

Κεφάλαιο 3

ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Ενότητα 3.1

Μαγνητισμός - Ηλεκτρομαγνητισμός

“Διδακτικοί στόχοι”

Με τη μελέτη της ενότητας αυτής οι μαθητές θα είναι σε θέση:

- να γνωρίζουν τι είναι οι φυσικοί και τεχνητοί μαγνήτες και την ιδιότητα της μαγνητικής βελόνας να δείχνει πάντα το Βορρά.
- να γνωρίζουν τι είναι οι πόλοι ενός μαγνήτη και τι δυνάμεις εξασκούν.
- να γνωρίζουν πώς παριστάνουμε ένα μαγνητικό πεδίο με τη βοήθεια των μαγνητικών γραμμών.
- να γνωρίζουν τι είναι το μαγνητικό πεδίο της Γης.
- να γνωρίζουν τι είναι τα σιδηρομαγνητικά και τι τα διαμαγνητικά υλικά.
- να γνωρίζουν πώς μαγνητίζεται ένα σιδηρομαγνητικό υλικό.

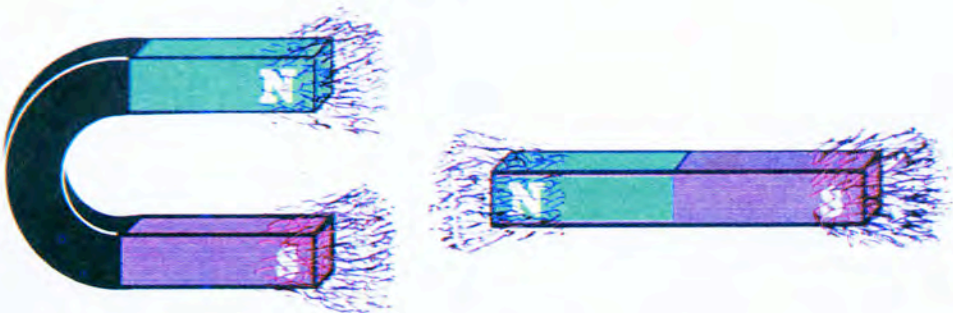
3.1.1. Φυσικοί και τεχνητοί μαγνήτες

Ο μαγνητισμός οφείλει το όνομά του στο "μαγνήτη λίθο" ένα ορυκτό, που πρωτοβρέθηκε στη Μαγνησία της Μικράς Ασίας και ήταν γνωστό από την αρχαιότητα. Το παραπάνω υλικό έχει τη ιδιότητα να έλκει σιδερένια αντικείμενα. Η ιδιότητα αυτή που αναφέρεται από τον Θαλή τον Μιλήσιο (6ος αιώνας π.Χ.) ονομάστηκε **μαγνητισμός**. Γενικά μαγνήτες ή ακριβέστερα **μόνιμοι μαγνήτες** ονομάζονται τα υλικά που έχουν την ιδιότητα να έλκουν το σίδηρο και ορισμένα άλλα υλικά, όπως το νικέλιο και το κοβάλτιο.

Οι μαγνήτες διακρίνονται σε φυσικούς και τεχνητούς. Οι **φυσικοί μαγνήτες** (όπως και ο μαγνήτης λίθος της αρχαιότητας) προέρχονται κυρίως από το ορυκτό που ονομάζεται **μαγνητίτης** και είναι ένα οξειδίο του σιδήρου.

