

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

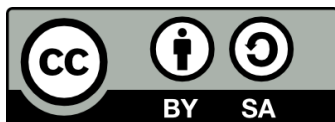
κ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΘΕΜΕΛΗΣ

ΣΕΡΡΕΣ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015



Άδειες Χρήσης

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons. Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Το έργο αυτό αδειοδοτείται από την Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Παρόμοια Διανομή 4.0 Διεθνές Άδεια. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής, επισκεφτείτε <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.el>.

Χρηματοδότηση

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.

Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.

Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

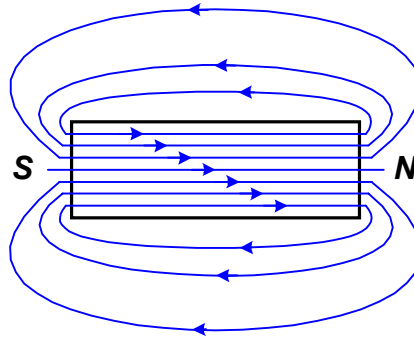
Ηλεκτρικές μηχανές ονομάζονται οι συσκευές που χρησιμοποιούνται στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και το αντίστροφο. Ειδικότερα, οι συσκευές που μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ονομάζονται *γεννήτριες*. Οι συσκευές που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ονομάζονται *κινητήρες*. Η μετατροπή της ενέργειας από τη μια μορφή στην άλλη είναι αμφίδρομη. Έτσι, η ίδια ηλεκτρική μηχανή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γεννήτρια αν η είσοδός της είναι μηχανική ισχύς, ή ως κινητήρας όταν τροφοδοτείται με ηλεκτρική ισχύ. Οι ηλεκτρικές μηχανές διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν ή καταναλώνουν: σε *μηχανές συνεχούς ρεύματος* και σε *μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος*.

Η αρχή λειτουργίας όλων των ηλεκτρικών μηχανών βασίζεται στις θεωρίες του μαγνητισμού και του ηλεκτρομαγνητισμού. Στη διατύπωση των παραπάνω θεωριών έχουν συμβάλει ερευνητές όπως οι: *Tesla, Weber, Oertsted, Ampere, Faraday, Lenz, Laplace, Hopkinson*.

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται συνοπτικά σε ορισμένα στοιχεία του μαγνητισμού και του ηλεκτρομαγνητισμού, τα οποία είναι αναγκαία στην κατανόηση της λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών.

1.2 ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Όταν ένας αγωγός διαρρέετε από ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Έτσι, απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη του μαγνητικού πεδίου είναι η κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων. Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι αυτό που παράγει το μαγνητικό πεδίο. Αντίστοιχα, το μαγνητικό πεδίο των μόνιμων μαγνητών οφείλεται στις κινήσεις των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα του ατόμου και τον άξονά τους. Αυτές οι κινήσεις των ηλεκτρονίων ισοδυναμούν με στοιχειώδη ηλεκτρικά ρεύματα, τα οποία αναπτύσσουν στοιχειώδη μαγνητικά πεδία. Έτσι, κάθε άτομο οποιοδήποτε υλικού παράγει κάποιο μαγνητικό πεδίο και είναι ένας στοιχειώδης μαγνήτης με βόρειο και νότιο πόλο.

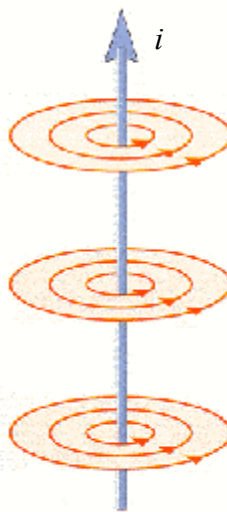


Σχ. 1.1 Το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη σε σχήμα ράβδου

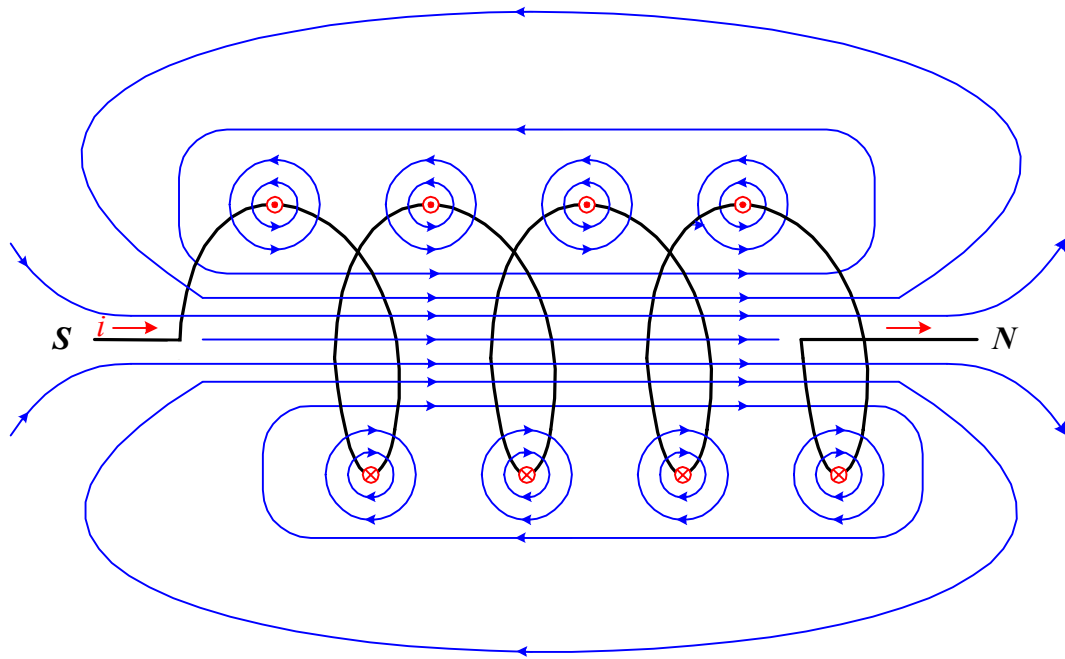
Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, από τα οποία κατασκευάζονται οι μαγνήτες, τα μαγνητικά πεδία των ατόμων του υλικού είναι προσανατολισμένα μέσα σε πολύ μικρές περιοχές του υλικού. Αυτές οι περιοχές ονομάζονται περιοχές *Weiss* και κάθε μια αποτελεί ένα μικροσκοπικό μαγνήτη. Όταν οι περιοχές *Weiss* του σιδηρομαγνητικού υλικού είναι προσανατολισμένες στην ίδια διεύθυνση, το υλικό έχει τα χαρακτηριστικά ενός μαγνήτη. Αν οι περιοχές *Weiss* είναι τυχαία προσανατολισμένες, τότε το υλικό δεν παρουσιάζει μακροσκοπικά μαγνητικό πεδίο και εμφανίζεται αμαγνήτιστο.

