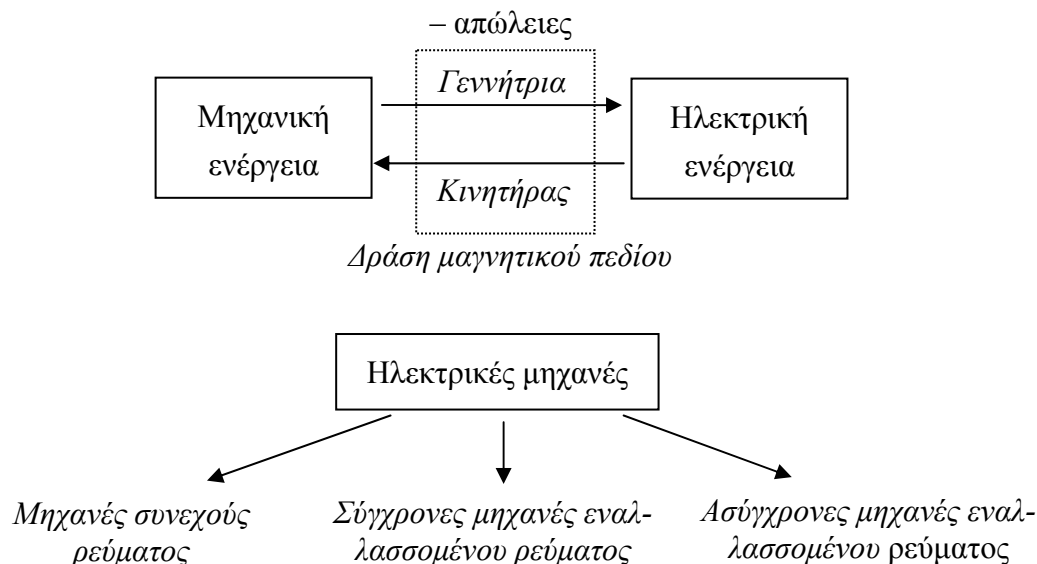


ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Η ηλεκτρική μηχανή είναι μια διάταξη μετατροπής μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αντίστροφα.



Κάθε ηλεκτρική μηχανή μπορεί να εργαστεί και ως γεννήτρια και ως κινητήρας.

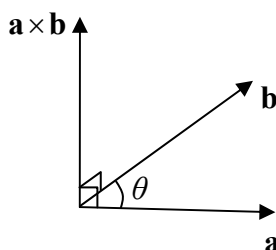
Ο μετασχηματιστής είναι διάταξη μετατροπής εναλλασσόμενης ηλεκτρικής ενέργειας συγκεκριμένου πλάτους τάσης σε εναλλασσόμενη ενέργεια με άλλο πλάτος τάσης.

Πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών μηχανών: η ηλεκτρική ενέργεια είναι μια καθαρή (χωρίς καυσαέρια) και ταυτόχρονα αποτελεσματική μορφή ενέργειας, εύκολα μεταφερόμενη.

ΓΙΝΟΜΕΝΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ

Εσωτερικό γινόμενο: $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = ab \cos \theta$ (το εσωτερικό γινόμενο 2 κάθετων διανυσμάτων είναι 0, αφού τότε $\theta = 90^\circ$).

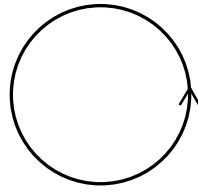
Εξωτερικό γινόμενο: είναι διάνυσμα κάθετο στο επίπεδο των \mathbf{a}, \mathbf{b} , με μέτρο $|\mathbf{a} \times \mathbf{b}| = ab \sin \theta$ (το εξωτερικό γινόμενο παράλληλων διανυσμάτων είναι 0, αφού τότε $\theta = 0^\circ$).



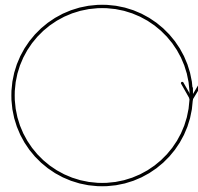
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Τα κινητά μέρη των ηλεκτρικών μηχανών περιστρέφονται γύρω από μια νοητή ευθεία, τον άξονα της μηχανής. Για την περιγραφή της κίνησης αυτής απαιτείται ουσιαστικά μόνο γωνιακή διάσταση.