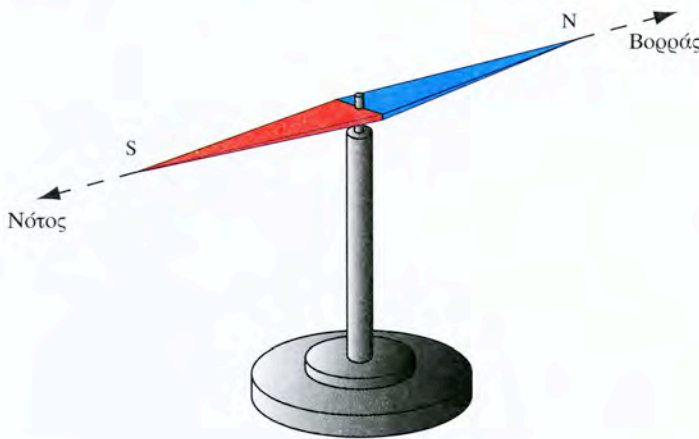
Οι **τεχνητοί μαγνήτες** είναι κράματα του σιδήρου, που μαγνητίζονται τεχνητά με τη βοήθεια ισχυρών ηλεκτρικών ρευμάτων και έχουν την ικανότητα να διατηρούν για μεγάλο χρονικό διάστημα το μαγνητισμό τους. Γενικά οι τεχνητοί μαγνήτες που κατασκευάζονται σήμερα έχουν καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες και έχουν αντικαταστήσει στις ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές τους φυσικούς μαγνήτες.

Η ελκτική ικανότητα ενός μαγνήτη είναι εντονότερη στις άκρες του και αυτό είναι ανεξάρτητο από το σχήμα του μαγνήτη. Αν βυθίσουμε δύο μαγνήτες, ένα ραβδόμορφο και έναν πεταλοειδή, σε ένα σωρό από ρινίσματα σιδήρου, θα πάρουμε την εικόνα που φαίνεται στο Σχ. 3.1.1.



Σχήμα 3.1.1: Πεταλοειδής και ραβδόμορφος μαγνήτης

Τα σημεία, στα οποία παρατηρούμε τη μεγαλύτερη συγκέντρωση ριניσμάτων ονομάζονται **πόλοι** του μαγνήτη. Οι πόλοι κάθε μαγνήτη είναι πάντοτε δύο και είναι διαφορετικοί ο ένας από τον άλλο. Αυτό μπορούμε να το διαπιστώσουμε με τη βοήθεια μιας **μαγνητικής βελόνας** (Σχ. 3.1.2). Η μαγνητική βελόνα είναι ένας ελαφρός μαγνήτης σε σχήμα βελόνας που στηρίζεται στο κέντρο βάρους του και μπορεί να περιστραφεί ελεύθερα στο οριζόντιο επίπεδο. Στη μαγνητική βελόνα του Σχ. 3.1.2 οι πόλοι έχουν βαφεί με διαφορετικά χρώματα για να τους ξεχωρίζουμε.



Σχήμα 3.1.2: Μαγνητική βελόνα

Παρατηρώντας τη μαγνητική βελόνα διαπιστώνουμε ότι ο ένας πόλος στρέφεται πάντοτε προς το Βορρά και ο άλλος προς το Νότο. Τον πόλο που στρέφεται προς τον Βορρά ονομάζουμε συμβατικά **βόρειο** μαγνητικό πόλο της βελόνας, ενώ τον πόλο που στρέφεται προς το Νότο, **νότιο** μαγνητικό πόλο. Ο βόρειος πόλος συμβολίζεται με τον γράμμα N (Αγγλικά North, Γαλλικά Nord) και ο νότιος πόλος με το γράμμα S (Αγγλικά South, Γαλλικά Sud). Αν στρέψουμε τη βελόνα κατά 180° , ώστε ο βόρειος πόλος της να δείχνει το Νότο και την αφήσουμε, η βελόνα θα γυρίσει στην αρχική της θέση, έτσι ώστε ο βόρειος πόλος να δείχνει ξανά το Βορρά.

Σε αντιστοιχία με τη μαγνητική βελόνα οι δύο πόλοι κάθε μαγνήτη ονομάζονται **βόρειος** και **νότιος** πόλος.

Αν πλησιάσουμε κοντά δύο μαγνήτες παρατηρούμε ότι ο βόρειος πόλος του ενός μαγνήτη απωθεί το βόρειο πόλο του άλλου. Το ίδιο συμβαίνει αν πλησιάσουν δύο νότιοι πόλοι. Αντίθετα, ο βόρειος πόλος του ενός μαγνήτη έλκει και έλκεται από το νότιο πόλο του άλλου.