Ένας ρευματοφόρος αγωγός ή ένας μαγνήτης δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, δηλαδή ένα χώρο γύρω του στον οποίο ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις. Η μορφή του μαγνητικού πεδίου παριστάνεται με τις *μαγνητικές ή δυναμικές γραμμές*. Στο Σχ. 1.1 εικονίζεται η μορφή του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από ένα μαγνήτη σε σχήμα ράβδου. Οι μαγνητικές γραμμές είναι κλειστές καμπύλες. Οι μαγνητικές γραμμές έχουν φορά από το βόρειο προς το νότιο πόλο του μαγνήτη. Οι μαγνητικές γραμμές συνεχίζονται και στο εσωτερικό του μαγνήτη, με φορά από το νότιο προς το βόρειο πόλο, σχηματίζοντας κλειστές διαδρομές. Οι δυναμικές γραμμές, εκτός από τη φορά και τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιούνται ακόμη στην παράσταση του μέτρου του (ένταση). Όσο πυκνότερες είναι οι μαγνητικές γραμμές, τόσο ισχυρότερο είναι το μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο, όπως εικονίζεται στο Σχ. 1.1, είναι ισχυρότερο κοντά στους πόλους.

Στο Σχ. 1.2 παρουσιάζεται η μορφή του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται από ένα ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό. Οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου είναι ομόκεντροι κύκλοι με κέντρο τον αγωγό. Ακόμη, οι μαγνητικές γραμμές είναι κάθετες ως προς αγωγό. Η φορά των μαγνητικών γραμμών εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος στον αγωγό. Αν στο Σχ. 1.2 η φορά του ρεύματος αντιστραφεί, τότε θα αντιστραφεί και η φορά των δυναμικών γραμμών.



Σχ. 1.2 Το μαγνητικό πεδίο του ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού



Σχ. 1.3 Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου μεγάλου μήκους

Το μαγνητικό πεδίο ενός πηνίου με μεγάλο μήκος, σε σχέση με τη διάμετρό του, εικονίζεται στο Σχ. 1.3. Παρατηρούμε ότι, η μορφή του πεδίου είναι όμοια μ' εκείνη του ραβδόμορφου μαγνήτη. Το πεδίο στο εσωτερικό του πηνίου είναι *ομοιόμορφο*, δηλαδή οι μαγνητικές γραμμές είναι παράλληλες μεταξύ τους και ο αριθμός τους είναι σταθερός. Οι μαγνητικές γραμμές εξέρχονται από το ένα άκρο του πηνίου, το οποίο είναι ο βόρειος πόλος του. Το άκρο του πηνίου όπου εισέρχονται οι μαγνητικές γραμμές είναι ο νότιος πόλος. Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου υφίσταται, όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η ροή του ρεύματος.

1.3 ΜΕΓΕΘΗ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Θεωρούμε ένα πηνίο με N σπείρες, το οποίο διαρρέετε από ηλεκτρικό ρεύμα με ένταση i . Το πηνίο είναι τυλιγμένο γύρω από ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, το οποίο αποτελεί τον πυρήνα του (Σχ. 1.4). Στην περίπτωση αυτή, το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται από το πηνίο περιορίζεται σχεδόν αποκλειστικά στο εσωτερικό του πυρήνα. Ο νόμος του Ampere ορίζει την *ένταση του μαγνητικού πεδίου* στο εσωτερικό του πυρήνα, σύμφωνα με τη σχέση

$$Hl = Ni \quad (1.1)$$

Στην Εξ. (1.1) με H συμβολίζεται το μέτρο ενός διανυσματικού μεγέθους, το οποίο ονομάζεται *ένταση του μαγνητικού πεδίου* \mathbf{H} . Η διεύθυνση και η φορά της \mathbf{H} ταυτίζονται με τη διεύθυνση και τη φορά των μαγνητικών γραμμών. Το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα (Σχ. 1.4), από την Εξ. (1.1), είναι

$$H = \frac{Ni}{l} \quad (1.2)$$

Ο αριθμητής στην Εξ. (1.2) ονομάζεται *μαγνητογερωτική δύναμη* M (*magnetomotive force*, *MMF*). Μονάδα μέτρησης της μαγνητογερωτικής δύναμης (ΜΕΔ) είναι οι αμπεροστρόφες [At]. Η μαγνητογερωτική δύναμη είναι αντίστοιχη της ηλεκτρεγερτικής δύναμης στον ηλεκτρισμό. Όπως η

ηλεκτρεγερτική δύναμη προκαλεί την κυκλοφορία του ηλεκτρικού ρεύματος, έτσι και η ΜΕΔ είναι η αιτία για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου με ένταση H . Μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι οι At/m.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου εκφράζει το έργο του καταβάλλει το ηλεκτρικό ρεύμα i για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα. Η “ισχύς” του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του πυρήνα και εκφράζεται από το διανυσματικό μέγεθος της *μαγνητικής επαγωγής (flux density)* \mathbf{B} . Η μαγνητική επαγωγή συνδέεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου με τη σχέση

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \tag{1.3}$$

Στην Εξ. (1.3), με μ συμβολίζεται η *μαγνητική διαπερατότητα (permeability)* του υλικού κατασκευής του πυρήνα. Η μαγνητική διαπερατότητα των υλικών εκφράζεται ως προς αυτή του κενού. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού μ_0 , είναι σταθερή και ίση με

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Atm} \tag{1.4}$$

Η μαγνητική διαπερατότητα οποιουδήποτε υλικού μ , συνδέεται μ’ εκείνη του κενού μέσω της *σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας* μ_r

