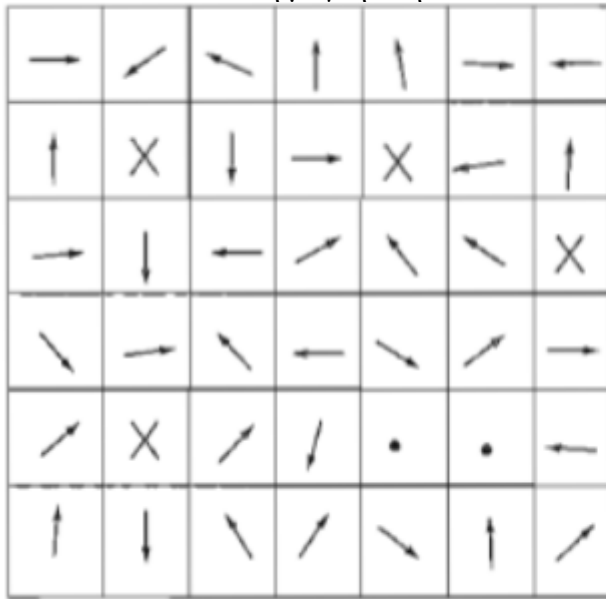


ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

Σιδηρομαγνητικά υλικά

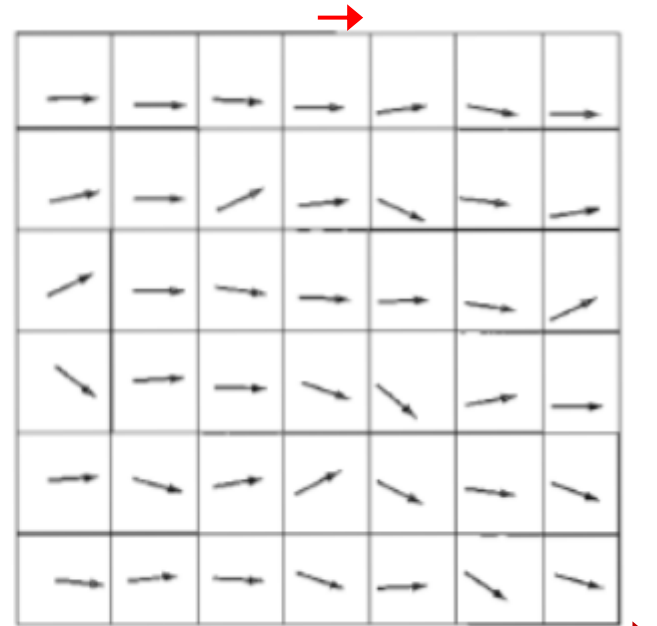
Τυχαία προσανατολισμένες Μαγνητικές περιοχές (magnetic domains).

Συνολική μαγνήτιση = 0



(a)

Εξωτερικό μαγνητικό πεδίο: $B_0 = \mu_0 H$



(b)

Μαγνητίζει το υλικό και δημιουργεί πρόσθετο, πολύ μεγαλύτερο, μαγνητικό πεδίο (διέγερση)

$$B_M = \mu_0 M = \chi_m B_0$$

Ολικό μαγνητικό πεδίο

$$B = B_0 + B_M = B_0 + \chi_m B_0 = (1 + \chi_m) B_0 = \mu_0 (1 + \chi_m) H = \mu_0 \kappa_m H$$

$$B = \mu H, \quad \mu = \mu_0 \kappa_m, \quad \kappa_m = 1.000 - 10.000$$

Όταν προσανατολιστούν όλες οι μαγνητικές περιοχές με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο η μαγνήτιση δεν μπορεί να αυξηθεί παραπάνω και φτάνουμε στον κορεσμό (saturation).

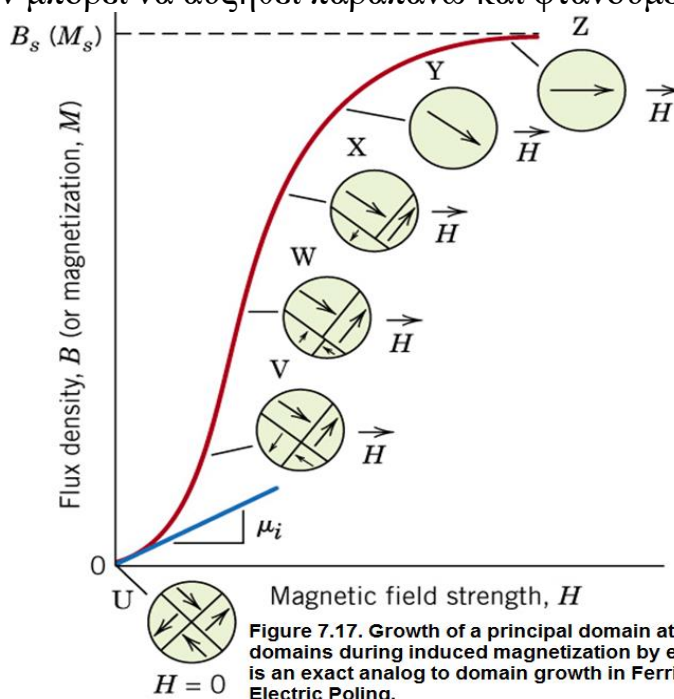
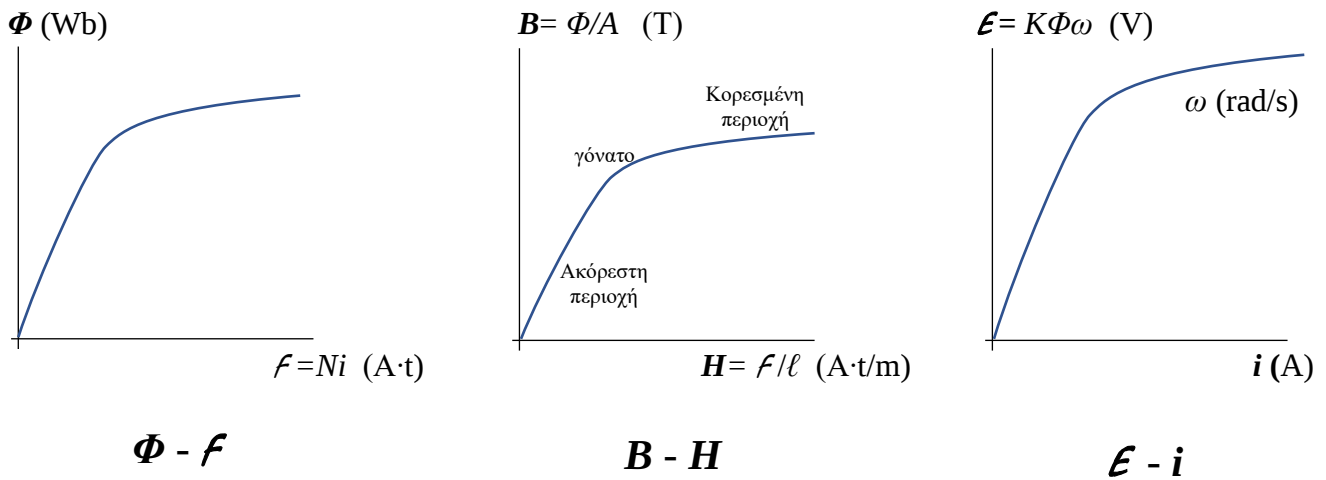
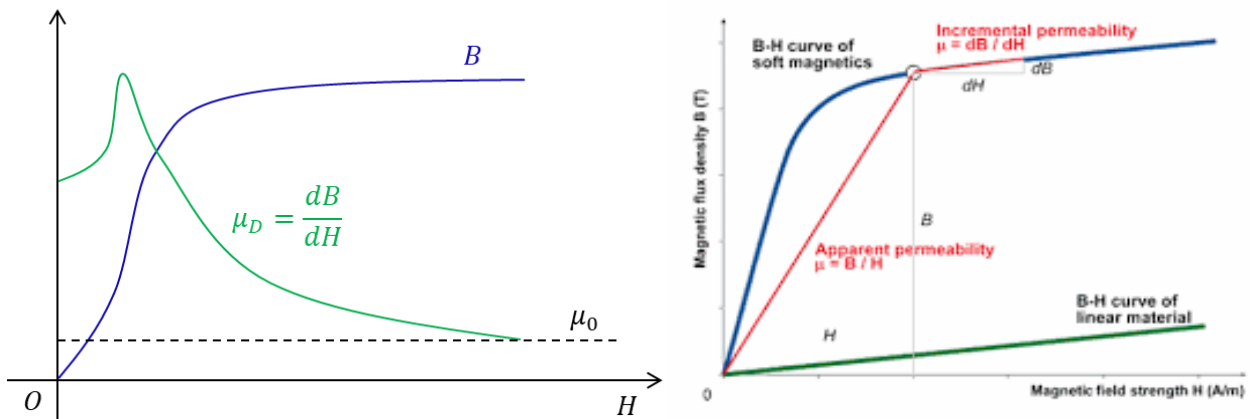


Figure 7.17. Growth of a principal domain at the expense of other domains during induced magnetization by externally applied field. This is an exact analog to domain growth in Ferri-Electric Material during Electric Poling.