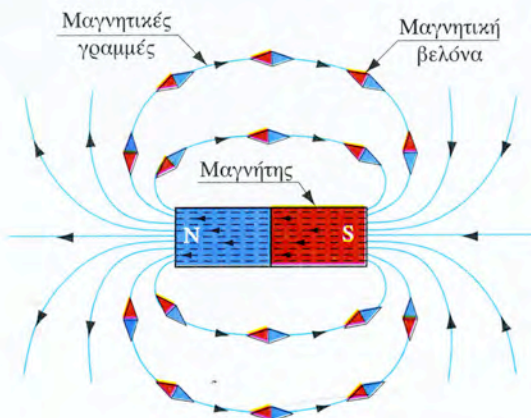
Έτσι μπορούμε να πούμε γενικά ότι:

- ❑ οι ομώνυμοι μαγνητικοί πόλοι απωθούνται
- ❑ οι ετερόνυμοι μαγνητικοί πόλοι έλκονται

3.1.2. Μαγνητικό πεδίο - μαγνητικές γραμμές

Μέχρι τώρα έχουμε δει ότι οι μαγνήτες ασκούν δυνάμεις σε άλλους μαγνήτες. Στο πρώτο κεφάλαιο είδαμε επίσης ότι τα ηλεκτρικά φορτία ασκούν δυνάμεις σε άλλα φορτία. Όταν ένα σώμα ασκεί δυνάμεις σε άλλα σώματα από απόσταση λέμε ότι το σώμα αυτό δημιουργεί γύρω του ένα πεδίο δυνάμεων, ή απλά ένα **πεδίο**. Υπάρχει για παράδειγμα το **ηλεκτρικό πεδίο** που οφείλεται σε ηλεκτρικά φορτία και το **μαγνητικό πεδίο** που παράγεται από τους μαγνήτες. Ξέρουμε όλοι επίσης το **πεδίο βαρύτητας**, που δημιουργεί η γη και στο οποίο οφείλεται το βάρος των σωμάτων.

Ας δούμε τώρα ειδικότερα το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί γύρω του ένας ραβδόμορφος μαγνήτης. Αν ο μαγνήτης είναι αρκετά ισχυρότερος από το μαγνητικό πεδίο της γης, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη μορφή του μαγνητικού πεδίου του με τη βοήθεια μιας μαγνητικής βελόνας (Σχ. 3.1.3).



Σχήμα 3.1.3 : Μαγνητικές γραμμές ραβδόμορφου μαγνήτη

Βάζοντας τη μαγνητική βελόνα σε διαδοχικές θέσεις, τις οποίες στη συνέχεια συνδέουμε μεταξύ τους, μπορούμε να σχεδιάσουμε τις γραμμές που φαίνονται στο Σχ. 3.1.3. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται **μαγνητικές γραμμές**.

□ **Οι μαγνητικές γραμμές δίνουν τη διεύθυνση των δυνάμεων που ασκεί το μαγνητικό πεδίο σε κάθε σημείο του χώρου.**

Σε κάθε σημείο των μαγνητικών γραμμών ο βόρειος πόλος της μαγνητικής βελόνας δείχνει τη **φορά** των μαγνητικών γραμμών. Αυτό σημαίνει ότι:

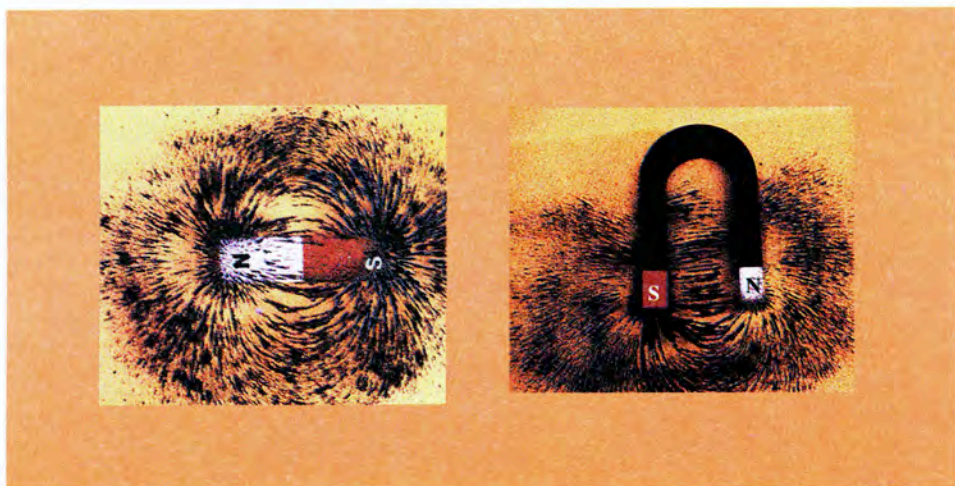
□ **Η φορά της δύναμης που ασκείται σε ένα βόρειο μαγνητικό πόλο δίνεται από τη φορά των μαγνητικών γραμμών. Αντίθετα σε ένα νότιο μαγνητικό πόλο ασκείται δύναμη με φορά αντίθετη από αυτή των μαγνητικών γραμμών.**