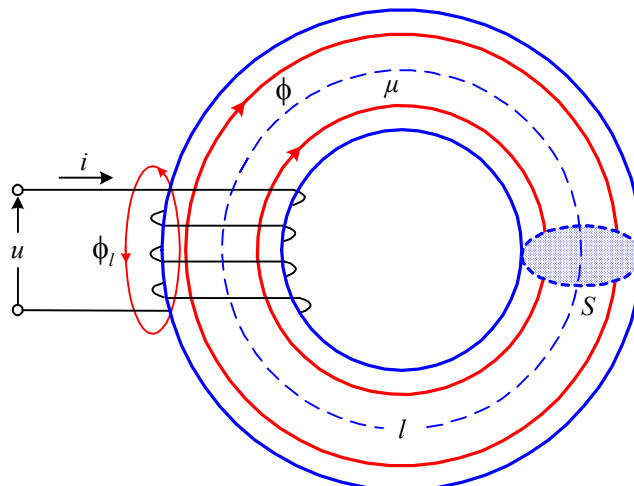
$$\mu = \mu_r \mu_0 \tag{1.5}$$

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής είναι το *Tesla* [T]. Από τις Εξ. (1.3)–(1.4) προκύπτει ότι,

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \tag{1.6}$$

Η μαγνητική επαγωγή εκφράζει τον αριθμό των μαγνητικών γραμμών που περνούν κάθετα από μια επιφάνεια 1m^2 . Ο ολικός αριθμός των μαγνητικών γραμμών που περνά από μια επιφάνεια S , εκφράζεται από το μέγεθος της *μαγνητικής ροής* ϕ , σύμφωνα με τη σχέση

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \tag{1.7}$$



Σχ. 1.4 Πηνίο με πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό

Αν το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής είναι σταθερό σ' όλη την επιφάνεια S και το διάνυσμά της είναι κάθετο στην επιφάνεια, η Εξ. (1.7) απλοποιείται στην παρακάτω μορφή

$$\phi = BS \quad (1.8)$$

Η Εξ. (1.8) ισχύει στη διάταξη του Σχ. 1.4. Επομένως, η μαγνητική ροή που προκαλεί το ρεύμα i στον πυρήνα του Σχ. 1.4, με διατομή S και μέσο μήκος l , είναι ίση με

$$\phi = \mu \frac{NiS}{l} \quad (1.9)$$

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής είναι το weber [Wb] ή ισοδύναμα το volt-second [Vs].

1.4 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ – ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

Στο Σχ. 1.4, όταν το πηνίο διαρρέετε από ηλεκτρικό ρεύμα με ένταση i , δημιουργείται στον πυρήνα ένα μαγνητικό πεδίο με μαγνητική ροή ϕ και την εικονιζόμενη φορά. Η φορά της ϕ δεικνύεται από τον αντίχειρα του δεξιού χεριού, αν τυλίξουμε τα υπόλοιπα δάκτυλα κατά τη φορά του ρεύματος στο πηνίο. Το μέτρο της μαγνητικής ροής από την Εξ. (1.9), γράφεται στη μορφή

$$\phi = \frac{Ni}{(l/\mu S)} \quad (1.10)$$

Ο παρονομαστής στην Εξ. (1.10) εξαρτάται αποκλειστικά από τις διαστάσεις και το υλικό του πυρήνα και ονομάζεται *μαγνητική αντίσταση (reluctance) R_m* . Επομένως, η μαγνητική αντίσταση είναι ίση με

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (1.11)$$

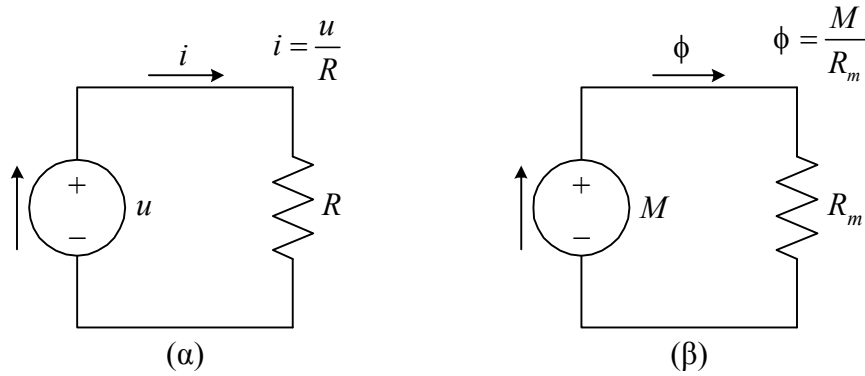
και η μαγνητική ροή εκφράζεται από τη σχέση

$$\phi = \frac{Ni}{R_m} = \frac{M}{R_m} \quad (1.12)$$

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής αντίστασης είναι, $\text{At/Vs} = \text{t}/\Omega\text{s} = \text{At/Wb}$.

Από την Εξ. (1.12) προκύπτει ότι, η διάταξη του Σχ. 1.4 αντιστοιχεί σ' ένα ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα, το οποίο περιγράφεται από σχέσεις ανάλογες μ' εκείνες των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Στο ηλεκτρικό κύκλωμα του Σχ. 1.5α, η τάση της πηγής ή αλλιώς η ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής u , προκαλεί τη ροή ενός ρεύματος i μέσω της αντίστασης R . Η ροή του ρεύματος είναι το αποτέλεσμα της ηλεκτρεγερτικής δύναμης και η μεταξύ τους σχέση ορίζεται από το νόμο του Ohm

$$i = \frac{u}{R} \quad (1.13)$$



Σχ. 1.5 Ηλεκτρικό κύκλωμα (α). Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του πηνίου με πυρήνα στο Σχ. 1.4 (β)

Στο Σχ. 1.5β εικονίζεται το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του πηνίου με σιδηροπυρήνα του Σχ. 1.4. Η μαγνητική ροή ϕ θεωρείται ως ένα μαγνητικό ρεύμα, το οποίο ρέει στον πυρήνα υπερνικώντας τη μαγνητική του αντίσταση R_m . Η μαγνητική ροή προκαλείται από τη μαγνητεγερτική δύναμη, η οποία είναι αντίστοιχη της ηλεκτρεγερτικής δύναμης στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Επομένως, η Εξ. (1.12) αποτελεί το νόμο του Ohm στα μαγνητικά κυκλώματα. Στα ηλεκτρικά κυκλώματα ορίζεται η αγωγιμότητα ως το αντίστροφο της ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίστοιχα, στα μαγνητικά κυκλώματα ορίζεται η *μαγνητική αγωγιμότητα (permeance)*, ως το αντίστροφο της μαγνητικής αντίστασης.

