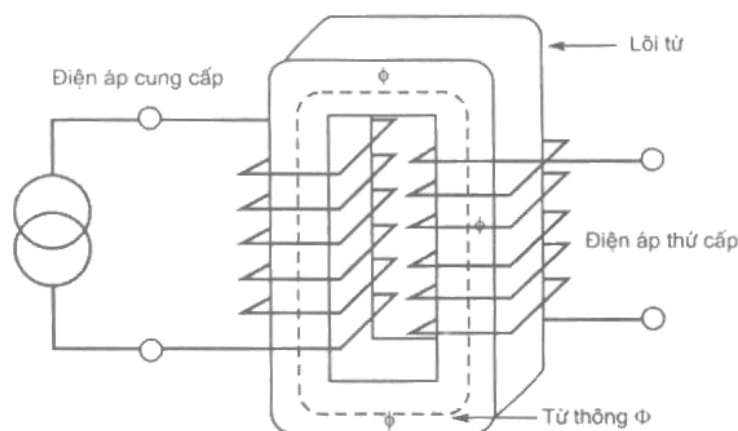
1.3.5. Từ thông trong lõi

1. Dòng điện xoáy và cách điện

Các máy biến áp hoạt động ở tần số vừa phải, yêu cầu giảm tổn hao dòng xoáy ở các vật liệu từ. Để giải quyết tổn hao dòng xoáy, thép kỹ

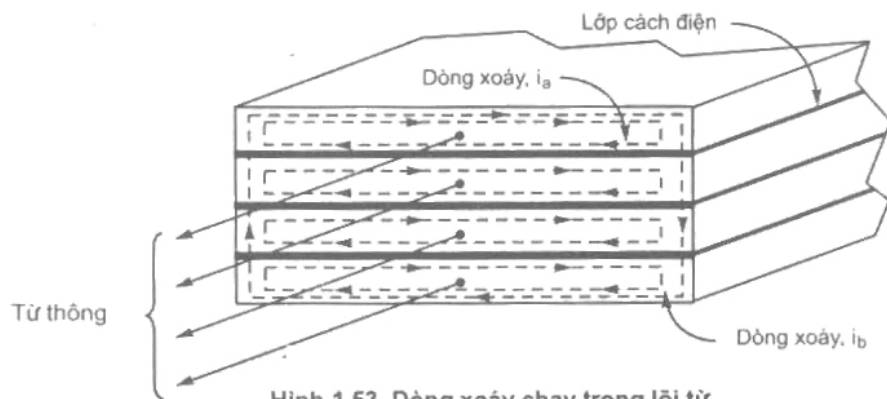
thuật điện phải có điện trở suất vừa đủ. Ngoài ra, nó còn cần được cán đến một độ dày nhất định, có khả năng cách điện hoặc phủ lớp vật liệu từ.

Nếu ta cung cấp một điện áp xoay chiều cho cuộn sơ cấp (như hình 1.52), nó sẽ sinh ra một từ thông xoay chiều ở trong lõi. Từ thông xoay chiều trong cuộn dây sẽ tạo ra điện áp trên cuộn thứ cấp và một điện áp nhỏ trên lõi. Các điện áp trong lõi này sinh ra dòng điện gọi là dòng điện xoáy, tỷ lệ với điện áp. Độ lớn của dòng điện xoáy bị giới hạn bởi điện trở suất của vật liệu. Từ thông xoay chiều tỷ lệ với điện áp cung cấp. Dòng điện xoáy không chỉ tự nó chảy trong lá thép mà nó còn có thể chảy trong lõi, nếu các lá thép không thực sự đồng khuôn và không được cách điện thích hợp.



Hình 1.52. Điện áp xoay chiều đưa vào sinh ra từ thông xoay chiều

Có 2 dòng điện xoáy (hình 1.53) i_a và i_b . Dòng i_a được sinh ra bởi từ thông và điện trở của mỗi lá thép. Do đó, nó phụ thuộc vào chiều rộng, độ dày và điện trở suất khối của lá thép.



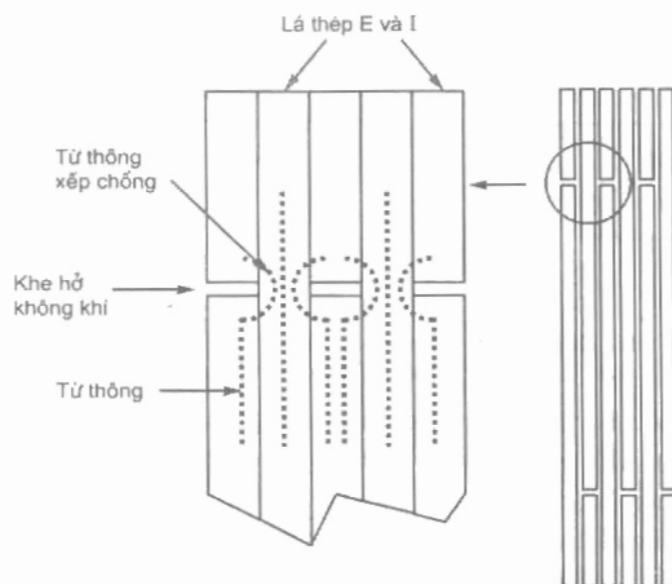
Hình 1.53. Dòng xoáy chạy trong lõi từ

Dòng điện xoáy i_b được sinh ra bởi từ thông tổng và điện trở của ngăn xếp lõi từ. Nó phụ thuộc chủ yếu vào chiều rộng và chiều cao của ngăn xếp lõi từ, số lá thép và bề mặt điện trở cách điện của mỗi lá thép.