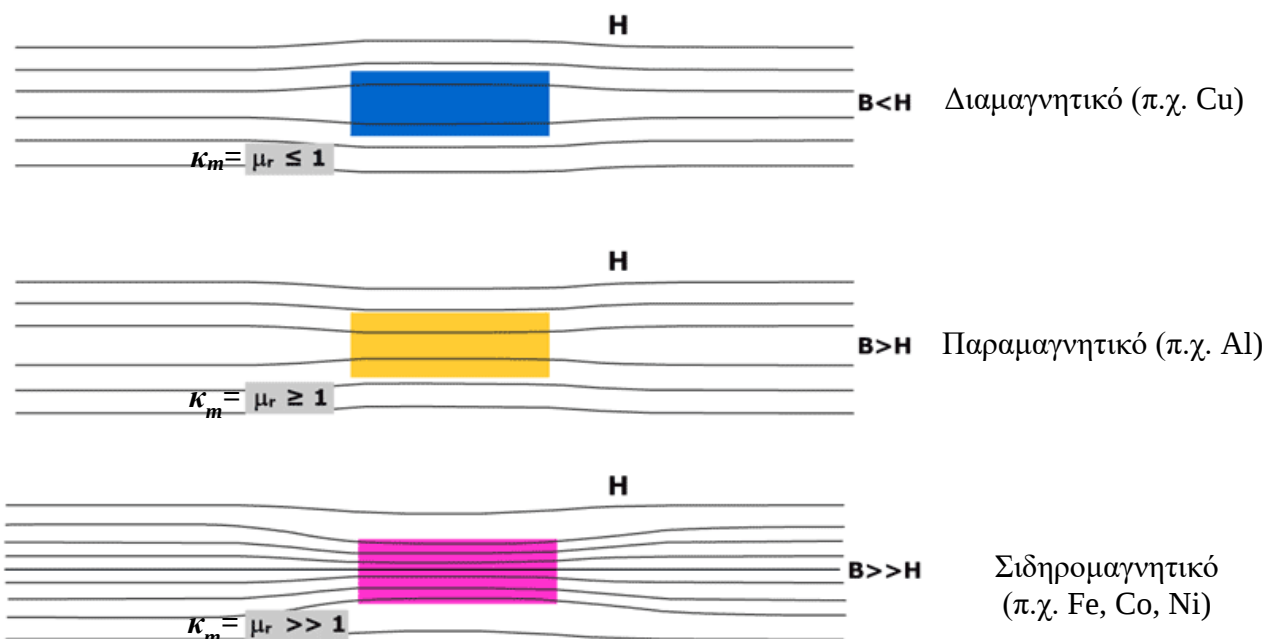
Τρόποι παρουσίασης της καμπύλης μαγνήτισης

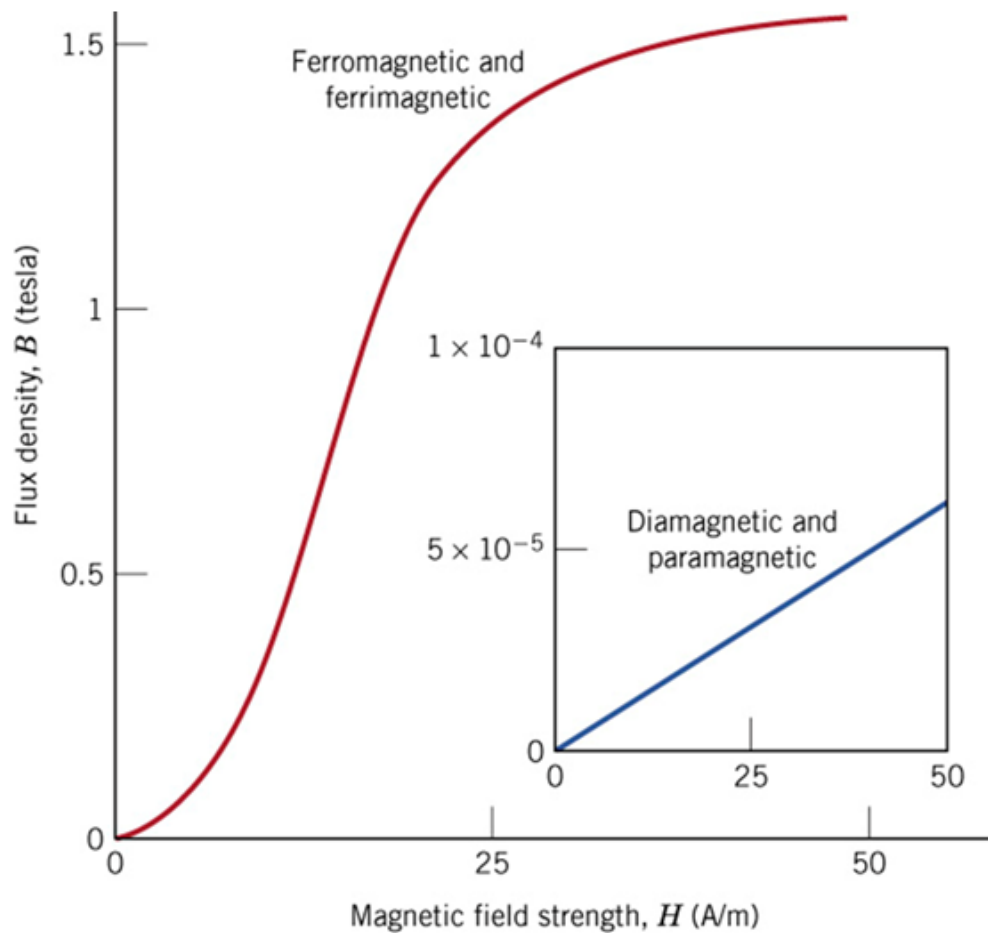
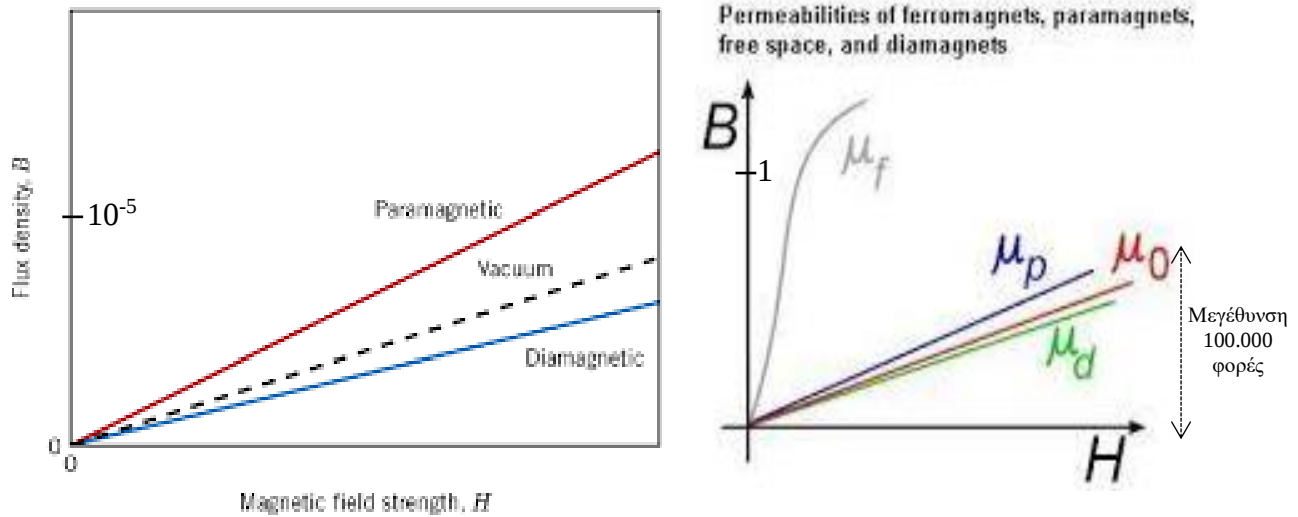


Επειδή σε κάθε σημείο $\Delta B = \mu \Delta H$
 Η κλίση είναι η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα.
 Δεν είναι σταθερή για τα σιδηρομαγνητικά υλικά



Για τα διαμαγνητικά και τα παραμαγνητικά υλικά η καμπύλη μαγνήτισης είναι ευθεία (αλλά είναι σχεδόν στο μηδέν, λίγο παρακάτω ή λίγο παραπάνω από την ευθεία του κενού)





Υστέρηση (hysteresis) : Όταν μειώνω το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο τα σιδηρομαγνητικά υλικά δεν ακολουθούν την αρχική καμπύλη μαγνήτισης (μπλε). Όταν μηδενιστεί το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο το υλικό έχει παραμένονσα μαγνήτιση (B_r : residual). Πρέπει να εφαρμόσω αντίθετο μαγνητίζον πεδίο H_c για να μηδενίσω πάλι τη μαγνήτιση του υλικού (coercivity : πεδίο εξαναγκαστικής απομαγνήτισης).