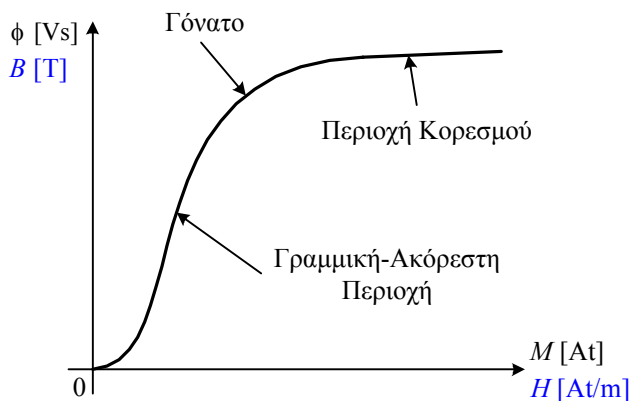
1.5 ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΑΓΝΗΤΗΣΗΣ

Τα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη μαγνητική τους συμπεριφορά: σε *διαμαγνητικά*, *παραμαγνητικά* και *σιδηρομαγνητικά*. Τα διαμαγνητικά υλικά έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα ελάχιστα μικρότερη της μονάδος. Η μαγνητική διαπερατότητα των παραμαγνητικών υλικών είναι ελάχιστα μεγαλύτερη της μονάδος.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα πολύ μεγαλύτερη της μονάδος. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών έχουν μ_r στην περιοχή από 2000 έως 6000. Επομένως, για ορισμένη μαγνητεγερτική δύναμη, η μαγνητική ροή που αναπτύσσεται σ' ένα σιδηρομαγνητικό υλικό είναι πολλαπλάσια της ροής που παράγεται στον αέρα. Επειδή η τάση που παράγει μια γεννήτρια, ή αντίστοιχα η ροπή που αναπτύσσει ένας κινητήρας εξαρτώνται από το μέγεθος της μαγνητικής ροής, οι ηλεκτρικές μηχανές κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικά υλικά με υψηλό μ_r .

Στο Σχ. 1.4 έχουμε θεωρήσει ότι η μαγνητική ροή είναι συγκεντρωμένη στον πυρήνα, επειδή η μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του αέρα. Επομένως, η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα είναι πολύ μικρότερη της αντίστασης του αέρα. Η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα είναι περίπου ίση μ' εκείνη του κενού ($\mu_r^{air} \approx 1$). Βέβαια, ένα πολύ μικρό τμήμα της ροής δεν ρέει στον πυρήνα, αλλά κυκλοφορεί μέσω του αέρα. Αυτή η ροή ονομάζεται *ροή σκέδασης (leakage flux)* ϕ_l .

Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή. Η μαγνητική διαπερατότητα εξαρτάται έντονα από το μέγεθος της μαγνητικής ροής. Για να διευκρινίσουμε τη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας θεωρούμε ότι, ο πυρήνας στο Σχ. 1.4 είναι αρχικά απομαγνητισμένος και ότι μεταβάλλουμε το συνεχές ρεύμα στο πηνίο από το μηδέν μέχρι μια μέγιστη τιμή. Αν σχεδιάσουμε σ' ένα διάγραμμα τη μεταβολή της παραγόμενης στον πυρήνα μαγνητικής ροής ϕ , ως προς την επιβαλλόμενη μαγνητεγερτική δύναμη $M = Ni$, προκύπτει η καμπύλη του Σχ. 1.6. Η καμπύλη του Σχ. 1.6 ονομάζεται *καμπύλη μαγνήτισης (magnetization curve)* του σιδηρομαγνητικού υλικού.



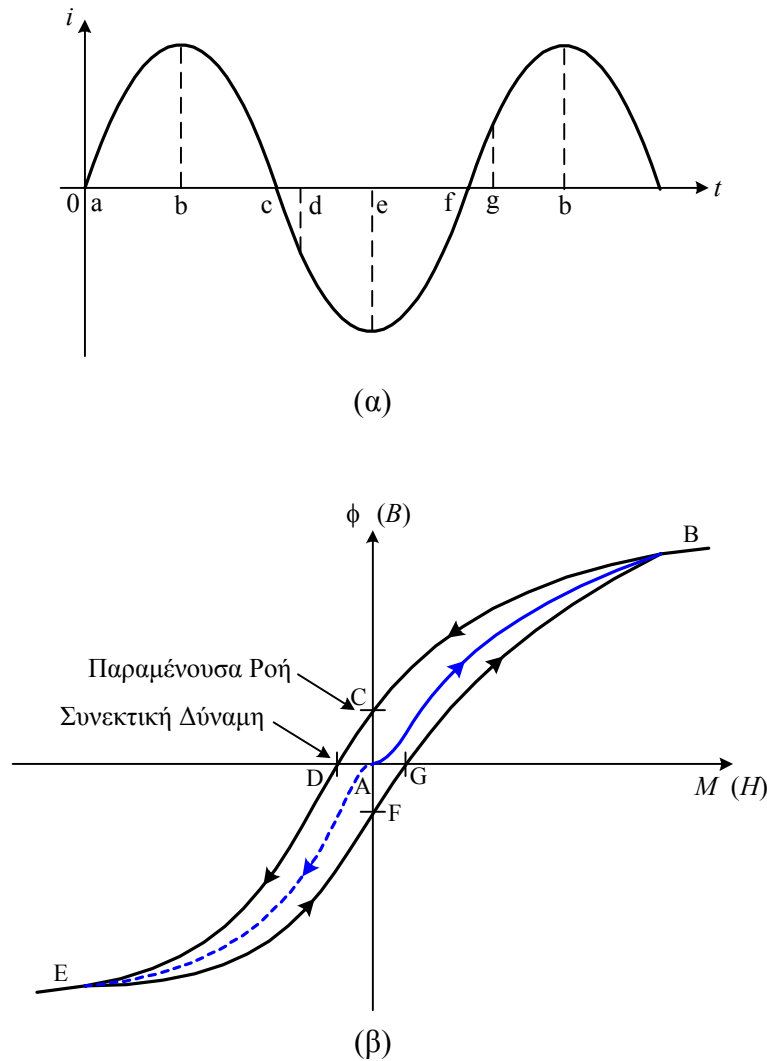
Σχ. 1.6 Τυπική καμπύλη μαγνήτισης των σιδηρομαγνητικών υλικών