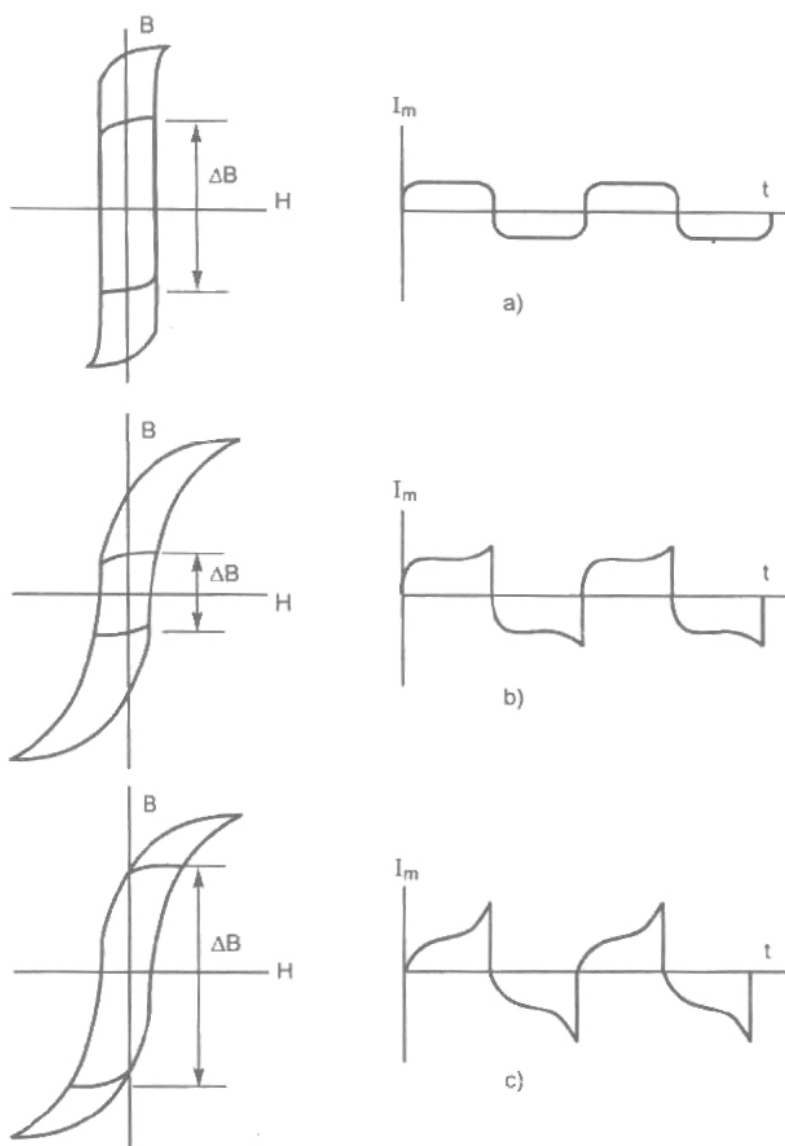
Các vật liệu từ được dùng cho lõi bằng từ và các lá thép được bọc một lớp cách điện có tác dụng giảm dòng điện xoáy.

2. Dòng điện từ hóa

Từ thông xếp chồng. Khi các lá thép được sắp xếp (hình 1.54), từ thông chạy theo mép lá thép có độ từ thẩm yếu tại khe hở không khí, dịch chuyển vào lá thép bên cạnh tạo nên xếp chồng từ thông ở lá thép bên cạnh, sự xếp chồng từ thông là nguyên nhân bão hòa lõi tại từng điểm của lá thép và dòng từ hóa tăng. Tại những vị trí lá thép bão hòa, từ thông dịch chuyển vào những vị trí có độ từ thẩm thấp của lá thép. Hiệu ứng này có thể lý giải được bằng đặc tính trễ từ B-H tại các điểm từ cảm thấp và cao. Để minh họa, trên hình 1.55 vẽ đặc tính từ trễ B-H và dòng điện từ hóa của lõi xuyên (hình 1.55a), lá thép kỹ thuật điện làm việc với từ cảm thấp (hình 1.55b) và lá thép kỹ thuật làm việc với từ thông cao (hình 1.55c). Từ các đặc tính và đường cong hình 1.55 thấy rằng: lõi xuyên có đặc tính từ trễ gần vuông thì dòng điện từ hóa cũng gần vuông, lõi thép làm việc ở vùng từ cảm nhỏ xung dòng điện nhỏ hơn khi làm việc với từ cảm lớn.



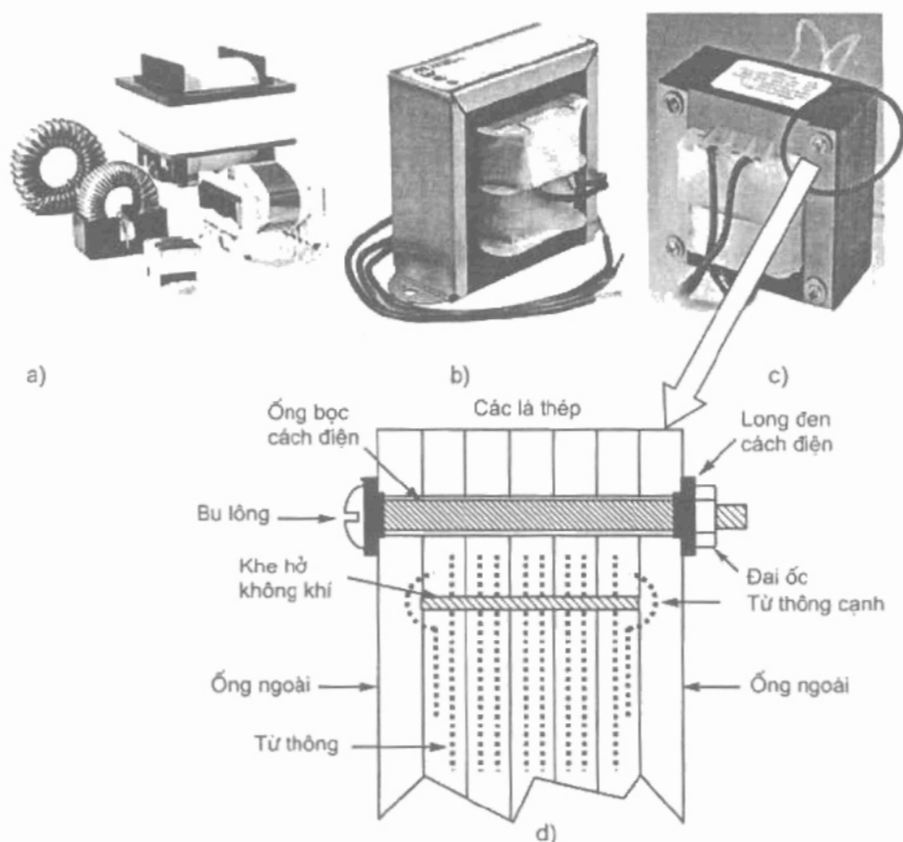
Hình 1.54. Xếp chồng từ thông do mối ghép



Hình 1.55. Đặc tính từ trễ và dòng từ hóa của một số vật liệu khi làm việc với mức độ bão hòa khác nhau

Thiết kế biến áp cần lựa chọn hình dạng và cách thức kết cấu cuộn dây và mạch từ. Một vài kết cấu được cho trên hình 1.56. Nếu lõi có vật liệu từ dạng khối, biến áp và cuộn dây được lắp đặt như hình 1.56a. Khi vật liệu từ là các lá thép, cố định mạch từ bằng tấm ốp phía ngoài như hình 1.56b. Cách cố định như thế này lá thép không cần khoan lỗ, nhưng các lá thép được ép không chặt. Cố định mạch từ khá phổ biến

được thực hiện như hình 1.56c. Bằng cách này các góc mạch từ được khoan lỗ để xuyên bulông ép qua và các lá thép được ép chặt hơn.



Hình 1.56. Cấu tạo chung biến áp

1.4. CUỘN DÂY

1.4.1. Dây điện từ

1. Vật liệu chế tạo dây điện từ

Dây điện dùng để quấn cuộn dây và biến áp thường được gọi là dây điện từ. Dây điện được chế tạo từ những vật liệu dẫn điện tốt. Ba loại vật liệu được dùng chế tạo dây điện từ là bạc, đồng và nhôm, các đặc tính của chúng được cho trong bảng 1.10. Trong ba loại vật liệu này, dây đồng được sử dụng nhiều hơn cả do điện trở suất nhỏ, trọng lượng và giá thành vừa phải. Do tính thông dụng của chúng, nên trong tài liệu này khi nói tới dây điện từ ngầm định đó là dây đồng.