Πάνω σ' ένα σώμα που περιστρέφεται, η θέση ενός σημείου καθορίζεται από τη γωνία θέσης θ , η οποία σχηματίζεται από το διάνυσμα θέσης του σημείου και κάποιον άξονα αναφοράς.



Ανθωρολογιακή φορά
(θετικές γωνίες)



Ωρολογιακή φορά
(αρνητικές γωνίες)

Η γωνιακή ταχύτητα ω (rad/sec) ενός περιστρεφόμενου σώματος είναι ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας θέσης ως προς το χρόνο:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

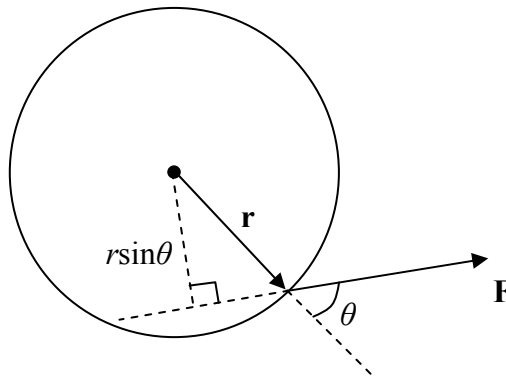
Άλλες μονάδες μέτρησης είναι οι στροφές ανά δευτερόλεπτο (rps) και οι στροφές ανά λεπτό (rpm). Αν συμβολιστεί η γωνιακή ταχύτητα, εκφρασμένη στις δύο παραπάνω μονάδες, με f και n , τότε θα ισχύουν οι ισοδυναμίες $n = 60f$, $f = \omega/2\pi$ και $\omega = 2\pi n/60$. Η γραμμική ταχύτητα ενός σημείου σε απόσταση r από τον άξονα περιστροφής είναι $u = \omega r$.

Η γωνιακή επιτάχυνση α είναι ο ρυθμός μεταβολής (ως προς το χρόνο) της γωνιακής ταχύτητας:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

Η ροπή (Nm) που ασκείται σε ένα σώμα ως προς κάποιον άξονα περιστροφής είναι ένα διάνυσμα με μέτρο το γινόμενο της δύναμης επί την κάθετη απόσταση:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}, \quad \tau = rF \sin \theta$$



Η ροπή είναι το αντίστοιχο μέγεθος της δύναμης στην ευθύγραμμη κίνηση και, όταν εφαρμόζεται, μεταβάλλει τη γωνιακή ταχύτητα. Προφανώς, η ροπή μιας δύναμης που η διεύθυνσή της τέμνει τον άξονα περιστροφής είναι μηδενική.

Το έργο (J) που παράγεται λόγω σταθερής ροπής κατά την περιστροφική κίνηση πάνω σε τόξο γωνίας θ ισούται με

$$W = \tau\theta$$

ενώ η αντίστοιχη ισχύς (έργο ανά μονάδα χρόνου) δίνεται από τη σχέση

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}(\tau\theta) = \tau \frac{d\theta}{dt} = \tau\omega$$

με μονάδα μέτρησης το Watt (ή σε ίππους-hp).

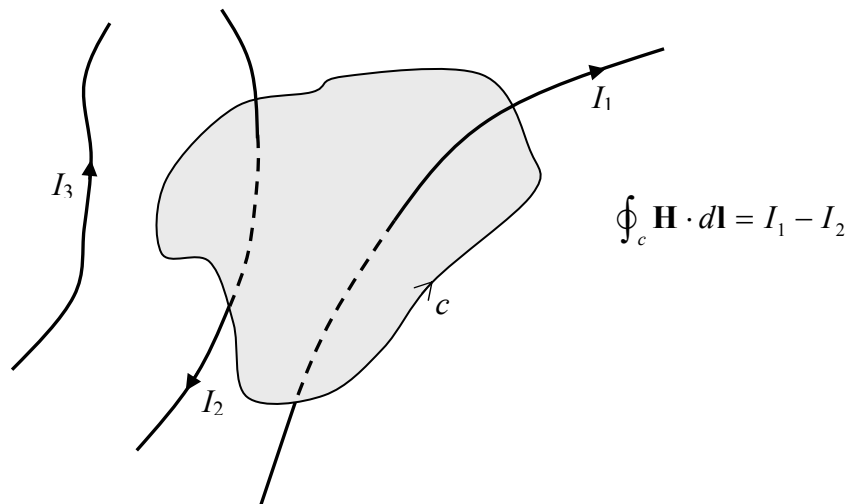
ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Τα μαγνητικά πεδία, η δράση των οποίων αποτελεί το βασικό μηχανισμό μετατροπής ενέργειας στις ηλεκτρικές μηχανές, δημιουργούνται α) από μόνιμους μαγνήτες και β) από ρευματοφόρους αγωγούς. Σχετικά φαινόμενα είναι: η παραγωγή πεδίου από ρευματοφόρους αγωγούς, η επαγωγή τάσης λόγω χρονικής μεταβολής του πεδίου, η άσκηση δύναμης σε ρευματοφόρους αγωγούς και η επαγωγή τάσης σε κινούμενους αγωγούς.