Από την καμπύλη μαγνήτισης παρατηρούμε ότι, η μαγνητική ροή αυξάνει αρχικά αργά με το ρεύμα. Κατόπιν, έχουμε μια σχεδόν γραμμική μεταβολή της ροής. Στη συνέχεια η μεταβολή της μαγνητικής ροής ως προς τη μαγνητεγερτική δύναμη περιορίζεται σταδιακά και τελικά πέρα από κάποια τιμή της μαγνητεγερτικής δύναμης η ροή παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Η περιοχή όπου η καμπύλη τείνει να γίνει οριζόντια ονομάζεται *περιοχή κορεσμού*. Στην περιοχή κορεσμού η μαγνητική ροή έχει φθάσει τη μέγιστη τιμή της και μεταβάλλεται ελάχιστα με την επιβαλλόμενη μαγνητεγερτική δύναμη. Η γραμμική περιοχή της καμπύλης ονομάζεται *ακόρεστη περιοχή*. Στην ακόρεστη περιοχή η ροή μεταβάλλεται γραμμικά με τη μαγνητεγερτική δύναμη. Η περιοχή μετάβασης από τη γραμμική περιοχή στην περιοχή κορεσμού, ονομάζεται *γόνατο* της καμπύλης. Οι ηλεκτρικές μηχανές λειτουργούν κοντά στο γόνατο της καμπύλης μαγνήτισης. Έτσι, η μαγνητική τους ροή δεν μεταβάλλεται γραμμικά με τη διέγερση.

Από την Εξ. (1.2) προκύπτει ότι, η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη με τη μαγνητεγερτική δύναμη. Από την Εξ. (1.8), η μαγνητική επαγωγή είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής. Επομένως, η καμπύλη του Σχ. 1.6 δίνει υπό άλλη κλίμακα, τη μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου $B = f(H)$. Όμως, από την Εξ. (1.3) τα μεγέθη B και H συνδέονται με τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Έτσι, η καμπύλη του Σχ. 1.6 απεικονίζει τη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας ανάλογα με την ένταση του πεδίου. Η κλίση της καμπύλης ορίζει τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού σε κάθε τιμή της έντασης του πεδίου. Είναι φανερό ότι, η μαγνητική διαπερατότητα λαμβάνει πολύ μικρές τιμές, όταν ο πυρήνας λειτουργεί με ισχυρό κορεσμό.

1.6 ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

Στο Σχ. 1.4 θεωρούμε ότι, ο πυρήνας είναι αρχικά απομαγνητισμένος και ότι το πηνίο τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα (Σχ. 1.7α). Όταν το ρεύμα μεταβάλλεται στην περιοχή ab , λαμβάνουμε την καμπύλη μαγνήτισης του υλικού AB . Καθώς το ρεύμα μειώνεται, στο τμήμα bc , η μαγνητική ροή δεν ακολουθεί την καμπύλη μαγνήτισης. Η μεταβολή της ροής BC , είναι διαφορετική από εκείνη κατά την αύξηση του ρεύματος ab . Στο τμήμα bc του ρεύματος, ο πυρήνας απομαγνητίζεται. Στο σημείο c , όπου το ρεύμα και η μαγνητεγερτική δύναμη μηδενίζονται, η μαγνητική ροή δεν είναι μηδέν αλλά έχει μια τιμή C . Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *μαγνητική υστέρηση*. Η μαγνητική ροή στο σημείο C ονομάζεται *παραμένουσα ροή (residual flux)*. Το μέγεθος του παραμένουσας ροής εξαρτάται από το είδος του σιδηρομαγνητικού υλικού. Στα υλικά κατασκευής των ηλεκτρικών μηχανών ο παραμένον μαγνητισμός είναι 2–3% της ονομαστικής τιμής. Αντίθετα, στην κατασκευή των τεχνιτών μόνιμων μαγνητών χρησιμοποιούνται σιδηρομαγνητικά υλικά, με υψηλό παραμένον μαγνητισμό.



Σχ. 1.7 Εναλλασσόμενο ρεύμα στο πηνίο του Σχ. 1.4 (α). Τυπικός βρόχος υστέρησης του πυρήνα (β)

Για να απομαγνητίσουμε τον πυρήνα, δηλαδή για το μηδενισμό της ροής, πρέπει να αντιστραφεί η πολικότητα του ρεύματος, άρα και της μαγνητεγερτικής δύναμης. Η μαγνητεγερτική δύναμη που απομαγνητίζει τον πυρήνα D και η οποία αντιστοιχεί στο ρεύμα d, ονομάζεται *συνεκτική (coercive) δύναμη*.

Ο πυρήνας μαγνητίζεται κατά την αντίθετη φορά καθώς το ρεύμα αυξάνεται σε αρνητικές τιμές, μέχρι την τιμή E, η οποία αντιστοιχεί στην περιοχή κορεσμού. Το σημείο E είναι συμμετρικό ως προς το B. Το ρεύμα μειώνεται προς το μηδέν στο τμήμα ef και μαζί του ελαττώνεται η μαγνητική ροή. Η παραμένουσα αρνητική μαγνητική ροή F μηδενίζεται, όταν το ρεύμα λάβει τη θετική τιμή g. Στο σημείο b του ρεύματος, η ροή έχει λάβει ξανά τη μέγιστη θετική τιμή της B. Έτσι ολοκληρώνεται ο βρόχος υστέρησης του πυρήνα, καμπύλη BCDEFGB.