Bảng 1.10. Đặc tính vật liệu dây điện từ

Vật liệu	Ký hiệu	Khối lượng riêng g/cm ³	Điện trở suất $\mu\Omega/\text{cm}$	Hệ số nhiệt độ
Bạc	Ag	10,49	1,59	0,0038
Đồng	Cu	8,89	1,72	0,00393
Nhôm	Al	2,703	2,83	0,0041

2. Sơn cách điện

Nhiệm vụ của nhà thiết kế là phải đảm bảo rằng dây điện từ được sử dụng trong bản thiết kế tương thích với môi trường và đặc điểm kỹ thuật thiết kế. Nhiệt độ hoạt động tối đa của dây điện từ bằng tổng nhiệt độ môi trường, cộng với sự gia tăng nhiệt độ của các thành phần từ tính. Nhiệt độ cho phép làm việc của dây điện từ phụ thuộc vật liệu sơn cách điện. Bảng 1.11 cho vật liệu sơn cách điện tương ứng các cấp nhiệt độ theo tiêu chuẩn IEC60317. Lớp cách điện của dây điện từ nằm trên bề mặt của dây điện (thường hiểu dây là lớp sơn cách điện). Lớp sơn cách điện rất dễ bị quá nhiệt, do đó việc lựa chọn sơn cách điện có tính quyết định đến tuổi thọ của thiết bị. Khi dây điện từ phải chịu sự quá nhiệt, hoặc nhiệt độ cao của môi trường xung quanh, nhiệt độ của nó sẽ lên đến đỉnh, tuổi thọ của dây điện từ sẽ giảm đáng kể [8].

Bảng 1.11. Vật liệu cách điện của dây điện từ theo tiêu chuẩn IEC [21]

Nhiệt độ	Vật liệu cách điện	Tiêu chuẩn IEC (60317)
105°C	Plain Enamel	NONE
	Formvar	317-1 (RD) 317-17 (SQ & RECT)
	Polyurethane Bondable	317-2
	Formvar Bondable	317-5
	Polyurethane Nylon Bondable	317-9
155°C	Polyurethane-155	317-20
	Polyurethane Nylon-155	317-21
180°C	Polyurethane-180	317-51
	Polyurethane Nylon-180	NONE
	Polyester-imide	317-8
	Polyester Nylon	317-22
	Solderable Polyester	317-23
	Solderable Polyester-Nylon	NONE
	Polyester-imide Bondable	317-37
	Polyester-amide-imide Bondable	NONE
	Solderable Polyester Bondable	NONE
200°C	Glass Fibers	317-50 (RD) 317-33 (SQ & RECT)
	Dacron Glass	NONE
	Polyester-200	317-42
	Polyester A/I Topcoat	317-13 (RD) 317-29 (SQ & RECT)
	Polyester A/I Polyamideimide	317-13
	Polytetrafluoroethylene (Teflon)	NONE
240°C	Polyimide-ML	317-46 (RD) 317-47 (SQ & RECT)

Người ta thường phân biệt cấp cách điện theo nhiệt độ [22]: cấp O – 90°C; A – 105°C; E – 120°C; B – 130°C; F – 155°C; H – 180°C; C > 180°C.

3. Thông số dây điện tử

Hiện nay trên thế giới có nhiều hãng của nhiều nước chế tạo dây điện tử, khi lựa chọn dây điện tử cần tham khảo thông số dây của các hãng chế tạo. Những thông số quan trọng của dây bao gồm: tiết diện trần, đường kính (hoặc kích thước cơ bản) trần, đường kính kể cả cách điện, điện trở suất... Dây điện tử dùng quấn biến áp trong các thiết bị điện tử công suất thường là loại dây tròn. Trong nhiều tài liệu [2, 5, 7, 8] thông số các loại dây điện tử được cho. Trong phụ lục 4, cho thông số dây tròn theo tiêu chuẩn Hoa Kỳ AWG.

Tiết diện dây

Một trong những đại lượng quan trọng tương như đơn giản trong thiết kế biến áp và cuộn dây là tiết diện dây dẫn. Trên thế giới hiện nay có nhiều hệ thống đơn vị đo chiều dài và tương ứng là diện tích. Nhiều kỹ sư thiết kế người Việt Nam chưa quen với các hệ thống đơn vị đo này. Trong xu thế hội nhập hiện nay, người thiết kế cần được biết đầy đủ về các đơn vị đo của các nước trên thế giới. Một số đơn vị đo thông dụng hiện nay là: m (hệ SI), mil, inch, foot, yard, cách quy đổi các đơn vị đo này như sau:

$$1\text{mil} = 10^{-3}\text{inch} = 25,4 \cdot 10^{-3}\text{mm} = 0,0245\text{mm} = 0,028\text{yd} = 0,083\text{ft}$$

$$1\text{inch} = 25,4 \times 10^{-3}\text{m} = 25,40\text{mm} = 0,028\text{yd} = 0,083\text{ft}$$

$$1\text{ft} = 0,30480\text{m} = 304,80\text{mm} = 0,3333\text{yd} = 12\text{in}$$

$$1\text{yd} = 0,91440\text{m} = 914,40\text{mm} = 3,0000\text{ft} = 36.000\text{in}$$

Một đơn vị đo diện tích hay dùng của các nước phương Tây là mil tròn (tiếng Anh – circular mil). Diện tích tính bằng mil tròn A của đường tròn đường kính d được tính $A = d^2$. Quy đổi giữa mil tròn với hệ SI được thực hiện:

$$\bullet 1\text{circular mil} = 5.066 \times 10^{-10}\text{m}^2 = 5.066 \times 10^{-6}\text{cm}^2 = 5.066 \times 10^{-4}\text{mm}^2$$

$$\bullet 1\text{m}^2 = 1.974 \times 10^9\text{circular mil}$$

$$\bullet 1\text{cm}^2 = 1.974 \times 10^5\text{circular mil}$$

Mật độ dòng điện trong dây dẫn được quy đổi tương đương theo nguyên tắc:

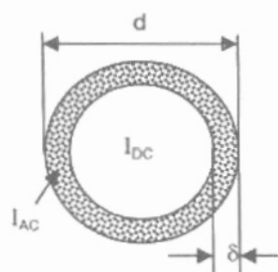
$$500\text{CM/A} \sim 400\text{A/cm}^2 = 4\text{A/mm}^2$$

$$1000\text{CM/A} \sim 200\text{A/cm}^2 = 2\text{A/mm}^2$$

4. Dây nhiều sợi

Các thiết bị điện tử công suất hiện nay thường làm việc với tần số cao. Ở tần số cao, dòng điện tập trung với mật độ cao trên bề mặt (hay trong kỹ thuật điện gọi là hiệu ứng bề mặt). Từ thông do các dòng điện này sinh ra dòng điện xoáy trong dây dẫn từ [7, 8, 13, 14].