Σύμφωνα με το νόμο του Ampere, το ρεύμα που περικλείεται από μια κλειστή καμπύλη c (= διάρρευμα) ισούται με το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της μαγνητικής πεδιακής έντασης στην καμπύλη αυτής, δηλ.

$$I_{net} = \oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$$

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου μετριέται σε A/m και εκφράζει το μέτρο της προσπάθειας του ρεύματος να δημιουργήσει μαγνητικό πεδίο.



Από την ένταση του μαγνητικού πεδίου υπολογίζεται η μαγνητική επαγωγή:

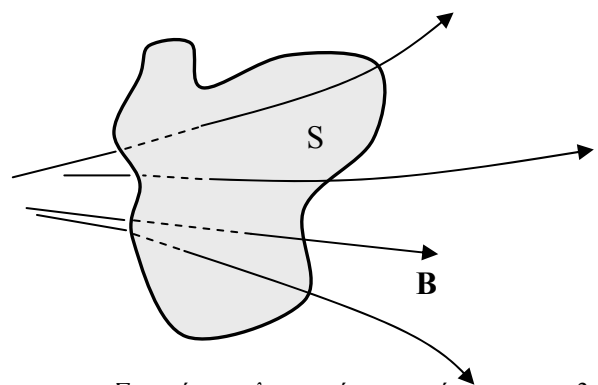
$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$$

όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Η μαγνητική διαπερατότητα ενός υλικού εκφράζει το βαθμό ευκολίας που χαρακτηρίζει το υλικό αυτό, όσον αφορά την ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου. Για το κενό είναι $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα ενός υλικού δείχνει πόσο μεγαλύτερη είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού από αυτήν του κενού, δηλαδή

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Η μαγνητική ροή που διέρχεται από κάποια νοητή επιφάνεια υπολογίζεται από το επιφανειακό ολοκλήρωμα

$$\Phi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$$



και εκφράζει το πλήθος των δυναμικών γραμμών του πεδίου που διέρχονται από την επιφάνεια αυτή. Αν το πεδίο είναι σταθερό και κάθετο στην επιφάνεια, τότε $\Phi = BS$.

NΟΜΟΣ ΤΟΥ FARADAY

Σύμφωνα με το νόμο του Faraday (νόμος της επαγωγής), αν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια που ορίζει ένας αγωγός, τότε επάγεται στα άκρα του αγωγού τάση (ΗΕΔ) που ισούται με τον αρνητικό ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής:

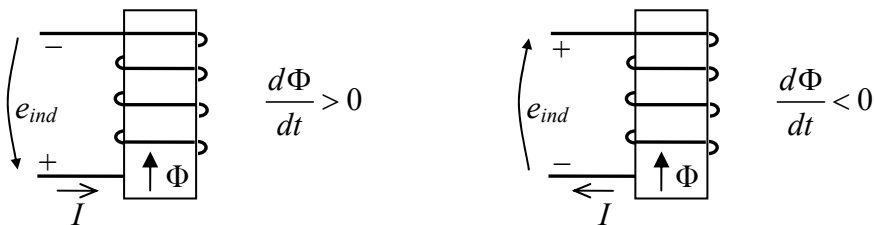
$$e_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Αν ο αγωγός αποτελείται από N σπείρες, η συνολική επαγόμενη τάση θα είναι