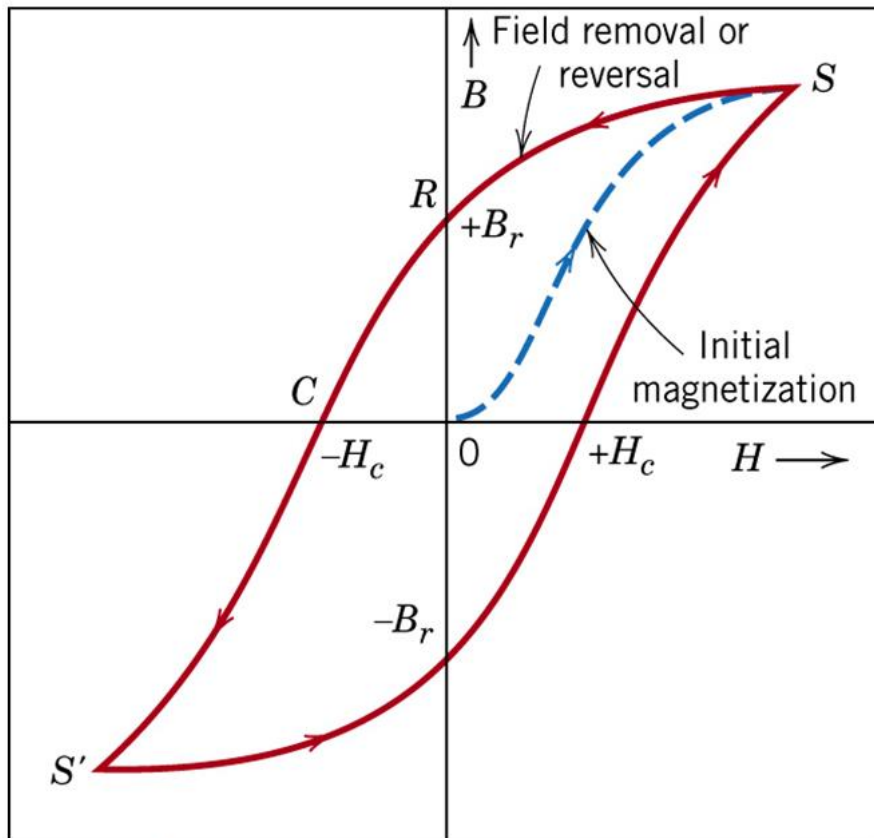
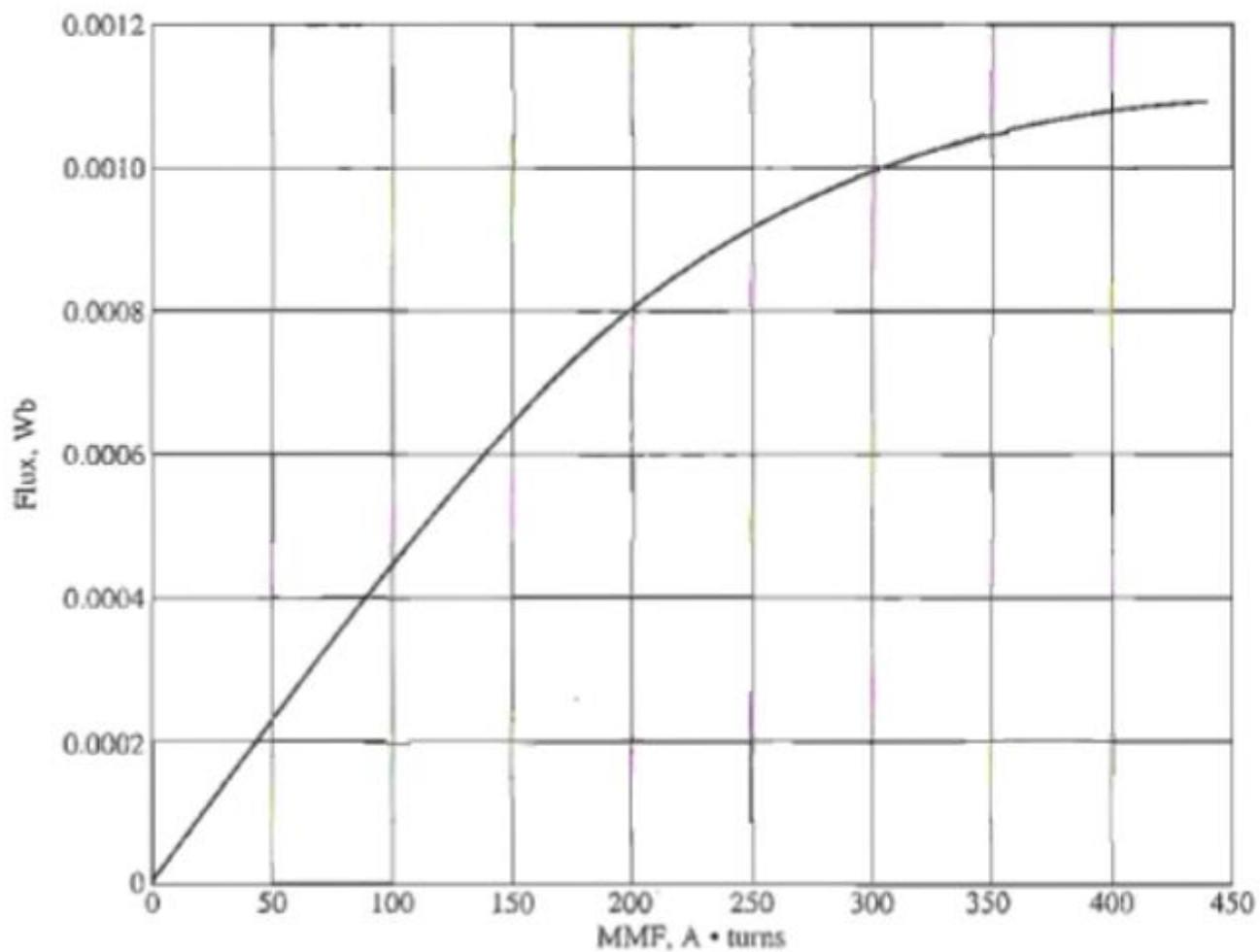


Figure 7.18. The Hysteresis Loop in a Ferromagnetic Material.