Hiệu ứng bề mặt dây dẫn



Hình 1.57

Hiệu ứng bề mặt là xu hướng của dòng điện xoay chiều phân bố nó trong dây dẫn với mật độ dòng điện gần bề mặt dây dẫn lớn hơn so với ở gần lõi của nó. Nó sinh ra điện trở đủ lớn của dây dẫn với sự tăng lên của tần số dòng điện. Hiệu ứng này lần đầu tiên được giải thích bởi Lord Kelvin năm 1887. Nikola Tesla và Joseph Stefan cũng phát hiện ra hiệu ứng bề mặt này. Hiệu ứng

này có tầm quan trọng trong thiết kế truyền tải và phân phối điện năng, cũng như trong các mạch sử dụng sóng radio và vi sóng.

Trong lý thuyết về dòng điện xoáy, độ thấm sâu δ (tính từ bề mặt ngoài) được xác định:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot f}} \quad (1.80)$$

Trong đó: f – tần số dòng điện

ρ – điện trở suất của vật liệu

Đối với dây đồng

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot f}} = \frac{6,62}{\sqrt{f}} \text{ cm}$$

Ví dụ: Khi làm việc ở tần số 100 kHz có hiệu ứng bề mặt, lựa chọn dây dẫn cần xét đến hiệu ứng bề mặt, khi đó hệ số độ thấm sâu δ cho làm việc ở tần số 100kHz được tính:

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f\mu}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu f}} \\ &= \sqrt{\frac{1,72 \cdot 10^{-8}}{3,14 \cdot \mu \cdot f}} = \sqrt{\frac{1,72 \cdot 10^{-8}}{3,14 \cdot 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot f}} = \frac{0,0662}{\sqrt{f}} \text{ m} \\ &= \frac{6,62}{\sqrt{f}} \text{ cm} = \frac{6,62}{\sqrt{100000}} = 0,0209 \text{ cm} \end{aligned}$$

Trong đó: $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ – điện trở suất của dây dẫn;

$\mu = 1,2566290 \cdot 10^{-6} [\text{H/m}]$ – độ thấm từ tuyệt đối của dây đồng.

Đường kính dây được chọn:

$$D_{\text{Cu}} = 2 \times \delta = 2 \times 0,0209 = 0,0418 [\text{cm}]$$

Tiết diện dây trần (không kể cách điện)

$$S_{\text{Cu}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{Cu}})^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,0418^2}{4} = 0,00137 \text{ cm}^2$$

Từ bảng dây (phụ lục 3) có thể lựa chọn cỡ dây: AWG 26 có tiết diện dây chưa kể cách điện $S_{\text{Cu}} = 0,00128 \text{ cm}^2$, và có kể cách điện $S_{\text{Cu}} = 0,001603 \text{ cm}^2$, điện trở trên 1cm $R/\text{cm} = 1345 \mu\Omega/\text{cm}$.

Một số gợi ý về lựa chọn đường kính dây theo tần số cho trong bảng 1.12.

Bảng 1.12. Đường kính theo tần số

Tần số f Hz	Độ thấm sâu δ [mm]	Đường kính dây d [mm]
50	9,362	18,724
100	6,620	13,240
500	2,961	5,921
1000	2,093	4,187
2500	1,324	2,648
5000	0,936	1,872
7500	0,764	1,529
10000	0,662	1,324
20000	0,468	0,936
50000	0,296	0,592
80000	0,234	0,468
100000	0,209	0,419
125000	0,187	0,374
150000	0,171	0,342
200000	0,148	0,296
250000	0,132	0,265
500000	0,094	0,187
1000000	0,066	0,132

Một trường hợp rất điển hình trong các bộ biến đổi điện tử là dòng điện chạy trong dây dẫn có hai thành phần một chiều I_{dc} và xoay chiều ΔI_{ac} . Các thông số dây dẫn có thể được tính toán như sau:

Đường kính dây dẫn:

$$d_{Cu} = \sqrt{\frac{4.S_{Cu0}}{\pi}} \quad (1.81)$$

Tiết diện dây phía trong vùng hiệu ứng dòng điện bề mặt

$$S_{Cum} = \frac{\pi.(d_t)^2}{4} \quad (1.82)$$

Trong đó:

S_{Cum} – tiết diện phần dây đồng ít chịu ảnh hưởng hiệu ứng bề mặt dòng điện;

d_t – đường kính (giả định) phía trong dây dẫn không chịu ảnh hưởng hiệu ứng bề mặt.

$$d_t = d_{Cu} - 2\delta \quad (1.83)$$

Tiết diện dây dẫn chịu ảnh hưởng hiệu ứng dòng điện bề mặt (S_{bm})

$$S_{bm} = S_{Cu} - S_{Cum} \quad (1.84)$$

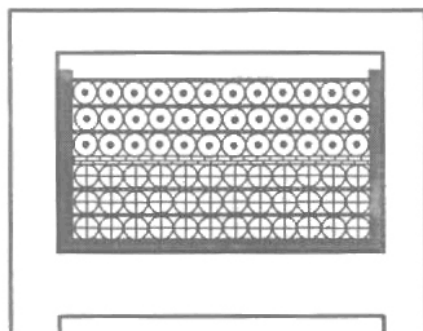
Thành phần dòng điện xoay chiều hiệu dụng với sóng vuông:

$$\Delta I_{hd} = I_{pik} \sqrt{\frac{1}{3}} \quad (1.85)$$

Mật độ dòng điện thành phần xoay chiều:

$$J = \frac{\Delta I_{hd}}{S_{bm}} \quad (1.86)$$

Hiệu ứng gần:



Hình 1.58. Kết cấu một biến áp đơn giản

Dòng điện chạy trong các dây dẫn đặt gần nhau sinh từ thông làm cảm ứng trên các dây dẫn cạnh chúng những sức điện động và sinh dòng điện xoáy trong các dây dẫn.

Trong các biến áp và cuộn dây, muốn giảm hiệu ứng gần nên chọn cửa sổ cao và hẹp ngang, khi đó số lớp dây biến áp ít, hiệu ứng gần giảm và điện cảm tản cũng giảm. Tuy nhiên, các lõi có cửa sổ đủ rộng hay dây quấn xếp nhiều lớp như trên hình 1.58 là phổ biến. Hiệu

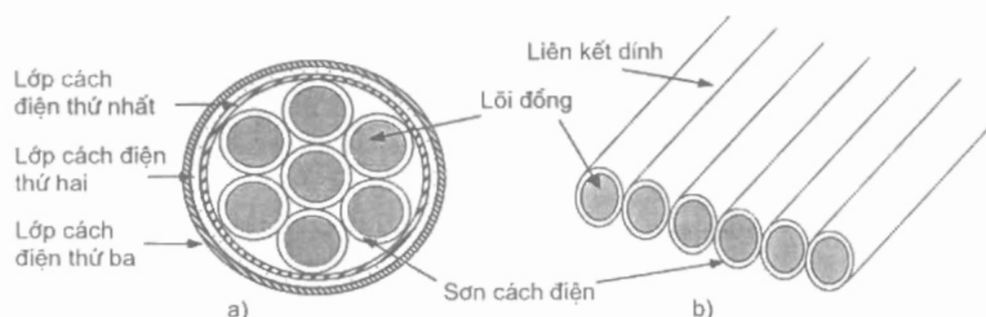
ứng gần làm sinh trong các lớp dây khác nhau các dòng điện khác nhau và lớn hơn dòng điện chạy chung trong mạch mắc nối tiếp [7, 8], tổn hao dòng điện xoáy trong các cuộn dây cũng tăng do hiệu ứng gần này.