$$e_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

Ο όρος $N\Phi$ ονομάζεται πεπλεγμένη ροή (ο γενικός ορισμός της είναι το άθροισμα των ροών που διέρχονται από όλες τις σπείρες: $\Psi = \sum_i \Phi_i$). Το αρνητικό πρόσημο είναι αποτέλεσμα του νόμου του Lenz, σύμφωνα με τον οποίο, η πολικότητα της e_{ind} είναι τέτοια, ώστε το παραγόμενο ρεύμα (συνδέοντας τα άκρα του αγωγού) να αντιτίθεται στη μεταβολή της ροής (μέσω της ροής που αυτό προκαλεί). Συνεπώς, αν αυξάνεται η ροή, το ρεύμα που επάγεται προκαλεί πεδίο που αντιτίθεται στο υπάρχον. Αντίθετα, αν η ροή μειώνεται, το προκαλούμενο ρεύμα προκαλεί ροή που ενισχύει την αρχική.

Η μεταβολή της μαγνητικής ροής μπορεί να οφείλεται σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, στη μετακίνηση του κυκλώματος στο χώρο, σε αλλαγή του σχήματος του αγωγού, ή σε συνδυασμό των παραπάνω φαινομένων.



ΔΥΝΑΜΗ ΣΕ ΡΕΥΜΑΤΟΦΟΡΟ ΑΓΩΓΟ

Έστω ρευματοφόρος αγωγός μήκους l που διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως I και κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο \mathbf{B} . Στον αγωγό ασκείται δύναμη εξ επαγωγής (δύναμη Laplace) που ισούται με

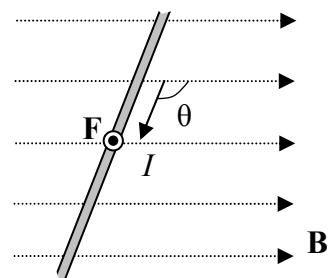
$$\mathbf{F} = I(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$

όπου η διεύθυνση του διανύσματος \mathbf{I} καθορίζεται από τη φορά του ρεύματος. Το μέτρο της δύναμης Laplace είναι

$$F = BIl \sin \theta$$

όπου θ η γωνία ανάμεσα στα διανύσματα \mathbf{I} και \mathbf{B} .

Η επαγωγή δυνάμεις σε ηλεκτροφόρο αγωγό κινούμενο μέσα σε μαγνητικό πεδίο αποτελεί τη βασική αρχή λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα.



ΤΑΣΗ ΕΞ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Έστω αγωγός μήκους l , κινούμενος μέσα σε μαγνητικό πεδίο \mathbf{B} με ταχύτητα \mathbf{u} . Σε ένα φορτίο q του αγωγού ασκείται από το πεδίο δύναμη

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{u} \times \mathbf{B})$$

με συνέπεια στα άκρα του αγωγού να εμφανίζονται αντίθετα φορτία. Το κάθε φορτίο αντιλαμβάνεται ηλεκτρική πεδιακή ένταση

$$\mathbf{E} = \mathbf{u} \times \mathbf{B}$$

οπότε ανάμεσα στα άκρα του αγωγού εμφανίζεται τάση ίση με

$$e_{ind} = (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \mathbf{l}.$$

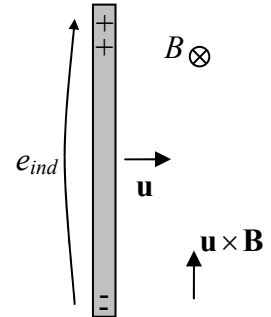
Αν τα τρία διανύσματα είναι κάθετα μεταξύ τους, τότε η επαγόμενη τάση ισούται με

$$e_{ind} = Bul$$

Ο προσανατολισμός του \mathbf{l} επιλέγεται αυθαίρετα. Αν προκύψει αρνητικό πρόσημο στην τιμή της τάσης, αυτό σημαίνει πως η πραγματική τάση έχει αντίθετη από τη σημειωμένη φορά. Για το παράδειγμα του σχήματος, το διάνυσμα $\mathbf{u} \times \mathbf{B}$ έχει φορά προς τα πάνω. Αν το \mathbf{l} επιλεγεί με φορά προς τα κάτω, τότε θα είναι