Ο κορεσμός των σιδηρομαγνητικών υλικών οφείλεται στον πλήρη προσανατολισμό των περιοχών *Weiss*, όταν η μαγνητεγερτική δύναμη έχει υψηλή τιμή. Οι αρχικά τυχαία προσανατολισμένες περιοχές *Weiss* του υλικού, έχουν την τάση να ακολουθούν τη διεύθυνση και τη φορά του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Αυτός είναι ο λόγος που τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν πολύ μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα. Όταν όλες οι περιοχές *Weiss* προσανατολιστούν στο επιβαλλόμενο πεδίο, κάθε παραπέρα αύξηση της μαγνητεγερτικής δύναμης προκαλεί μια ασήμαντη αύξηση της ροής, όση θα είχαμε στον αέρα (κορεσμός).

Με την απομάκρυνση της επιβαλλόμενης μαγνητεγερτικής δύναμης, οι περιοχές *Weiss* δεν ξαναπαίρνουν τις αρχικές τυχαίες κατευθύνσεις τους. Έτσι, το υλικό παραμένει μαγνητισμένο, δηλαδή γίνεται μόνιμος μαγνήτης. Για την πλήρη απομαγνήτιση του υλικού πρέπει να εφαρ-

μοστεί μια μαγνητεγερτική δύναμη με την αντίθετη φορά. Επομένως, πρέπει να προσφερθεί στο υλικό ενέργεια για την απομαγνήτισή του, όπως έγινε και κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης. Όσο μεγαλύτερη είναι η παραμένουσα ροή, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που απαιτείται για την απομαγνήτιση του υλικού (συνεκτική δύναμη). Η ενέργεια της απομαγνήτισης, εκτός από τη μαγνητεγερτική δύναμη, μπορεί να έχει τη μορφή θερμότητας ή μηχανικού χτυπήματος.

Η απαίτηση παροχής ενέργειας στα σιδηρομαγνητικά υλικά για την απομαγνήτισή τους, προκαλεί τις *απώλειες υστέρησης*. Οι απώλειες υστέρησης ενός υλικού εξαρτώνται από το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης. Όσο μικρότερο είναι το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης, δηλαδή όσο μικρότερες είναι οι τιμές της παραμένουσας ροής και της συνεκτικής δύναμης, τόσο μικρότερες είναι οι απώλειες υστέρησης.

Οι απώλειες υστέρησης μαζί με τις απώλειες εξαιτίας των δινορευμάτων (παρ. 1.7), προκαλούν τη θέρμανση του πυρήνα. Οι απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων ονομάζονται μαζί *απώλειες σιδήρου ή πυρήνα (iron, core losses)*.

1.7 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ

Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής ανακαλύφθηκε και διατυπώθηκε μαθηματικά από το *Faraday*¹ το 1831. Στο φαινόμενο αυτό στηρίζεται η λειτουργία όλων των ηλεκτρικών μηχανών. Σύμφωνα με το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, ή νόμο του *Faraday*, όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από ένα πλαίσιο, *επάγεται* στα άκρα του πλαισίου μια ηλεκτρεγερτική δύναμη, η οποία είναι ανάλογη με την ταχύτητα μεταβολής της μαγνητικής ροής

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.14)$$

Στην Εξ. (1.14), N είναι ο αριθμός των σπειρών του πλαισίου (πηνίου) και ϕ η μαγνητική ροή που διέρχεται απ' αυτές. Στην ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών και των μετασχηματιστών, η Εξ. (1.14) γράφεται στη μορφή

$$e = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (1.15)$$

όπου, λ είναι η *πεπλεγμένη ροή (linkage flux)*. Η πεπλεγμένη ροή ορίζεται από τη σχέση

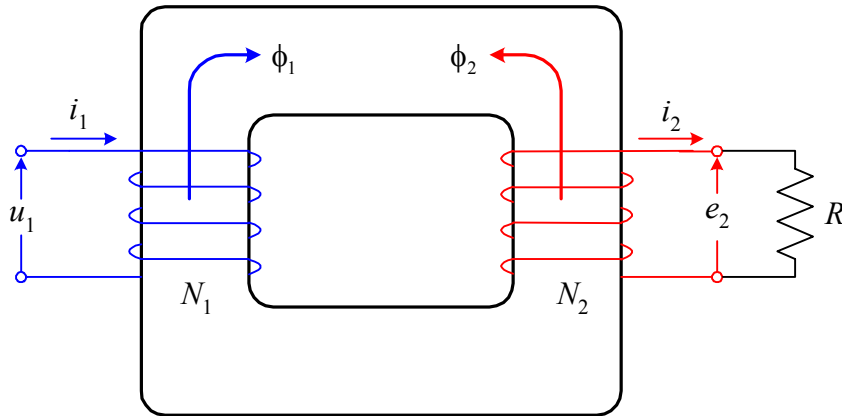
$$\lambda = N\phi \quad (1.16)$$

όταν η ίδια ροή διέρχεται από όλες τις σπείρες του πλαισίου, ή από τη σχέση

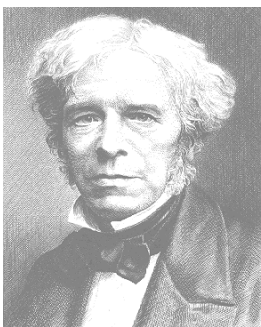
$$\lambda = \sum_{j=1}^N \phi_j \quad (1.17)$$

όταν η ροή σε κάθε σπείρα είναι διαφορετική ϕ_j .

Το αρνητικό πρόσημο στις Εξ. (1.14), (1.15) οφείλεται στο νόμο του *Lenz*. Σύμφωνα με το νόμο του *Lenz*, η πολικότητα της επαγόμενης τάσης στο πλαίσιο είναι τέτοια ώστε, εάν τα άκρα του πλαισίου τροφοδοτούν ένα φορτίο το ρεύμα που θα κυκλοφορήσει να παράγει ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο να αντιτίθεται στο αίτιο που το προκάλεσε. Το ρεύμα στο πλαίσιο ονομάζεται *επαγωγικό ρεύμα*. Ο προσδιορισμός της φοράς του επαγωγικού ρεύματος γίνεται φανερός από τη διάταξη του Σχ. 1.8, η οποία είναι ένας μετασχηματιστής.