Trong các thiết bị biến đổi, tần số làm việc lớn hàng chục đến hàng trăm kHz, các biến áp làm việc với tần số cao tổn hao trong dây dẫn lớn hơn (do thành phần tổn hao dòng điện xoáy lớn), dây dẫn cần có độ cách điện cao hơn. Cách điện không chỉ bọc một lớp như thông dụng ở tần số 50Hz mà có thể được bọc hai, ba và thậm chí 4 lớp cách điện. Do đó, cùng một tiết diện lõi đồng đường kính ngoài của dây khác nhau (xem phụ lục 3).

Cấu tạo dây làm việc ở tần số cao:

Một dạng của dây bên được gọi là dây Litz (từ tiếng Đức *Litzendraht*, nghĩa là *dây dệt*) được sử dụng để làm giảm hiệu ứng bề mặt cho các tần số từ vài kHz tới khoảng 1 MHz. Nó là một số dây dẫn độc lập được bên cùng với nhau theo một kiểu mẫu được thiết kế từ trước, vì thế từ trường tổng sẽ tác động lên các dây dẫn này tương đương nhau và kết quả là dòng điện tổng cộng sẽ được phân bố tương đương giữa chúng. Dây Litz thông thường được sử dụng trong các dây quấn của các máy biến áp tần số cao, để tăng hiệu quả của chúng.

Như đã nói trên, trong các thiết bị tần số cao, dây điện từ dùng để quấn biến áp và cuộn dây là loại dây bên nhiều sợi. Các nhà chế tạo đã đưa ra thị trường một số cấu tạo của dây bên nhiều sợi. Hình 1.59 vẽ hai loại kết cấu phổ biến.



Hình 1.59. Cấu tạo dây điện từ nhiều sợi
a) Thành bó tròn; b) Thành bó dệt.

Dây bên dệt:

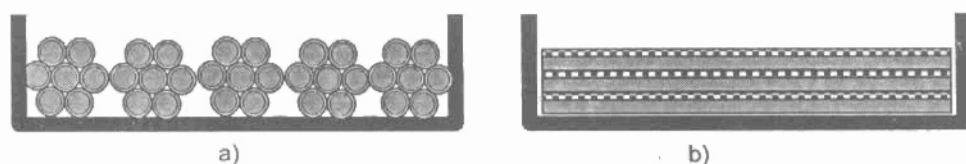
Dây bên hay dây xoắn được sử dụng trong nhiều ứng dụng cuộn cảm và máy biến áp tần số cao. Dây kiểu tròn được cho trong hình 1.59a và kiểu dệt được cho trên hình 1.59b. Cả hai loại đều có thể dùng để thay thế lá kim loại trong một vài ứng dụng. Dây bên dệt được sử dụng giống một dây quấn kiểu dệt giống một tấm chắn Faraday. Độ rộng của “băng”

dây có thể tăng hay giảm dễ dàng bằng cách thêm hay bớt các sợi lõi để được độ rộng thích hợp vừa khít với ống dây. Việc quấn nó cũng tương đối đơn giản. Dây cáp bọc có sự cách điện tuyệt đối và nó không có góc nhọn có thể làm đứt lớp cách điện như trong các lá dẫn.

Dây dẫn lá (lá kim loại) theo tiêu chuẩn:

Ta thường thấy lá kim loại trong thiết kế bộ biến đổi từ DC sang DC (ví dụ UPS) ở tần số cao và dòng điện lớn. Lý do chủ yếu làm việc ở tần số cao là giảm bớt về kích thước. Như ta biết, máy biến áp công suất chiếm tỷ trọng lớn nhất về kích thước trong các bộ biến đổi. Khi máy biến áp này hoạt động, hiệu ứng dòng điện bề mặt ảnh hưởng lớn và yêu cầu sử dụng dây dẫn mỏng hơn. Nếu cần phải dùng dây kích thước lớn hơn thì tốt nhất là dùng dây bện với các sợi song song (hình 1.59b). Sử dụng dây kích thước nhỏ sẽ ảnh hưởng lớn tới hệ số lấp đầy.

Khi sử dụng dây dẫn lá, hệ số lấp đầy tăng lên rất nhiều so với dây bện. Để so sánh, hình 1.60a dùng dây bện và hình 1.60b dùng dây lá. Trong các biến áp dùng dây bện, có một phần diện tích của sổ để trống. Phần diện tích trống này tạo thành những khoảng trống giữa các dây dẫn, và lớp cách điện trên dây. Việc quấn dây lá như trong hình 1.60b là sự sử dụng tối ưu diện tích quấn dây. Mỗi vòng dây có thể trải rộng trong phạm vi có thể, từ đầu này tới đầu kia của lõi hay ống dây. Yêu cầu cách điện giữa các hàng ở mức tối thiểu, đủ để loại bỏ gờ sắc khi quấn dây.



Hình 1.60. Các lớp dây của biến áp cao tần;
a) Dùng dây bện; b) Dùng dây lá.

Cách dùng dây dẫn lá:

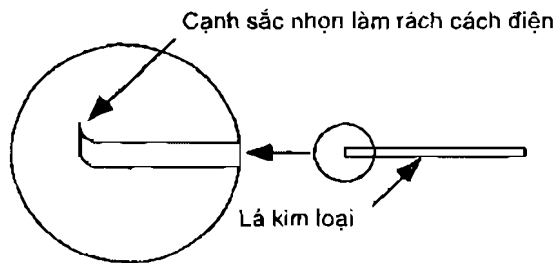
Thiết kế máy biến áp và các cuộn cảm với dây dẫn lá là một việc tương đối khó, nhất là nếu người kỹ sư chưa có kinh nghiệm. Đối với từng công việc cụ thể cần lựa chọn đúng vật liệu. Dây dẫn lá có những lợi thế chủ yếu ở tần số cao, dòng điện lớn, và trong một môi trường mật độ cao.

Hệ số sử dụng của sổ k_{sd} , có thể lên tới hơn 0,6, ở những điều kiện thích hợp. Những vật liệu làm dây dẫn đạt tiêu chuẩn là đồng và nhôm. Độ dày theo tiêu chuẩn thường chọn: 1,0mil; 1,4mil; 2,0mil; 5,0mil;

và 10mil (độ rộng theo tiêu chuẩn của dây dẫn lá, tính theo inch, như sau: 1; 1,4; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 2,50; 12,0; 16,0mil).