Παραδείγματα καμπυλών μαγνήτισης



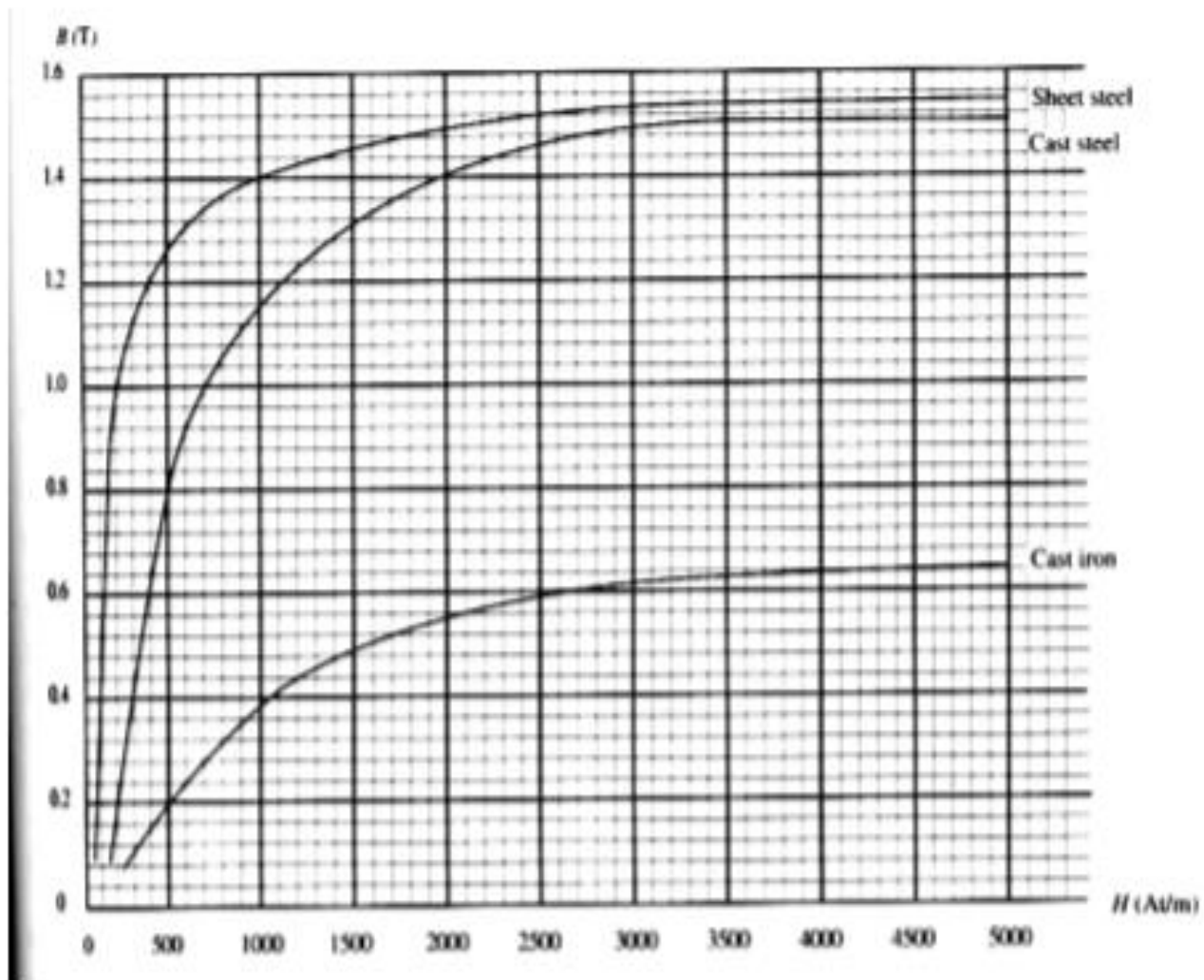
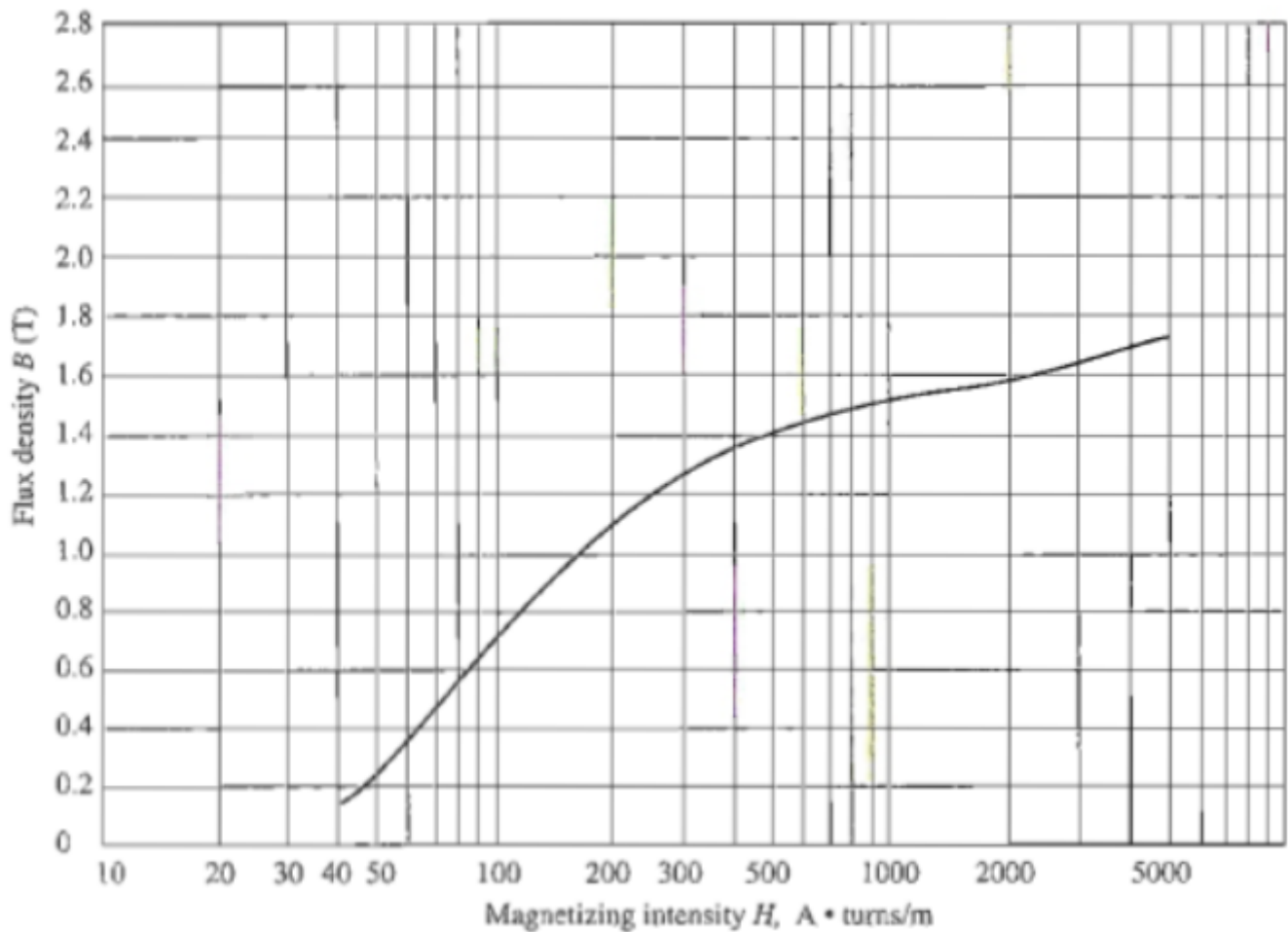
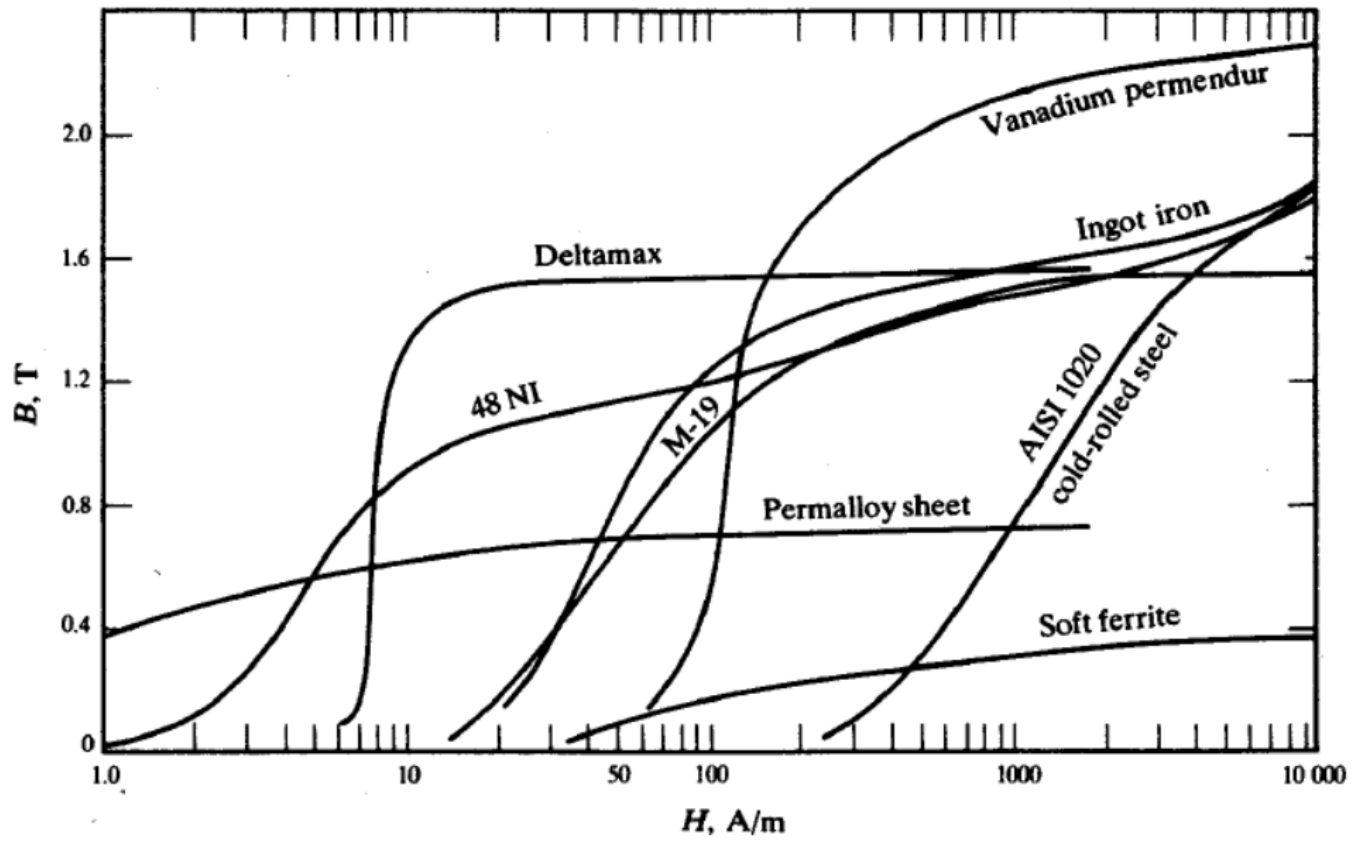
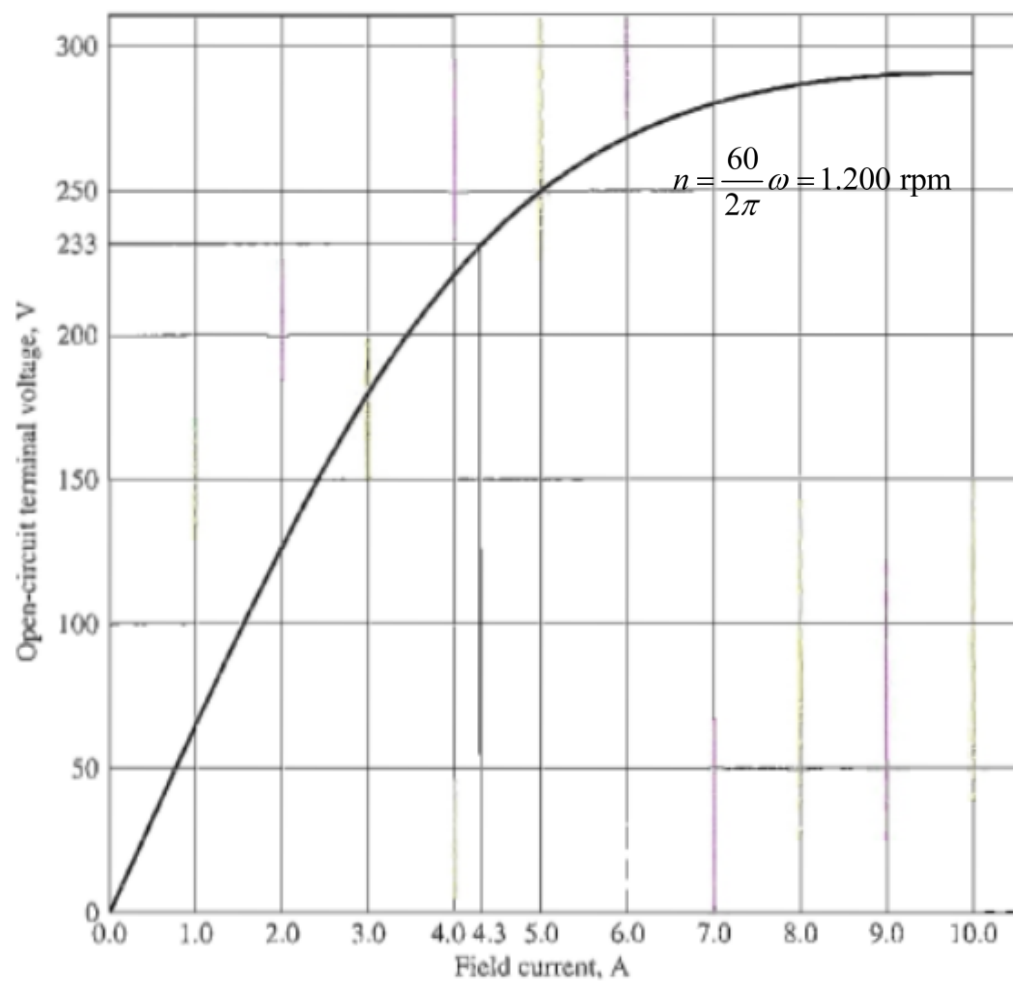
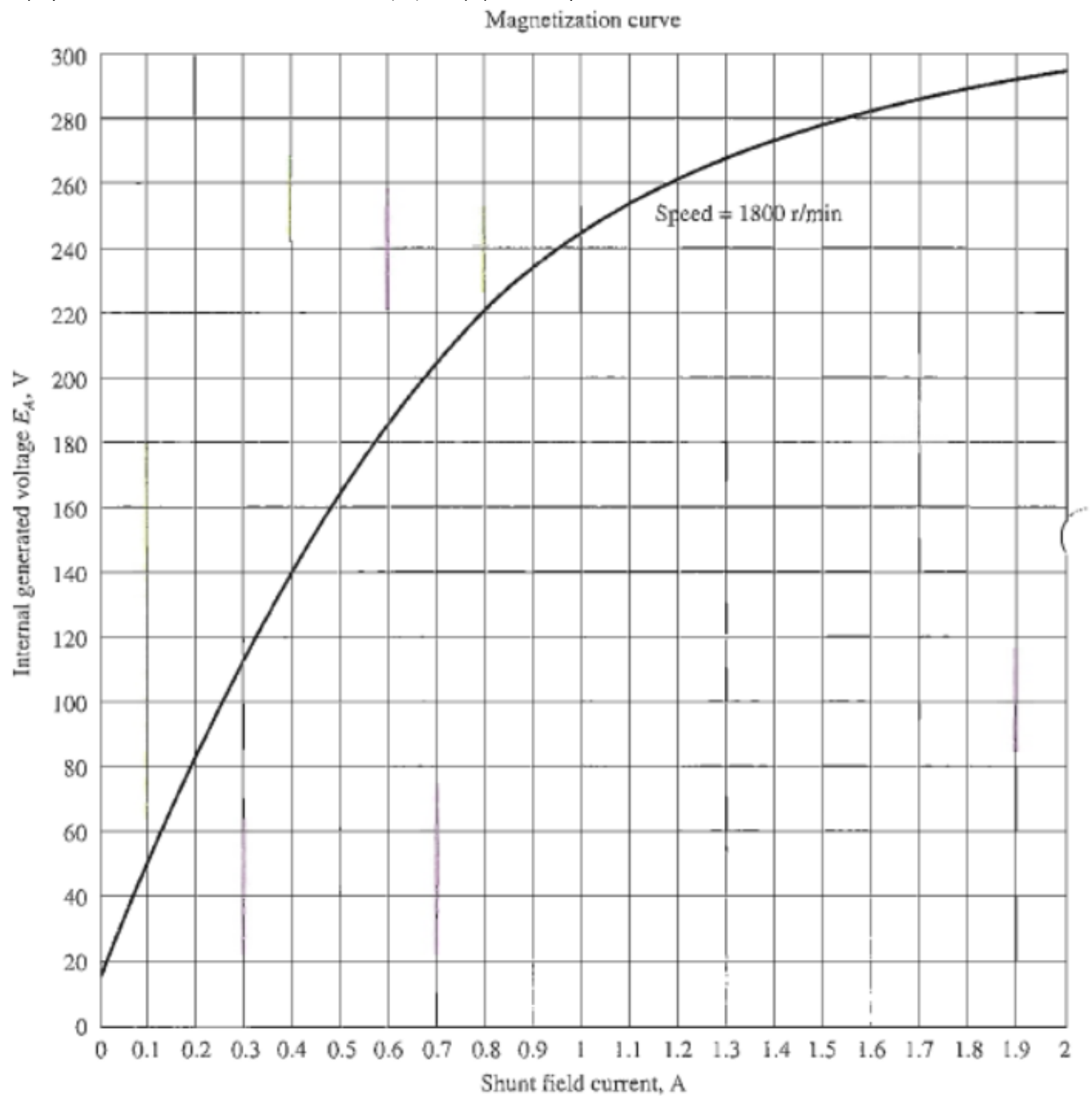