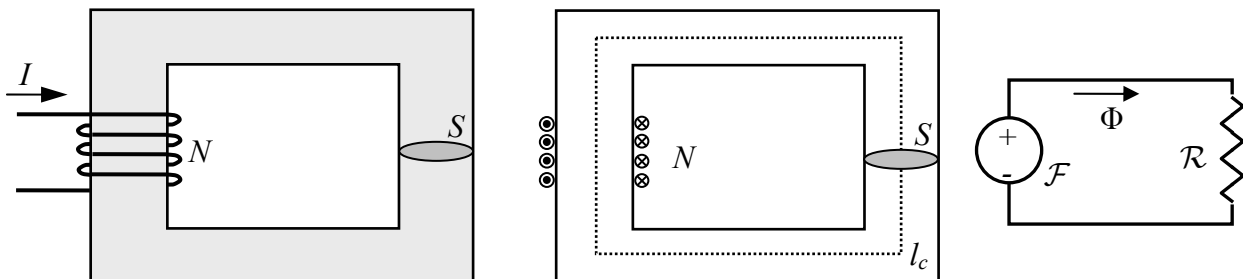
$$e_{ind} = |\mathbf{u} \times \mathbf{B}| |\mathbf{l}| \cos 180^\circ = -Bul$$

Η εμφάνιση τάσης στα άκρα κινούμενου σε μαγνητικό πεδίο αγωγού αποτελεί την αρχή λειτουργίας των γεννητριών.



ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν τη δυνατότητα να ενισχύουν στο εσωτερικό τους οποιοδήποτε επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η μαγνητική τους διαπερατότητα είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του κενού ($\mu_r \gg 1$). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές μηχανές, αφού για συγκεκριμένο ρεύμα παράγεται μαγνητική ροή πολλαπλάσια από αυτή που θα παραγόταν στον αέρα. Η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητάς τους δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από την τιμή του πεδίου (μη γραμμικά υλικά). Μετά την απομάκρυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, παραμένουν μαγνητισμένα.



Το διάρρευμα (\mathcal{A}) ισούται με $\mathcal{F} = NI$ και η μαγνητική ροή με $\Phi = BS$. Από το νόμο του Ampere ισχύει

$$\mathcal{F} = NI = Hl_c \Rightarrow H = \frac{\mathcal{F}}{l_c}$$

οπότε η μαγνητική ροή ισούται με

$$\Phi = \mu HS = \mu \frac{\mathcal{F}}{l_c} S \Rightarrow \mathcal{F} = \frac{l_c}{\mu S} \Phi \Rightarrow \mathcal{F} = \Phi \mathcal{R}$$

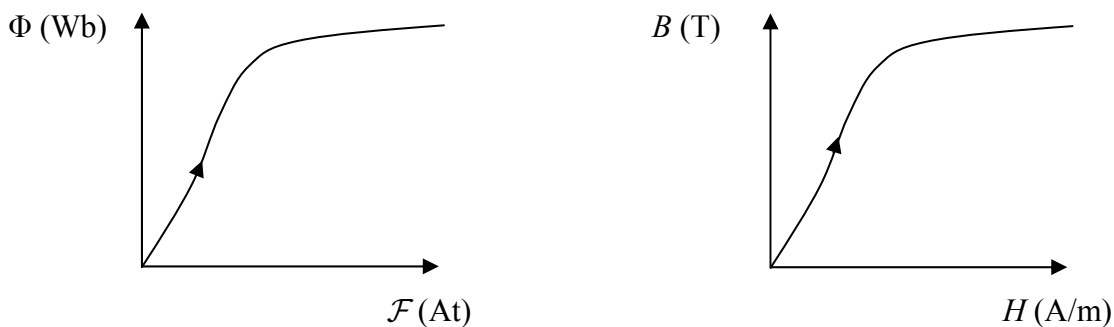
Με \mathcal{R} συμβολίζεται η μαγνητική αντίσταση του σιδηρομαγνητικού υλικού, ενώ το διάρρευμα ονομάζεται και μαγνητεγερτική δύναμη (επειδή $\mu_r \gg 1$, η μαγνητική αντίσταση του αέρα είναι πολύ μεγαλύτερη από του σιδηρομαγνητικού υλικού). Στη ΜΕΔ αποδίδεται μια φορά αναφοράς, θεωρώντας ως θετικό το άκρο από το οποίο εξέρχεται η μαγνητική ροή. Όπως οι ηλεκτρικές αντιστάσεις, έτσι και οι μαγνητικές μπορούν να είναι συνδεδεμένες σε σειρά ή παράλληλα, υπακούοντας στις ίδιες σχέσεις ισοδυναμίας.