Αφού, όπως είπαμε, οι ετερόνυμοι πόλοι έλκονται και οι ομώνυμοι απωθούνται ο βόρειος πόλος της μαγνητικής βελόνας θα είναι πάντα προσανατολισμένος προς το νότιο πόλο του μαγνήτη. Συγκεκριμένα, ο βόρειος πόλος της βελόνας δείχνει τη φορά με την οποία πρέπει να διαγράψουμε τη μαγνητική γραμμή για να φτάσουμε στο νότιο πόλο του μαγνήτη. Έτσι οι μαγνητικές γραμμές **εξέρχονται** από το **βόρειο** πόλο του ραβδόμορφου μαγνήτη και **εισέρχονται** στο **νότιο** πόλο. Οι μαγνητικές γραμμές συνεχίζονται και στο εσωτερικό του μαγνήτη (όπως φαίνεται από τις διακεκομμένες γραμμές) και είναι πάντα **κλειστές καμπύλες**, χωρίς αρχή και τέλος.

Όπως είπαμε παραπάνω, σε κάθε σημείο των μαγνητικών γραμμών ασκείται μια δύναμη στο βόρειο πόλο της βελόνας κατά τη διεύθυνση και τη φορά των μαγνητικών γραμμών. Αντίστοιχα, στο νότιο πόλο της βελόνας ασκείται μια δύναμη κατά την ίδια διεύθυνση, αλλά με αντίθετη φορά. Επίσης, αν η βελόνα θεωρηθεί αρκετά μικρή, ώστε οι δυο πόλοι να βρίσκονται πρακτικά στο ίδιο σημείο, τα μέτρα των δυνάμεων που ασκούνται στους δύο πόλους της βελόνας είναι ίσα. Έτσι η μαγνητική βελόνα ισορροπεί γιατί δέχεται δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις στους δύο πόλους της.

Μια άλλη εικόνα των μαγνητικών γραμμών μπορούμε να σχηματίσουμε αν κοσκινίσουμε ρινίσματα σιδήρου επάνω σε ένα χαρτόνι που έχουμε τοποθετήσει επάνω σε ένα ραβδόμορφο μαγνήτη. Παίρνουμε τότε την εικόνα του Σχ. 3.1.4.

Οι μαγνητικές γραμμές μας δίνουν την πιο παραστατική εικόνα του μαγνητικού πεδίου που μπορούμε να πάρουμε οπτικά. Αν σχεδιάσουμε τις μαγνητικές γραμμές, ώστε να έχουν σταθερές μεταξύ τους αποστάσεις επάνω στους πόλους του μαγνήτη (π.χ. 1 mm στο Σχ. 3.1.3), παρατηρούμε ότι αυτές αραιώνουν, όσο απομακρυνόμαστε από τους πόλους. Αυτό σημαίνει ότι το μαγνητικό πεδίο είναι **ισχυρότερο** στους πόλους, εκεί δηλαδή που οι μαγνητικές γραμμές είναι **πυκνότερες**.