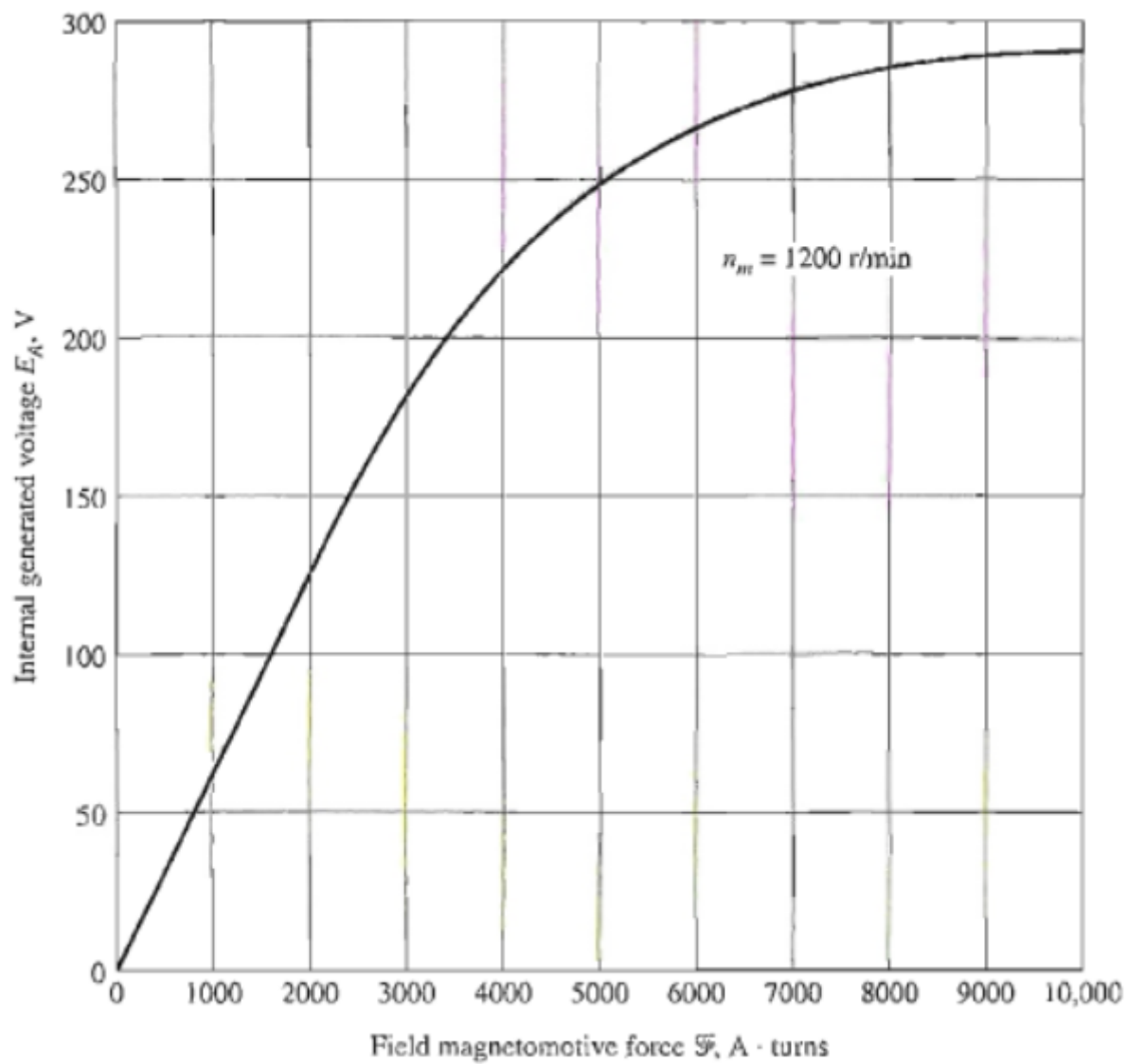
Figure 2: B-H Curves

Characteristics of Magnetic Materials and Permanent Magnets









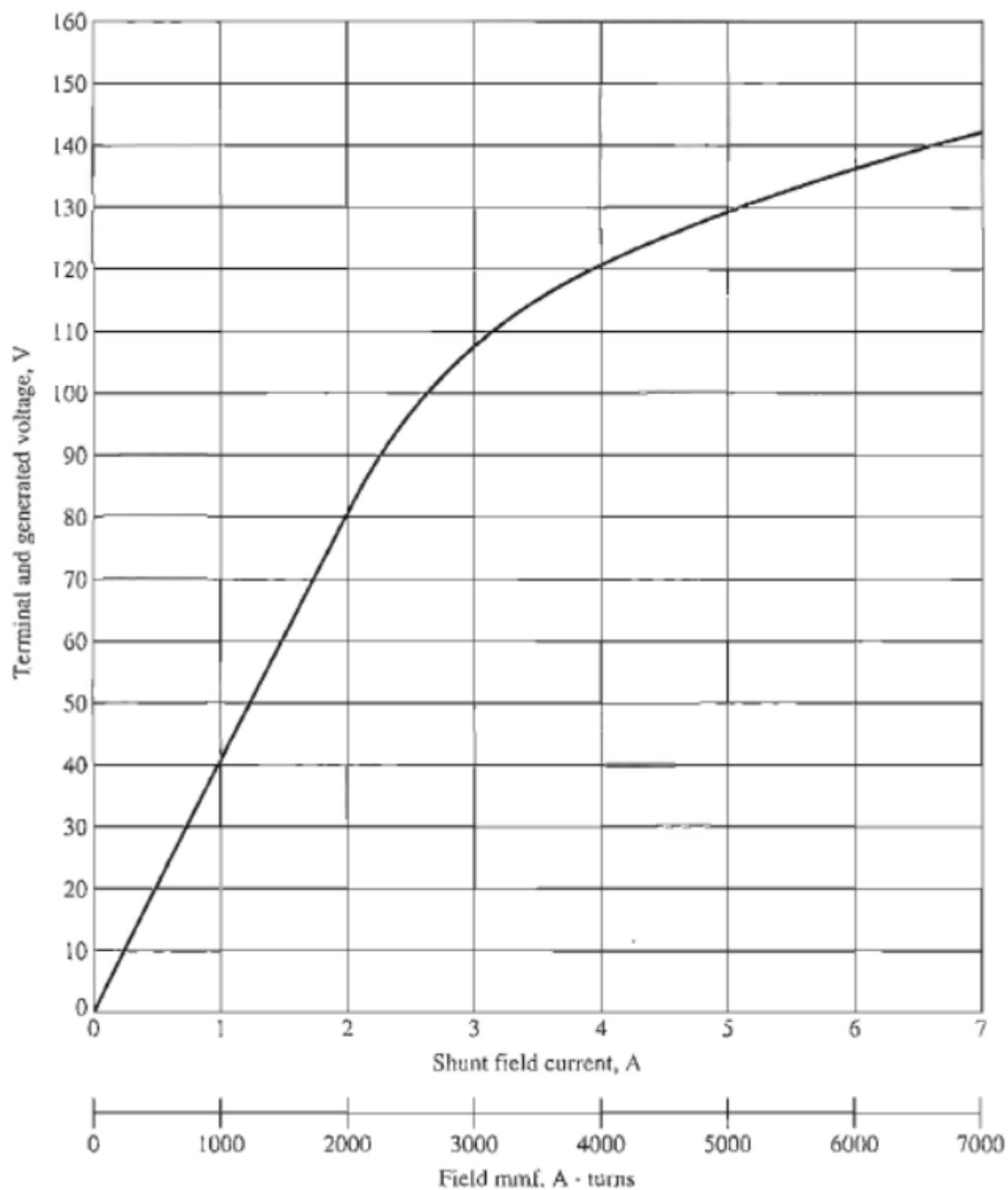


FIGURE P8-7

The magnetization curve for Problems 8-22 to 8-28. This curve was taken at a speed of 1800 r/min.