Người kỹ sư có thể tìm được những độ dày khác, nhưng những độ dày theo tiêu chuẩn nên được xét đến trước tiên. Cần thận trọng khi sử dụng độ dày không theo tiêu chuẩn.

Sau khi cắt xong, cần phải có biện pháp đặc biệt áp dụng đối với các cạnh sắc, như trong hình 1.61. Những cạnh bị cắt được cuộn lại ít nhất hai lần sau khi xẻ để loại bỏ những riềm sắc nhọn có thể xuyên qua lớp cách điện. Do đó, theo kinh nghiệm giữa hai lớp không nên dùng cách điện có bề dày nhỏ hơn 1mil.



Hình 1.61. Dây dẫn lá với những gờ sắc nhọn sau khi cắt

Khi quấn máy biến áp hoặc cuộn cảm bằng dây dẫn lá, biện pháp đặc biệt phải được lưu ý khi hàn nối dây. Một trong những vấn đề lớn nhất về việc sử dụng dây dẫn lá là chất liệu hàn. Vật liệu này sẽ đánh thủng cách điện, dẫn đến ngắn mạch. Lớp cách điện sử dụng cho dây dẫn lá thường rất mỏng. Lá dây dẫn sử dụng cho quấn máy biến áp và cuộn cảm cần được làm mềm hoàn toàn.

Còn có nhược điểm khác khi sử dụng lá dẹt, đó là điện dung ký sinh giữa các lớp dây. Điện dung ký sinh của cuộn dây quấn bằng dây dẫn lá được tính:

$$C = 0,0885 \cdot \frac{\epsilon \cdot (N - 1) l_{vd} R}{cd} \quad (1.87)$$

Trong đó: ϵ — hằng số điện môi;

l_{vd} — chiều dài trung bình của vòng dây;

N — số vòng;

R — độ rộng của dây dẫn lá, cm;

cd — bề dày cách điện lớp, cm.

Hằng số điện môi ϵ đối với các vật liệu khác nhau xem trong bảng 1.13.

Bảng 1.13. Hằng số điện môi

Vật liệu	ϵ
Các tông	3,2 – 3,5
Mylar	3 – 3,5
Kraft paper (giấy Kraft)	1,5 – 3,0
Fish paper	1,5 – 3,0
Nomex	1,6 – 2,9

1.4.2. Tính toán điện trở và trọng lượng dây

1. Tính toán chiều dài trung bình của vòng dây

Chiều dài (chu vi) vòng dây trung bình l_{vd} , dùng để tính điện trở và khối lượng dây quấn của cuộn dây. Hai loại lõi từ thường gặp là tiết diện lõi hình chữ nhật và hình tròn. Tính toán chu vi cuộn dây thực hiện bằng tính toán hình học.

Trường hợp trụ biến áp hình chữ nhật (hình 1.62a), có các kích thước a và b , cách điện giữa trụ với cuộn dây trong là cd_{01} , bề dày cuộn dây số 1 (bên trong) là B_1 , chu vi trung bình một vòng dây cuộn số 1 là l_{vd1} :

$$\begin{aligned} l_{vd1} &= 2[(a + 2cd_{01} + 2B_1/2) + (b + 2cd_{01} + 2B_1/2)] \\ &= 2(a + b + 4cd_{01} + 2B_1) \end{aligned} \quad (1.88a)$$

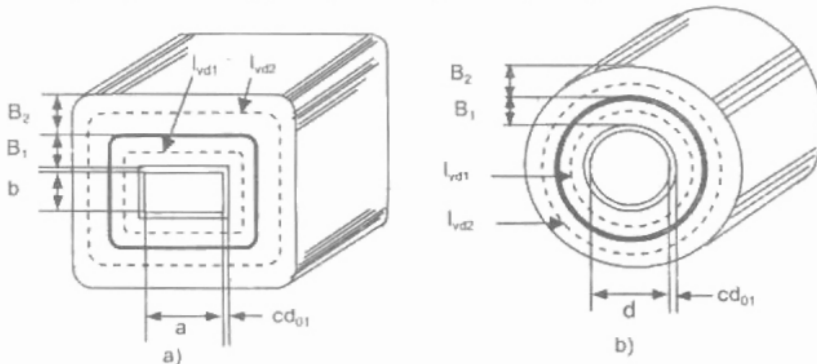
Cuộn số 2 bên ngoài có bề dày B_2 và chu vi trung bình một vòng dây cuộn số 2 (l_{vd2}) là:

$$\begin{aligned} l_{vd2} &= 2[(a + 2cd_{01} + 2B_1 + 2B_2/2) + (b + 2cd_{01} + 2B_1 + 2B_2/2)] \\ &= 2(a + b + 4cd_{01} + 4B_1 + 2B_2) \end{aligned} \quad (1.88b)$$

Trường hợp trụ biến áp hình tròn (hình 1.62b) đường kính d , cách điện giữa trụ với cuộn dây trong là cd_{01} chu vi trung bình một vòng dây (l_{vd1}) cuộn 1 (bên trong) là:

$$l_{vd1} = \pi(d + 2cd_{01} + B_1) \quad (1.89)$$

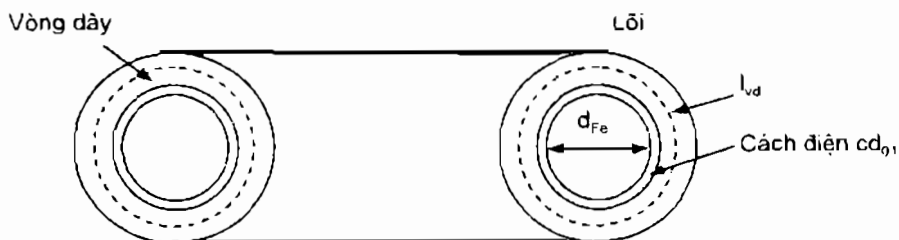
và cuộn ngoài là: $l_{vd2} = \pi(d + 2cd_{01} + 2B_1 + B_2)$



Hình 1.62. Kích thước cơ bản của vòng dây
a) Trụ chữ nhật; b) Trụ tròn.

2. Tính l_{vd} hình xoắn

Việc tính toán chiều dài trung bình của vòng dây cho một lõi hình xoắn để thỏa mãn tất cả các điều kiện là rất khó. Có quá nhiều cách để quấn quanh một lõi hình xoắn. Việc chế tạo một sản phẩm hình xoắn phụ thuộc vào tay nghề của người quấn dây. Công thức tính gần đúng chiều dài trung bình vòng dây l_{vd} của lõi hình xoắn như (1.63).



Hình 1.63. Cuộn dây hình xoắn

3. Điện trở dây dẫn

Để tính điện trở DC của cuộn dây cần phải biết tổng chiều dài l_{vd} của cuộn dây, tiết diện dây S_{Cu} , và điện trở suất Ω của vật liệu dây dẫn.

$$R_{dr} = (\rho l_{vd})/S_{Cu} = (\rho N \cdot l_{vd})/S_{Cu} \quad (1.90)$$

Trong đó: N — số vòng của cuộn dây cần tính;

l_{vd} — chu vi trung bình một vòng dây;

S_{Cu} — tiết diện dây.