Προσεγγίσεις:

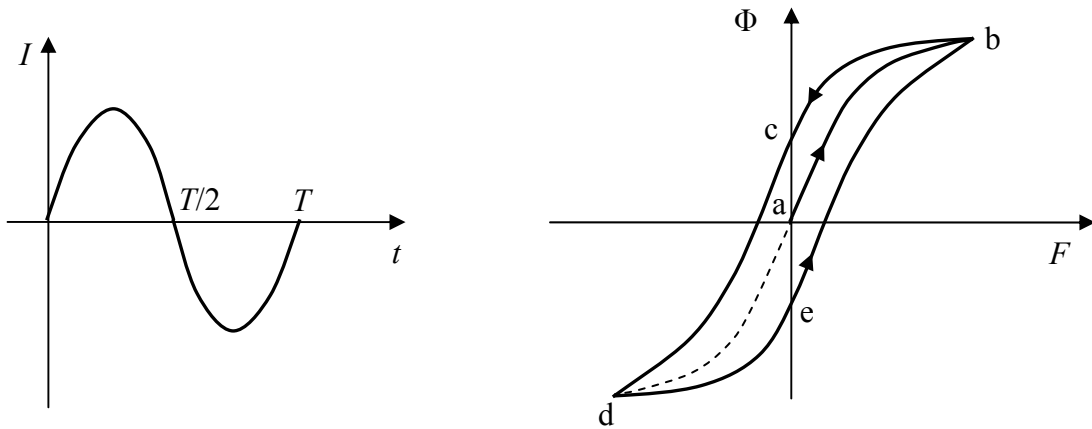
- α) Η μαγνητική ροή θεωρήθηκε ότι περιορίζεται αποκλειστικά μέσα στον πυρήνα (στην πράξη, ένα μικρό τμήμα της ροής ξεφεύγει στον αέρα).
- β) Το μέσο μήκος και η διατομή θεωρήθηκαν σταθερές.

Υστέρηση – Βρόχος υστέρησης

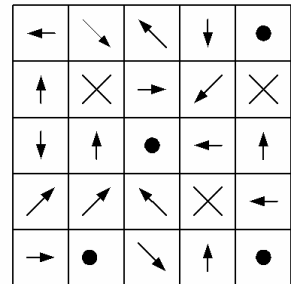
Θεωρώντας αρχικά αμαγνήτιστο τον πυρήνα, η παρακάτω καμπύλη αποτελεί την καμπύλη μαγνήτισης ή κορεσμού. Ξεκινώντας από μηδενικό ρεύμα, η αύξηση της ΜΕΔ προκαλεί μεγάλη και απότομη αύξηση της μαγνητικής ροής (ακόρεστη περιοχή-γραμμική περιοχή). Από κάποιο συγκεκριμένο σημείο και μετά, η αύξηση της ΜΕΔ προκαλεί μικρότερη αύξηση της ροής, καταλήγοντας τελικά η μεταβολή της ΜΕΔ πρακτικά να μην επηρεάζει τη ροή (περιοχή κορεσμού). Η περιοχή μετάβασης από την ακόρεστη στην κορεσμένη περιοχή αποτελεί το γόνατο της καμπύλης. Επειδή $B \propto \Phi$ και $H \propto I$, η καμπύλη $B = f(H)$ είναι αντίστοιχη με την καμπύλη $\Phi = f(\mathcal{F})$.