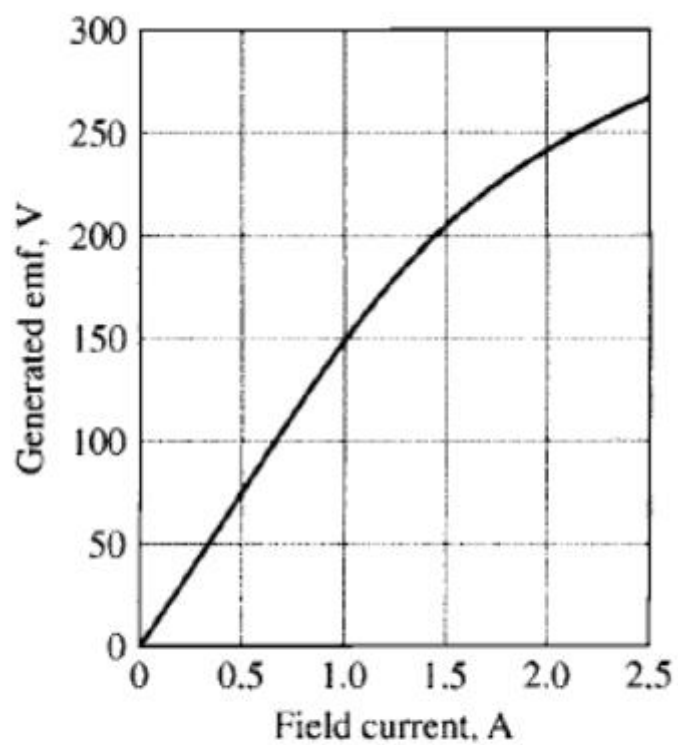
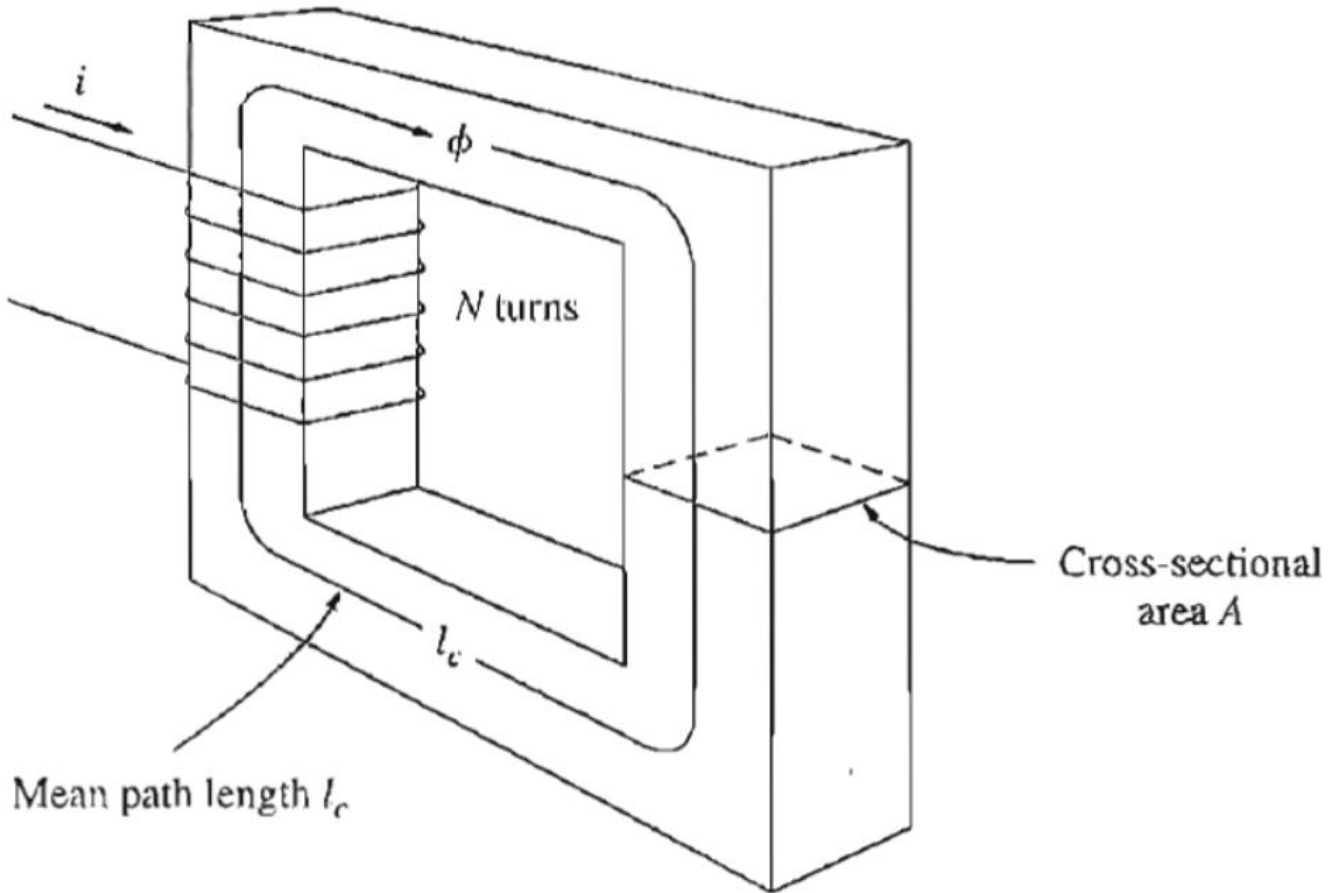


Figure 7.27 1200 r/min magnetization curve for the dc generator of Problem 7.4.

ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

Προσεγγιστική, εμπειρική μέθοδος για τον υπολογισμό της μαγνητικής ροής μέσα σε μια μηχανή.
Στην καλύτερη περίπτωση σου δίνει ακρίβεια 5%.



Νόμος Ampere: $\mathcal{F} \equiv \int_C \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I_{net} \Rightarrow H\ell_c = Ni \Rightarrow$

$$H = \frac{Ni}{\ell_c} \quad : \text{μαγνητίζον πεδίο} = \text{ανάλογο του ρεύματος},$$

μονάδες: $[H] = \frac{A \cdot t}{m}$, t : καθαρός αριθμός = αριθμός τυλιγμάτων (σπειρών πηνίου)[μπορεί και να μην αναγράφεται στις μονάδες]

Μαγνητικό πεδίο = ανάλογο της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού και του μαγνητίζοντος πεδίου

$$B = \mu H = \mu \frac{Ni}{\ell_c}$$

μονάδες: $[B] = T \equiv \frac{N}{A \cdot m}$, $[\mu] = \frac{T \cdot m}{A} = \frac{Wb}{A \cdot m} = \frac{H}{m} = \frac{N}{A^2}$, χένρι: $H = \frac{V \cdot s}{A} = \frac{Wb}{A}$

Μαγνητική ροή:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = BA \Rightarrow \Phi = \frac{\mu Ni}{\ell_c} A = Ni \left(\frac{\mu A}{\ell_c} \right) \Rightarrow \Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}, \quad \text{ανάλογη της } I = \frac{V}{R} \quad \text{Ohm}$$

μονάδες: $[\Phi] = T \cdot m^2 \equiv Wb = V \cdot s$

ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ

Νόμος του Ohm

$$V = IR \Rightarrow I = \frac{V}{R}$$

ηλεκτρική τάση πηγής
ή ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ=emf), V
[V] = V, βολτ

ηλεκτρικό ρεύμα, I
[I] = A

ηλεκτρική αντίσταση, $R = \frac{\ell}{\sigma A}$

[R] = Ω, ωμ

ειδική αγωγιμότητα (conductivity), σ

ειδική αντίσταση $\rho = \frac{1}{\sigma}$

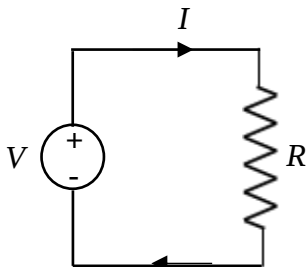
[ρ] = Ω · m, [σ] = (Ω · m)⁻¹ = S · m⁻¹

αγωγιμότητα (αγωγή) $G = \frac{1}{R}$

[G] = $\frac{1}{\Omega}$ = S, ζίμενς

$$I = GV$$

Σχήμα



$$V = IR$$

Απλοποιημένος νόμος του Ampere

$$\mathcal{F} = \Phi \mathcal{R} \Rightarrow \Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$$

μαγνητεγερτική δύναμη,
 mmf =magnetomotive force, $\mathcal{F} = Ni$
[$\mathcal{F}$] = A · t, αμπερελίγματα

μαγνητική ροή, Φ
[Φ] = T · m² ≡ Wb, βέμπερ

μαγνητική αντίσταση, $\mathcal{R} = \frac{\ell}{\mu A}$

[$\mathcal{R}$] = $\frac{A \cdot t}{Wb}$,

μαγνητική διαπερατότητα, $\mu = \kappa_m \mu_0$

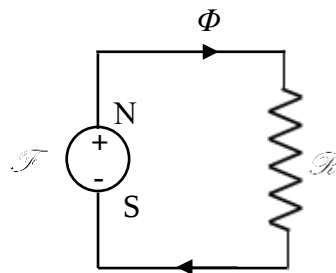
[μ] = $\frac{H}{m} = \frac{Wb}{A \cdot t \cdot m}$,

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{Wb}{A \cdot t \cdot m}$

μαγνητική αγωγιμότητα, $\mathcal{S} = \frac{1}{\mathcal{R}}$

[$\mathcal{S}$] = $\frac{Wb}{A \cdot t}$

$$\Phi = \mathcal{S} \mathcal{F}$$



$$\mathcal{F} = \Phi \mathcal{R}$$

Σε σειρά :

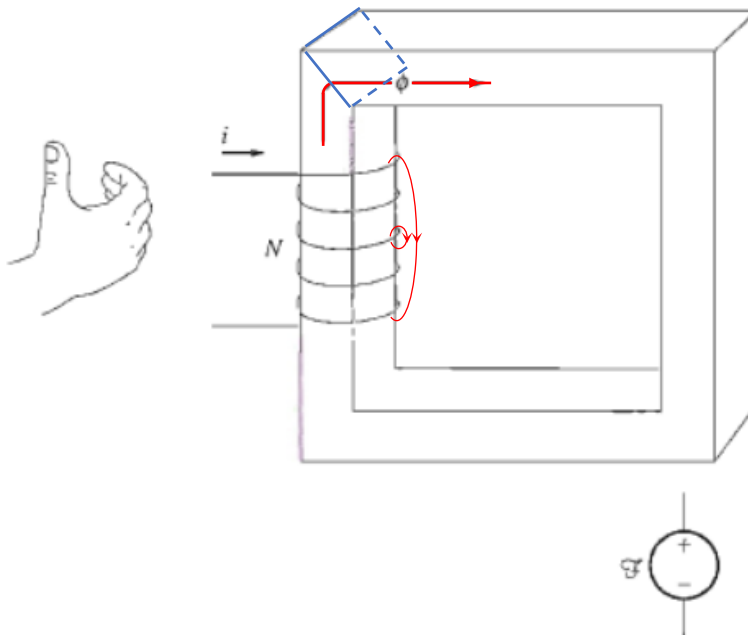
$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \dots$$

Παράλληλα:

$$\frac{1}{\mathcal{R}} = \frac{1}{\mathcal{R}_1} + \frac{1}{\mathcal{R}_2} + \dots \Rightarrow \mathcal{S} = \mathcal{S}_1 + \mathcal{S}_2 + \dots$$