Σχ. 1.8 Αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή, σύμφωνα με τους νόμους του *Faraday* και του *Lenz*



¹Ο Michael Faraday γεννήθηκε στο Newington του Surrey στις 22 Σεπτεμβρίου 1791. Ο πατέρας του ήταν σιδηρουργός. Έλαβε μόνο πρωτοβάθμια εκπαίδευση και σε ηλικία 14 ετών προσελήφθη ως μαθητευόμενος σ' ένα βιβλιοδετείο του Λονδίνου. Εκεί, έχοντας τη δυνατότητα να διαβάζει διάφορα βιβλία και ιδίως τα επιστημονικά, απέκτησε ενδιαφέρον για τη φυσική και τη χημεία. Παρακολουθώντας μια σειρά διαλέξεων του διάσημου χημικού Humphry Davy, έστειλε στον Davy τις άριστες σημειώσεις που είχε κρατήσει και μια αίτησή του για πρόσληψη. Έτσι, στις 1 Μαΐου 1813 διορίστηκε στο εργαστήριο του Royal Institution in London, ως βοηθός του Davy. Εκεί ο Faraday ασχολήθηκε αρχικά με προβλήματα χημείας. Ανακάλυψε δύο νέους χλωριούχους άνθρακες και το 1823 την υγροποίηση του χλωρίου.

Το 1825 ανακάλυψε μια νέα ουσία, η οποία είναι σήμερα γνωστή ως βενζόλιο (benzene), χροιά στην οποία διορίστηκε διευθυντής του εργαστηρίου του Βασιλικού Ινστιτούτου.

Παρά την αρχική του ενασχόληση με τη χημεία, ο Faraday είναι κυρίως γνωστός από την εργασία του στον ηλεκτρομαγνητισμό. Αφορμή της έρευνας του Faraday στον ηλεκτρισμό ήταν τα πειράματα του Davy, από το 1807, για το διαχωρισμό του νατρίου και του καλίου μέσω του ηλεκτρικού ρεύματος, με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Το 1820 οι Hans Christian Oersted και Andre Marie Ampere ανακάλυψαν ότι το ηλεκτρικό ρεύμα παράγει μαγνητικό πεδίο. Βασισόμενος στα ανωτέρω και στην ιδέα του για τη διατήρηση της ενέργειας, ο Faraday πίστευε ότι αφού το ηλεκτρικό ρεύμα παράγει μαγνητικό πεδίο, θα έπρεπε και το μαγνητικό πεδίο να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Έτσι, το 1831 μετά από μια μεγάλη σειρά πειραμάτων διατύπωσε το Νόμο της Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής, ο οποίος είναι σήμερα γνωστός και ως Νόμος του Faraday. Ο Faraday περιέγραψε τα πειράματά του σε δύο άρθρα, τα οποία παρουσιάστηκαν στη Royal Society στις 24 Νοεμβρίου 1831 και 12 Ιανουαρίου 1832. Διαβάζοντας τα άρθρα του Faraday ο νεαρός Γάλλος Hippolyte Pixii κατασκεύασε το 1832 την πρώτη ηλεκτρική γεννήτρια. Επομένως, η αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday αποτέλεσε το ορόσημο για την κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών.

Ο Faraday εξέφρασε το επαγόμενο ρεύμα στον αγωγό, ως συνάρτηση του αριθμού των δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου που τέμνουν τον αγωγό. Η ιδέα των δυναμικών γραμμών, την οποία ο Faraday αποκόμισε πειραματικά, απορρίφθηκε αρχικά από τους θεωρητικούς φυσικούς. Εντούτοις ο James Clerk Maxwell δέχτηκε την άποψη των δυναμικών γραμμών και έθεσε τις ιδέες του Faraday σε μαθηματική βάση, σηματοδοτώντας την έναρξη της μοντέρνας θεωρίας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Το 1865 ο Maxwell απέδειξε μαθηματικά ότι τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα διαδίδονται ως κύματα με την ταχύτητα του φωτός.

Σημαντική είναι ακόμη η εργασία του Faraday στην ηλεκτροχημεία, όπου διατύπωσε το 1834 τον Πρώτο και το Δεύτερο Νόμο της Ηλεκτρόλυσης. Ακόμη, το 1845 ανακάλυψε ότι ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο μπορεί να περιστρέφει το επίπεδο πόλωσης μιας δέσμης επίπεδα πολωμένου φωτός (Faraday effect).

Ο Faraday συμπεριέλαβε τα πολυάριθμα πειράματά του στον ηλεκτρικό και τον ηλεκτρομαγνητισμό σε τρεις τόμους με τίτλο, “Experimental Researches in Electricity” (1839, 1844, 1855). Εξαιτίας της μείωσης των πνευματικών του δυνάμεων σταμάτησε την ερευνητική εργασία το 1855, αλλά συνέχισε τις παραδόσεις μαθημάτων έως το 1861. Το 1865 αποσύρθηκε από το Royal Institution. Ο Faraday πέθανε στο Hampton Court του Λονδίνου στις 25 Αυγούστου 1867.

Το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή N_1 διαρρέετε από το ρεύμα i_1 και προκαλεί τη ροή ϕ_1 στον πυρήνα. Η ροή ϕ_1 διέρχεται από τις σπείρες του δευτερεύοντος τυλίγματος N_2 , με αποτέλεσμα την ανάπτυξη της τάσης από επαγωγή e_2 . Όταν το δευτερεύον τύλιγμα είναι κλειστό, μέσω της αντίστασης φορτίου R , το επαγωγικό ρεύμα i_2 έχει τη σημειωμένη φορά. Το ρεύμα i_2 προκαλεί τη μαγνητική ροή ϕ_2 , με φορά αντίθετη της ϕ_1 , η οποία το προκάλεσε.