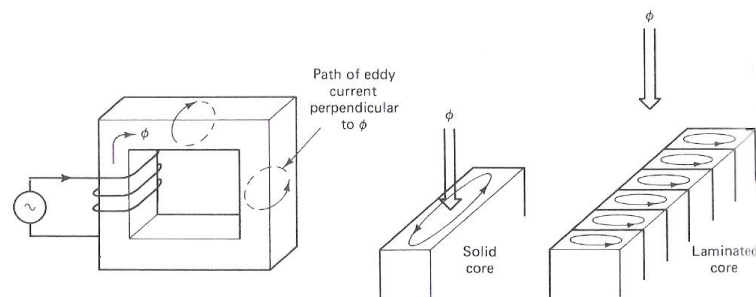
Ας θεωρήσουμε τώρα ότι το ρεύμα του τυλίγματος του πυρήνα έχει ημιτονοειδή μορφή. Θεωρώντας μηδενική αρχικά τη ροή του πυρήνα, κατά την αύξηση του ρεύματος από τη μηδενική ως τη μέγιστη τιμή, η προκαλούμενη μαγνητική ροή ακολουθεί τη διαδρομή ab. Κατά τη μείωση της τιμής του ρεύματος από τη μέγιστη ως την τιμή 0, δεν ακολουθείται η διαδρομή ba, αλλά η bc. Δηλαδή η τιμή της ροής δεν εξαρτάται μόνο από το επιβαλλόμενο ρεύμα, αλλά και από τις προγενέστερες τιμές της Φ . Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση και η συνολική διαδρομή bcdeb βρόχος υστέρησης. Παρατηρούμε ακόμη ότι όταν μηδενιστεί η ΜΕΔ (σημείο c) η ροή που διέρχεται από τον πυρήνα δεν είναι μηδενική (παραμένουσα μαγνητική ροή). Για να μηδενιστεί η παραμένουσα μαγνητική ροή θα πρέπει να εφαρμοστεί ΜΕΔ αντίθετης πολικότητας (απομαγνητίζουσα δύναμη).



Κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό αποτελείται από επιμέρους μαγνητικούς τομείς-περιοχές, όπου τα μαγνητικά πεδία των ατόμων έχουν κοινό προσανατολισμό, οπότε συμπεριφέρονται ως στοιχειώδεις μαγνήτες (το γεγονός αυτό σχετίζεται με την περιστροφική κίνηση των ηλεκτρονίων τόσο γύρω από τον εαυτό τους, όσο και γύρω από τον πυρήνα). Αρχικά το σιδηρομαγνητικό υλικό είναι αμαγνήτιστο, λόγω του τυχαίου προσανατολισμού των μαγνητικών περιοχών. Με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, ευθυγραμμίζονται με αυτό, προκαλώντας επιπρόσθετη μαγνητική ροή και ενίσχυση του πεδίου. Τελικά όλα τα άτομα και οι τομείς προσανατολίζονται σύμφωνα με το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Μετά το σημείο κορεσμού, περαιτέρω αύξηση του εξωτερικού πεδίου μεταβάλλει τη ροή με τον ίδιο τρόπο που τη μεταβάλλει στον αέρα. Κατά τη μείωση του πεδίου, οι μαγνητικοί τομείς δεν επανέρχονται στην αρχική τους θέση, γιατί δεν παρέχεται η απαραίτητη ενέργεια (όπως δόθηκε κατά τον προσανατολισμό). Έτσι ουσιαστικά το υλικό μετατρέπεται σε μόνιμο μαγνήτη.



Οι απώλειες υστέρησης αντιστοιχούν στην ενέργεια που δαπανάται κατά τον προσανατολισμό των μαγνητικών τομέων, στη διάρκεια μιας περιόδου του ρεύματος του πυρήνα. Αποδεικνύεται ότι οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες με το εμβαδόν που περικλείεται από το βρόχο υστέρησης. Άρα όσο πιο περιορισμένη είναι η ΜΕΔ που εφαρμόζεται, τόσο μικρότερες είναι οι απώλειες, διότι προκύπτουν μικρότεροι βρόχοι (που περικλείουν μικρότερο εμβαδόν).



Άλλες απώλειες στον πυρήνα οφείλονται στην παρουσία δινορευμάτων. Όπως και στο τύλιγμά του, έτσι και στον ίδιο τον πυρήνα η μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή επάγει τάση, η οποία προκαλεί ρεύματα με τη μορφή στροβίλων. Η παρουσία τους συνεπάγεται κατανάλωση ενέργειας με τη μορφή θερμότητας. Επειδή οι ενεργειακές απώλειες είναι ανάλογες του μήκους της διαδρομής που α-

κολουθούν τα δινορρέυματα, οι σιδηρομαγνητικοί πυρήνες κατασκευάζονται από λεπτά φύλλα (δυναμοελάσματα), στα οποία παρεμβάλλεται μονωτικό υλικό.

Το άθροισμα των απωλειών υστέρησης και των απωλειών λόγω δινορρευμάτων ονομάζονται απώλειες πυρήνα.