Περιορισμοί

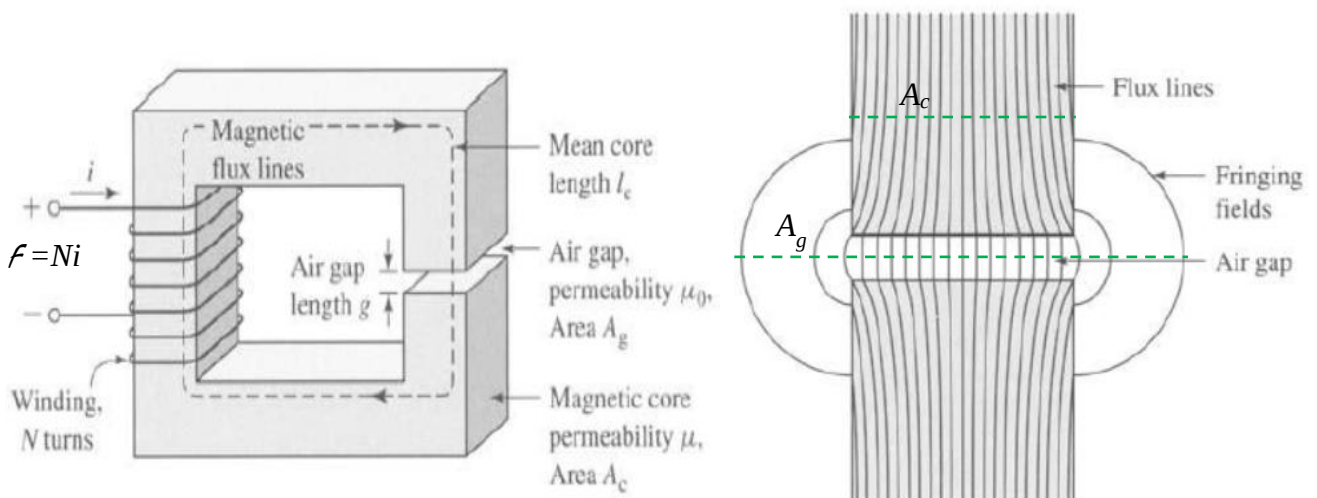
1) Μαγνητική ροή διαρροής (leakage)



2) Μήκη διατομές δεν είναι σταθερά (μήκος εξαρτάται από τη διαδρομή μέσα στα όρια του υλικού, στις στροφές η διατομή μεγαλώνει)

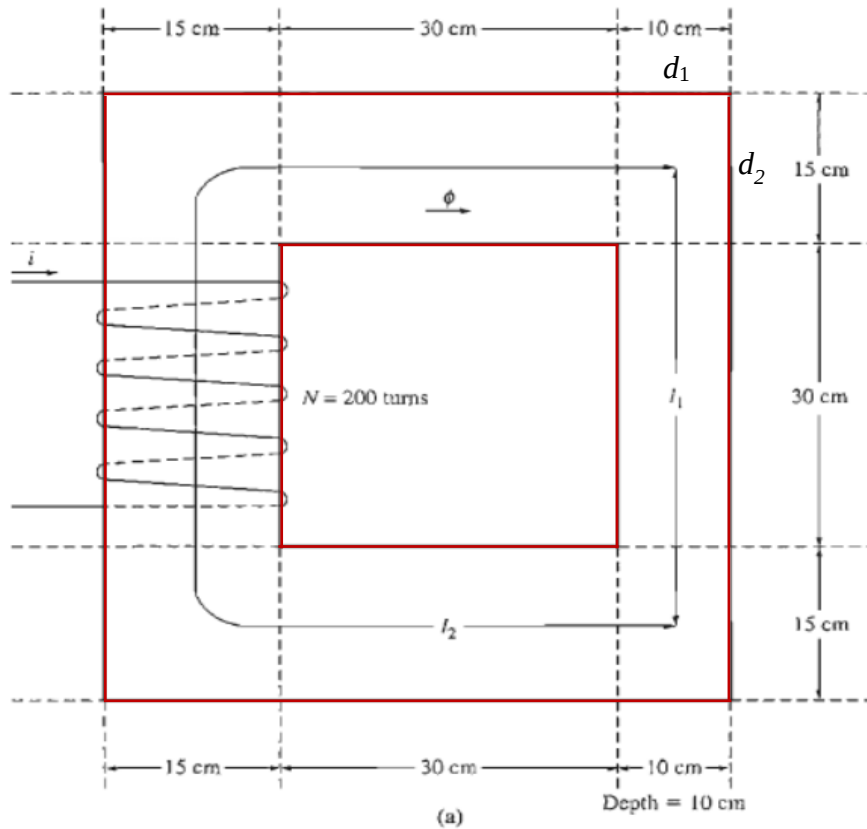
3) Μαγνητική διαπερατότητα δεν είναι σταθερή (πρέπει να την εκτιμούμε κάθε φορά από την καμπύλη μαγνήτισης)

4) Θυσάνωση (fringing effect)(στα διάκενα αέρος πρέπει να εκτιμήσουμε μεγαλύτερη διατομή ώστε να συμπεριλάβουμε όλη τη μαγνητική ροή)

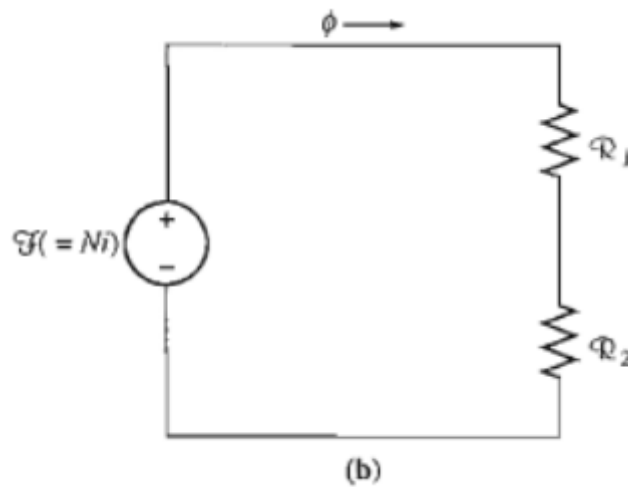


Παράδειγμα 1 Πυρήνας ανομοιόμορφου πλάτους

Πάχος πυρήνα $w=10$ cm, Αριθμός σπειρών $N= 200$. Ηλεκτρικό ρεύμα $i=1$ A. Σχετική μαγνητική διαπερατότητα (μ_r βιβλίου) $\mu_m=2500$. Ποια είναι η τιμή της μαγνητικής ροής Φ στο εσωτερικό του;



Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα:



Υπολογισμός μαγνητικών αντιστάσεων

$$\ell_1 = 7,5 + 30 + 7,5 = 45 \text{ cm} = 0,45 \text{ m}$$

$$A_1 = wd_1 = (0,1 \text{ m})(0,1 \text{ m}) = 0,01 \text{ m}^2$$

$$\mathcal{R}_1 = \frac{\ell_1}{\mu A_1} = \frac{\ell_1}{\kappa_m \mu_0 A_1} = \frac{0,45 \text{ m}}{(2500)(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Atm})(0,01 \text{ m}^2)} \Rightarrow \mathcal{R}_1 = 14300 \text{ A} \cdot \text{t/Wb}$$

$$\ell_2 = 5 + 30 + 7,5 + 7,5 + 30 + 7,5 + 7,5 + 30 + 5 = 130 \text{ cm} = 1,30 \text{ m}$$

$$A_2 = wd_2 = (0,1 \text{ m})(0,15 \text{ m}) = 0,015 \text{ m}^2$$

$$\mathcal{R}_2 = \frac{\ell_2}{\mu A_2} = \frac{\ell_2}{\kappa_m \mu_0 A_2} = \frac{1,30 \text{ m}}{(2500)(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Atm})(0,015 \text{ m}^2)} \Rightarrow \mathcal{R}_2 = 27600 \text{ A} \cdot \text{t/Wb}$$

Ολική μαγνητική αντίσταση:

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 = 14300 + 27600 = 41900 \text{ A} \cdot \text{t/Wb}$$

Μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ): $\mathcal{F} = Ni = (200 \text{ t})(1,0 \text{ A}) = 200 \text{ A} \cdot \text{t}$

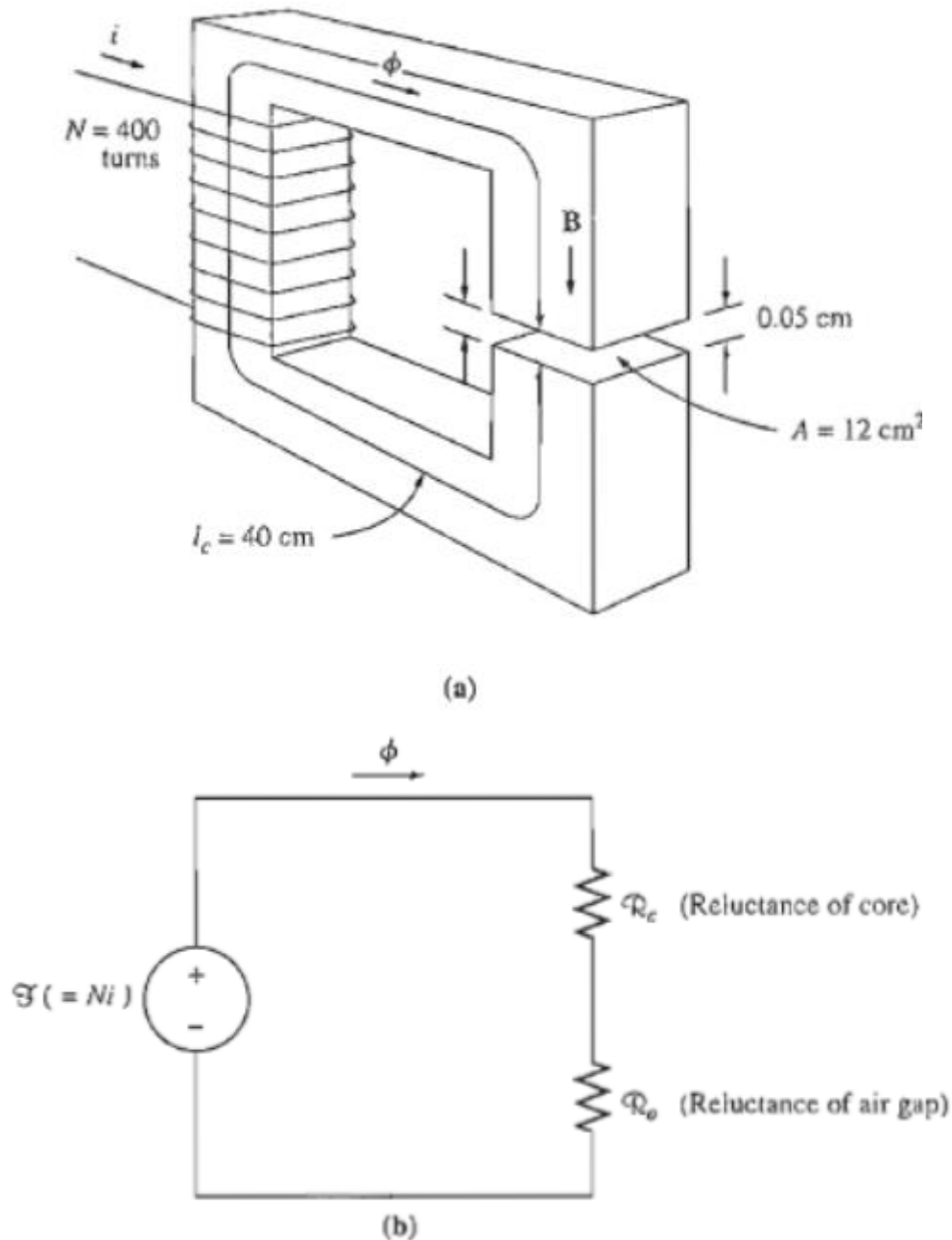
Μαγνητική ροή:
$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = \frac{200 \text{ A} \cdot \text{t}}{41900 \text{ A} \cdot \text{t/Wb}} = 0,0048 \text{ Wb}$$