Khối lượng đồng:

Để tính khối lượng của dây quấn cần biết tổng chiều dài dây l , tiết diện dây S_{Cu} , khối lượng riêng của dây m_{Cu}

$$M_{Cu} = V_{Cu} \cdot m_{Cu} = m_{Cu} \cdot N \cdot l_{vd} \cdot S_{Cu} \quad (1.91)$$

Trong đó: m_{Cu} — khối lượng riêng của dây dẫn và của đồng là: $8,89g/cm^3$.

1.4.3. Hệ số lấp đầy cửa sổ

Hệ số lấp đầy (hệ số sử dụng k_{sd}) cửa sổ là tiết diện trần của dây dẫn (thường là đồng) chiếm chỗ trong cửa sổ của biến áp hay cuộn dây. Hệ số lấp đầy cửa sổ phụ thuộc năm yếu tố:

- Dây dẫn có xét cách điện k_1 ;
- Ép chặt các lớp dây quấn xếp lớp hay quấn rời k_2 ;
- Tiết diện hiệu quả cửa sổ k_3 ;
- Cách điện giữa các lớp dây k_4 ;
- Trình độ tay nghề của người quấn k_5 .

Các yếu tố này có ảnh hưởng khác nhau. Nhưng nói chung hệ số lấp đầy được tính:

$$k_{\text{đl}} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \quad (1.92)$$

1. Hệ số xét tới cách điện dây dẫn k_1

Các dây điện từ trong các biến áp và cuộn dây cần phải có lớp cách điện (lớp này có thể là sơn, giấy hay vải cách điện).

Lớp cách điện có độ dày mỏng khác nhau nên hệ số này có thể chọn:

$$k_1 = S_{\text{Cu0}}/S_{\text{Cu}} = 0,67 - 0,94$$

với: S_{Cu0} , S_{Cu} – tiết diện dây dẫn không và có cách điện.

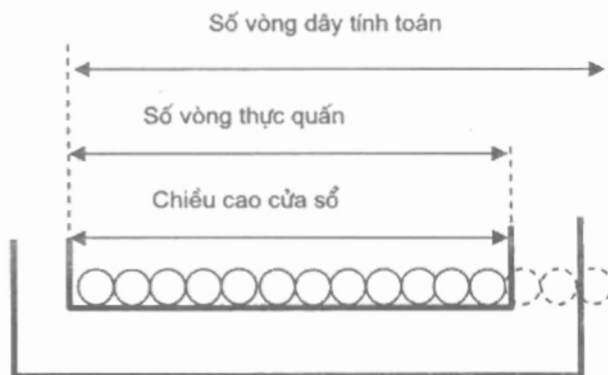
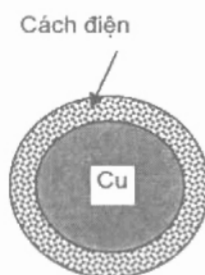
Giá trị k_1 phụ thuộc kích thước dây, dây càng lớn hệ số này càng lớn.

2. Hệ số ép chặt lớp dây k_2

Là khả năng ép chặt dây dẫn trong cửa sổ.

a) Ép sát các vòng dây trên một lớp

Khi quấn dây, các vòng dây cần được ép sát, tính toán chiều dài lớp dây có thể lớn hơn khả năng của sổ cho phép như ví dụ minh họa trên hình 1.64. Số vòng dây trên một lớp tính toán so với số vòng dây thực có thể sai số đến (10 – 15)%. Hệ số ép chặt lớp dây k_2 được lựa chọn khác nhau theo kích thước dây. Mật khác quấn dây xếp lớp liên tục và quấn dây không theo hàng, lớp hệ số này cũng khác nhau. Hệ số này có thể lựa chọn theo bảng 1.14.



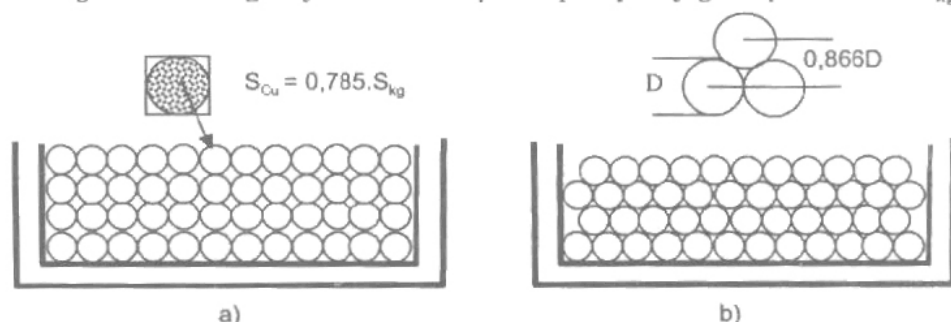
Hình 1.64. Một lớp dây quấn trong cửa sổ

Bảng 1.14. Hệ số ép chặt lớp dây k_2

Quấn xếp lớp		Quấn tự do	
Đường kính dây d_{cd} mm	Hệ số k_2	Đường kính dây d_{cd} mm	Hệ số k_2
2,67 – 0,505	0,9	2,67 – 0,505	0,9
0,452 – 0,294	0,89	0,452 – 0,294	0,85
0,294 – 0,17	0,88	0,294 – 0,17	
0,17 – 0,12	0,87	0,17 – 0,12	0,8
0,12 – 0,09	0,86	0,12 – 0,09	

b) Cách bố trí các lớp dây

Xếp lớp vòng dây cũng có ảnh hưởng rõ rệt đến hệ số lấp đầy của sổ. Các vòng dây dẫn tròn có thể được xếp hình vuông như trên hình 1.65a, khi đó phần dây dẫn chiếm chỗ chỉ bằng 0,785 diện tích không gian (S_{kg}), còn khi dây dẫn được xếp kiểu lục giác (hình 1.65b) khoảng trống thừa giữa các vòng dây ít hơn và hệ số lấp đầy bây giờ đạt tới $0,907S_{kg}$.



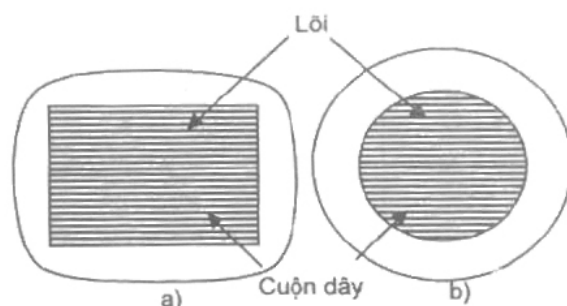
Hình 1.65. Cách quấn dây

a) Mặt cắt dọc cuộn dây vuông hệ số 0,785; b) Mặt cắt dọc cuộn dây lục lăng hệ số 0,907.

c) Ảnh hưởng của hình dạng lõi tới hệ số lấp đầy của sổ

Trong thực tế lõi từ thường có hai hình dạng: hình chữ nhật và hình tròn.