Όταν η ροή στον πυρήνα του Σχ. 1.8 μεταβάλλεται χρονικά, όπως απαιτεί η λειτουργία του μετασχηματιστή, επάγονται τάσεις εκτός από το δευτερεύον τύλιγμα και μέσα στο υλικό του πυρήνα. Αυτές οι τάσεις προκαλούν την κυκλοφορία ρευμάτων μέσα στον πυρήνα. Τα ρεύματα αυτά, επειδή ακολουθούν διαδρομές που μοιάζουν με δίνες, ονομάζονται *δινορεύματα* (*eddy current*). Τα δινορεύματα προκαλούν απώλειες στον πυρήνα, με συνέπεια τη θέρμανσή του. Οι απώλειες λόγω των δινορευμάτων είναι ανάλογες με το μήκος της διαδρομής των ρευμάτων αυτών μέσα στον πυρήνα. Προκειμένου το μήκος της διαδρομής των δινορευμάτων να είναι μικρό, οι πυρήνες των μετασχηματιστών και των ηλεκτρικών μηχανών κατασκευάζονται από *ελάσματα* (*laminations*) μικρού πάχους, μονωμένα μεταξύ τους με ρητίνες. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση στον πυρήνα για τον περιορισμό των δινορευμάτων, χωρίς να αυξάνεται η μαγνητική του αντίσταση.

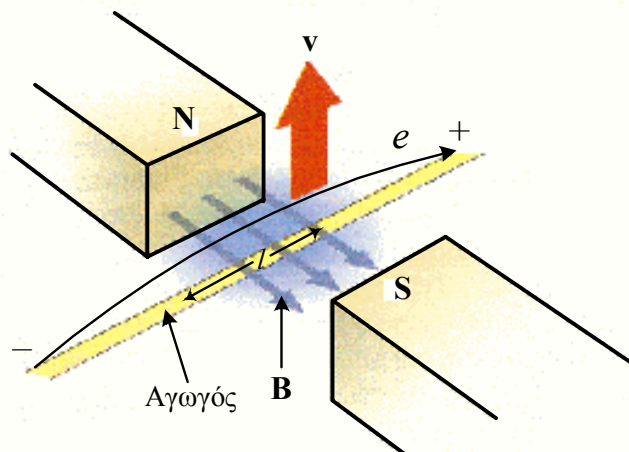
Αποτέλεσμα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής είναι η ανάπτυξη τάσης από επαγωγή στα άκρα ενός αγωγού, ο οποίος κινείται μέσα σ' ένα μαγνητικό πεδίο (Σχ. 1.9). Η επαγόμενη τάση υπολογίζεται από τη διανυσματική εξίσωση

$$e = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (1.18)$$

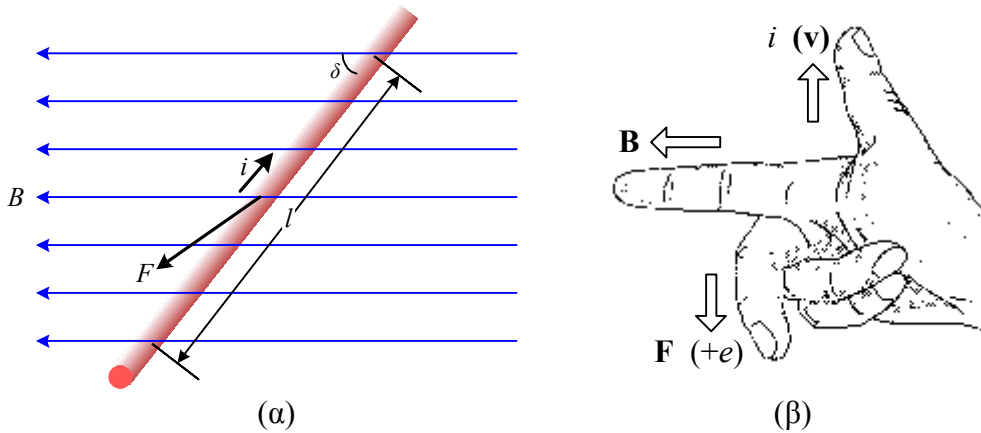
όπου, \mathbf{v} είναι το άνυσμα της ταχύτητας του αγωγού, \mathbf{B} η μαγνητική επαγωγή και \mathbf{l} το άνυσμα με μέτρο το μήκος του αγωγού. Η πολικότητα της επαγόμενης τάσης ορίζεται από τη φορά του διανύσματος $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Η φορά του διανύσματος $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ δείχνει στο άκρο του αγωγού με το θετικό δυναμικό. (Αν στο Σχ. 1.10β αντικαταστήσουμε το ρεύμα με την ταχύτητα, τότε ο μέσος μας δείχνει το θετικό άκρο της επαγόμενης τάσης).

1.8 ΔΥΝΑΜΗ LAPLACE ΣΕ ΡΕΥΜΑΤΟΦΟΡΟ ΑΓΩΓΟ

Όταν ένας αγωγός που διαρρέετε από ρεύμα i βρίσκεται μέσα σ' ένα μαγνητικό πεδίο, τότε στον αγωγό ασκείται μια δύναμη F , η οποία ονομάζεται *δύναμη Laplace* (Σχ. 1.10α).



Σχ. 1.9 Τάση από επαγωγή στα άκρα αγωγού κινούμενου μέσα σε μαγνητικό πεδίο



Σχ. 1.10 Δύναμη Laplace σε ρευματοφόρο αγωγό από το μαγνητικό πεδίο (α). Κανόνας του δεξιού χεριού (β)

Η δύναμη Laplace εξαρτάται από το μήκος του αγωγού l , την ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει i και τη μαγνητική επαγωγή του πεδίου B , σύμφωνα με τη διανυσματική εξίσωση

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \tag{1.19}$$

Η φορά της δύναμη Laplace ορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού. Σύμφωνα μ' αυτόν, ο αντίχειρας του δεξιού χεριού δείχνει τη φορά του ρεύματος, ο δείκτης τη φορά του μαγνητικού πεδίου και ο μέσος τη φορά της δύναμης (Σχ. 1.10β). Το μέτρο της δύναμη Laplace είναι ίσο με

$$F = ilB \sin \delta \tag{1.20}$$

όπου δ είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του αγωγού και του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής. Η δύναμη Laplace είναι μέγιστη όταν ο αγωγός είναι κάθετος στο πεδίο, $\delta = 90^\circ$. Αντίστοιχα, η δύναμη Laplace και μηδενική όταν ο αγωγός είναι παράλληλος προς το μαγνητικό πεδίο, $\delta = 0^\circ$.