Παράδειγμα 2 Πυρήνας με διάκενο αέρα

Μέσο μήκος πυρήνα $\ell_c = 40$ cm, μήκος διακενου αέρα (airgap) $\ell_g = 0,05$ cm, αριθμός σπειρών $N = 400$, διατομής πυρήνα $A_c = 12$ cm², σχετική μαγνητική διαπερατότητα σιδηρομαγνητικού υλικού πυρήνα (μ_r βιβλίου) $\kappa_m = 4000$. Η διατομή του διακενου αυξάνεται λόγω θυσάνωσης κατά 5%.

Ποια είναι η τιμή της ολικής μαγνητικής αντίστασης;

Τι ρεύμα i απαιτείται για να δημιουργηθεί μαγνητικό πεδίο $B=0,5$ T στο διάκενο;



Υπολογισμοί μαγνητικών αντιστάσεων

$$\mathcal{R}_c = \frac{\ell_c}{\mu A_c} = \frac{\ell_c}{\kappa_m \mu_0 A_c} = \frac{0,40 \text{ m}}{(4000)(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Atm})(0,0012 \text{ m}^2)} \Rightarrow \mathcal{R}_c = 66300 \text{ A} \cdot \text{t/Wb}$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{\ell_g}{\mu_0 A_g} = \frac{0,0005 \text{ m}}{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Atm})(1,05 \times 0,0012 \text{ m}^2)} \Rightarrow \mathcal{R}_g = 316000 \text{ A} \cdot \text{t/Wb}$$

Ολική μαγνητική αντίσταση:

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g = 66300 + 316000 = 382.300 \text{ A} \cdot \text{t/Wb}$$

$$316.000 > 66.300 \Rightarrow \mathcal{R}_g > \mathcal{R}_c$$

$$\mathcal{F} = \Phi \mathcal{R} \Rightarrow Ni = B_g A_g \mathcal{R} \Rightarrow i = \frac{B_g A_g \mathcal{R}}{N}$$

$$i = \frac{(0,5 \text{ Wb/m}^2)(1,05 \times 0,0012 \text{ m}^2)(382.300 \text{ A} \cdot \text{t/Wb})}{400 \text{ t}} = 0,60 \text{ A}$$

Παράδειγμα 3 Απλοποιημένος κινητήρας

Διατομή πυρήνα στάτη και μέση διατομή δρομέα $A_s=A_r=12 \text{ cm}^2=0,0012 \text{ m}^2$

Μέσο μήκος στάτη $\ell_s=50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$

Μέσο μήκος δρομέα $\ell_r=5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$

Μήκος κάθε διάκενου $\ell_g=0,05 \text{ cm} = 0,0005 \text{ m}$

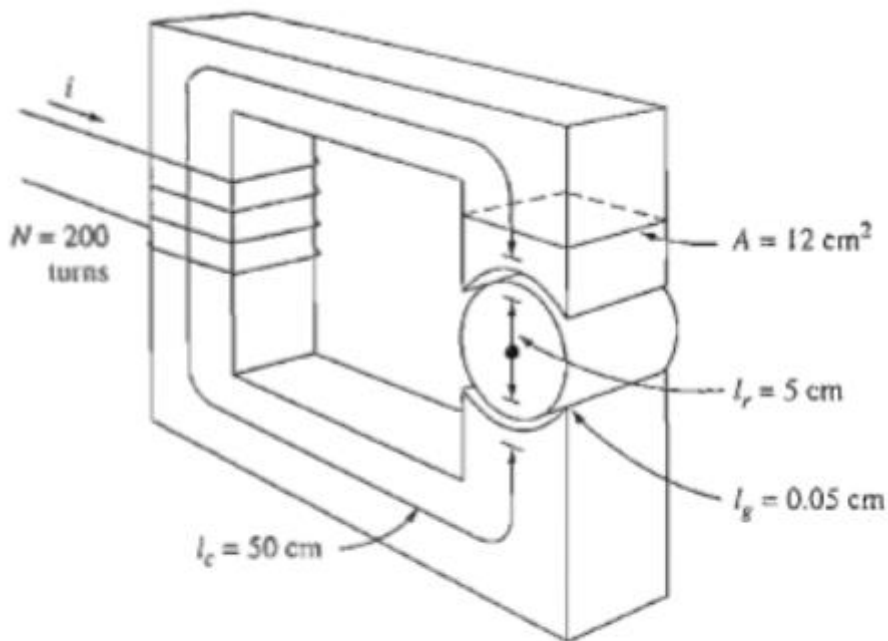
Διατομή κάθε διάκενου $A_g=14 \text{ cm}^2=0,0014 \text{ m}^2$

Σχετική μαγνητική διαπερατότητα $\kappa_m=2000$

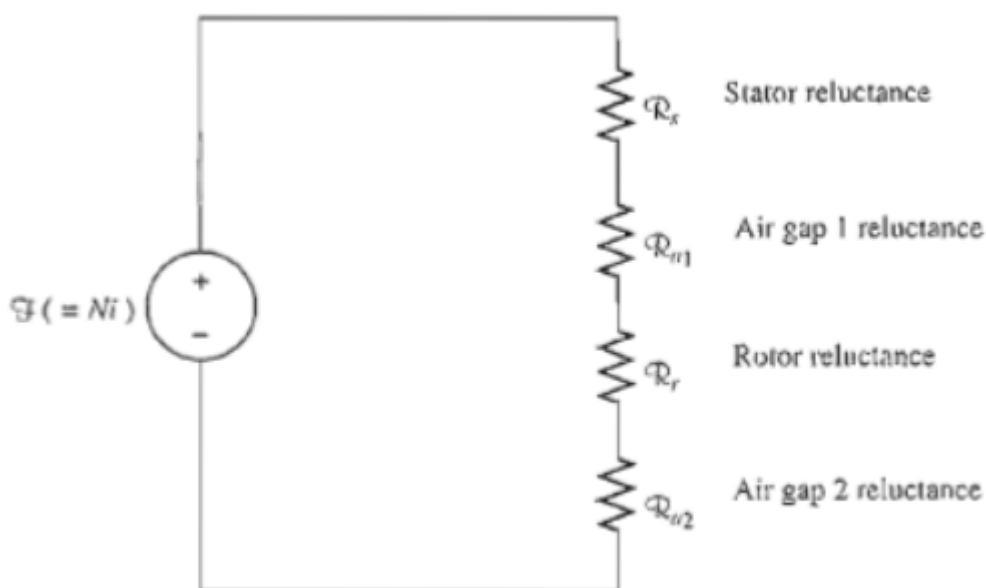
Αριθμός σπειρών $N=200$

Ηλεκτρικό ρεύμα $i=1,0 \text{ A}$

Ποια είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου B στα διάκενα;



(a)



Υπολογισμοί μαγνητικών αντιστάσεων

$$\mathcal{R}_s = \frac{\ell_s}{\mu A_s} = \frac{\ell_s}{\kappa_m \mu_0 A_s} = \frac{0,50 \text{ m}}{(2000)(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Atm})(0,0012 \text{ m}^2)} \Rightarrow \mathcal{R}_c = 166.000 \text{ A} \cdot \text{t/Wb}$$

$$\mathcal{R}_r = \frac{\ell_r}{\mu A_r} = \frac{\ell_r}{\kappa_m \mu_0 A_r} = \frac{0,05 \text{ m}}{(2000)(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Atm})(0,0012 \text{ m}^2)} \Rightarrow \mathcal{R}_r = 16.600 \text{ A} \cdot \text{t/Wb}$$

$$\mathcal{R}_{g1} = \mathcal{R}_{g2} = \frac{\ell_g}{\mu_0 A_g} = \frac{0,0005 \text{ m}}{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Atm})(0,0014 \text{ m}^2)} \Rightarrow$$

$$\mathcal{R}_{g1} = \mathcal{R}_{g2} = 284.000 \text{ A} \cdot \text{t/Wb}$$

Παρατηρούμε ότι $568.000 > 182.600 \Rightarrow R_g = R_{g1} + R_{g2} > R_{Fe} = R_s + R_r$

Ολική μαγνητική αντίσταση:

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_s + \mathcal{R}_{g1} + \mathcal{R}_r + \mathcal{R}_{g2} = 166.000 + 284.000 + 16.600 + 284.000 = 751.000 \text{ A} \cdot \text{t/Wb}$$

Μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ): $\mathcal{F} = Ni = (200 \text{ t})(1,0 \text{ A}) = 200 \text{ A} \cdot \text{t}$

Μαγνητική ροή: $\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = \frac{200 \text{ A} \cdot \text{t}}{751.000 \text{ A} \cdot \text{t/Wb}} = 0,00266 \text{ Wb}$

Μαγνητικό πεδίο: $B = \frac{\Phi}{A} = \frac{0,00266 \text{ Wb}}{0,0014 \text{ m}^2} = 0,19 \text{ T}$