Trường hợp lõi chữ nhật, mặt cắt ngang của cuộn dây không thể là hình chữ nhật được mà kích thước có thể tăng thêm 15% đến 20% hay hệ số lấp đầy dây dẫn chỉ khoảng: 0,85. Trường hợp lõi tròn hệ số này có thể xấp xỉ 1.

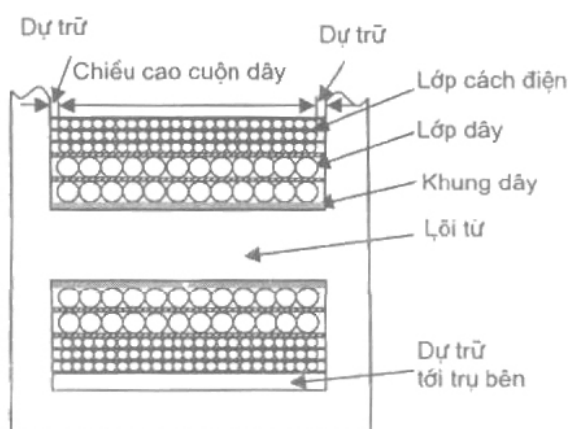


Hình 1.66. Mặt cắt ngang cuộn dây
a) Lõi chữ nhật; b) Lõi tròn.

Từ những vấn đề vừa nêu hệ số lấp đầy của sổ của dây điện trong cửa sổ chỉ khoảng $k_2 = 0,6$.

3. Cửa sổ hiệu quả

Cửa sổ hiệu quả (k_3) là xác định khoảng không thực tế của cửa sổ được phép quấn dây. Hình 1.67 vẽ kết cấu một cuộn dây trong cửa sổ điển hình. Để cách điện với trụ cần một khung dây, một số biến áp nhỏ khung dây này được đúc thành bobin bằng nhựa. Giữa các lớp dây cần có lớp cách điện, thường lớp cách điện bằng các loại giấy cách điện, độ dày mỏng của giấy cách điện được chọn



Hình 1.67. Xác định cửa sổ hiệu quả

dựa vào kích cỡ dây. Kích thước bìa cách điện gợi ý cho trong bảng 1.15. Giữa vòng dây ngoài cùng sát gông cũng cần một khoảng cách dự trữ, khoảng cách này vừa là để dự trữ vừa là cách điện. Khoảng cách dự trữ này cũng được lựa chọn theo kích thước dây, kích thước gợi ý được cho trên bảng 1.15.

Bảng 1.15. Độ dày của cách điện lớp và gông

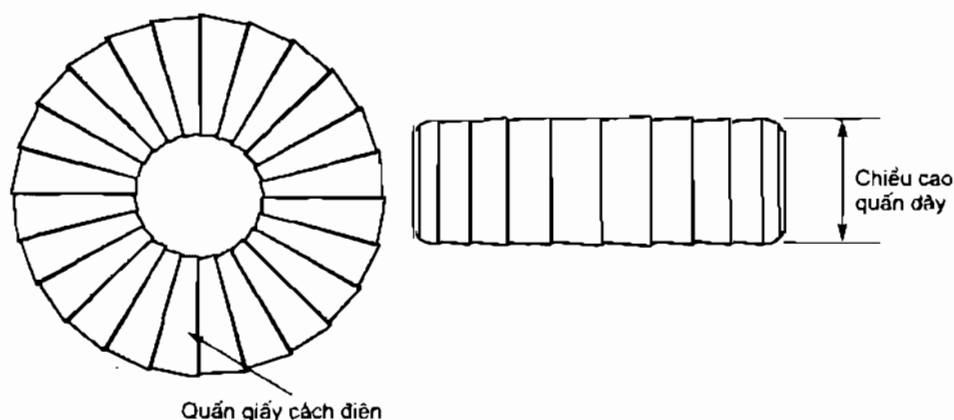
Loại dây		Cách điện	
AWG	Đường kính có cách điện d [mm]	cd _l mm	cd _g mm
10 – 16	2,67 – 1,37	0,25	6,5
17 – 19	1,22 – 0,98	0,18	4,7
20 – 21	0,88 – 0,78	0,13	3,9
22 – 23	0,7 – 0,6	0,08	3,0
24 – 27	0,56 – 0,4	0,05	
28 – 33	0,36 – 0,2	0,04	2,0
34	<0,2	0,03	1
cd _l – cách điện lớp, cd _g – cách điện gông			

Đối với các biến áp lõi tôn silic dạng EI hệ số $k_3 = 0,835 – 0,929$, lõi UU hai cuộn dây hai bên $k_3 = 0,55 – 0,75$, lõi ferit $k_3 = 0,687 – 0,873$, lõi xuyên $k_3 = 0,75$.

4. Hệ số cách điện k_4

Đối với đại đa số các loại lõi hệ số này không xét tới ($k_4 = 1$), bởi vì bản chất của hệ số này là cách điện giữa lõi với cuộn dây, mà trong thực tế các loại lõi khoảng cách dự trữ hay khung quấn dây trên hình 1.67 và đã được xét trong hệ số k_3 .

Trong trường hợp lõi xuyên, cách điện lõi được dùng các băng vải hay giấy quấn quanh lõi. Băng cách điện này khi quấn phải được xếp lớp. Do trụ quấn hình xuyên nên phần lớp sau chồng lên lớp trước của phía ngoài nhỏ hơn phía trong, xếp chồng của phía trong có thể nhiều lớp chồng lên nhau. Việc xếp chồng nhiều như vậy làm cho đường kính trong của lõi nhỏ lại. Hệ số k_4 được đưa vào. Tuy nhiên, giá trị gợi ý của k_4 ở đây khó đưa ra được vì còn phụ thuộc kích thước lõi cũng như kích thước băng vải.



Hình 1.68. Xử lý cách điện lõi xuyên

Kết luận:

Như vậy trong biểu thức (1.92), hệ số lấp đầy của sổ còn phụ thuộc bốn yếu tố:

Tiết diện dây dẫn trần so với dây dẫn có cách điện k_1 , hệ số này phụ thuộc nhiều vào kích thước dây, ví dụ dây AWG20 chọn $k_1 = 0,855$, dây AWG26 chọn $k_1 = 0,79$, tiết diện cuộn dây so với tiết diện của sổ được phép k_2 (thường vào khoảng 0,6), tiết diện hiệu quả của sổ k_3 (tiết diện được phép quấn dây so với tổng tiết diện của sổ thường chọn khoảng 0,75), cách điện giữa các lớp dây k_4 thường chọn 1.

Nói chung hệ số lấp đầy của các cuộn dây làm việc với tần số cao lựa chọn trong khoảng (0,26 – 0,5) và tần số càng cao hệ số lấp đầy càng nhỏ. Điều này được giải thích bởi hiệu ứng mặt ngoài, ở tần số cao số sợi chấp nhiều lên hệ số k_1 giảm xuống làm cho k_{sd} giảm.