Σχήμα 3.1.4 : Μαγνητικές γραμμές από ρινίσματα σιδήρου

3.1.3. Γήινος μαγνητισμός

Αφού η μαγνητική βελόνα προσανατολίζεται δείχνοντας το Βορρά μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η Γη δημιουργεί γύρω της ένα μαγνητικό πεδίο. Οι πόλοι αυτού του μαγνητικού πεδίου δεν συμπίπτουν ακριβώς με τους γεωγραφικούς πόλους της γης, αλλά βρίσκονται πολύ κοντά σε αυτούς. Συγκεκριμένα, ο *νότιος* μαγνητικός πόλος του μαγνητικού πεδίου της γης βρίσκεται κοντά στο *Βόρειο* γεωγραφικό πόλο και ο *βόρειος* μαγνητικός πόλος του μαγνητικού πεδίου της Γης βρίσκεται κοντά στο *Νότιο* γεωγραφικό πόλο. Αυτό φαίνεται σε πρώτη προσέγγιση παράδοξο, αλλά αποτελεί λογική συνέπεια του ορισμού που δώσαμε για το βόρειο πόλο της μαγνητικής βελόνας (αυτός που δείχνει το Βορρά) και τον οποίο επεκτείναμε για το βόρειο πόλο κάθε μαγνητικού πεδίου.

Το γήινο μαγνητικό πεδίο χρησιμοποιείται ως γνωστόν για τον προσανατολισμό με χρήση της μαγνητικής πυξίδας (Σχ. 3.1.5) δηλαδή μιας συσκευής που περιέχει ένα μόνιμο μαγνήτη, π.χ. μια μαγνητική βελόνα. Οι Κινέζοι θεωρούνται οι πρώτοι που έκαναν χρήση της πυξίδας για προσανατολισμό, κατά τον 11ο αιώνα μ.Χ.



Σχήμα 3.1.5: Μαγνητική πυξίδα

3.1.4. Μαγνητικά υλικά - μαγνήτιση

Γενικά σε σχέση με τις μαγνητικές τους ιδιότητες τα υλικά χωρίζονται σε σιδηρομαγνητικά και διαμαγνητικά.

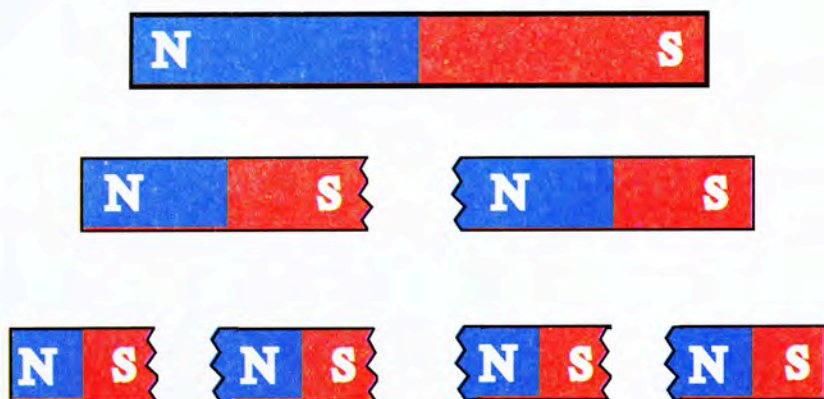
Σιδηρομαγνητικά υλικά είναι αυτά που μαγνητίζονται. Είναι κυρίως ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο και τα κράματά τους. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά χωρίζονται σε σκληρά και μαλακά. Τα **σκληρά** σιδηρομαγνητικά υλικά (όπως π.χ. ο σκληρός χάλυβας) εάν μαγνητιστούν, διατηρούν το μαγνητισμό τους, γίνονται δηλαδή μόνιμοι μαγνήτες. Τα **μαλακά** σιδηρομαγνητικά υλικά είναι αυτά που μαγνητίζονται, όταν βρεθούν σε μαγνητικό πεδίο, αλλά χάνουν το μαγνητισμό τους, όταν πάψει η επίδραση του πεδίου που τα μαγνήτισε.

Τα υλικά που δεν μαγνητίζονται ονομάζονται **διαμαγνητικά** υλικά. Τέτοια είναι τα περισσότερα μέταλλα και κράματα, όπως ο χαλκός, το αλουμίνιο, ο ορείχαλκος. Επίσης διαμαγνητικά υλικά είναι το ξύλο, το νερό, ο αέρας και γενικά όλα τα υλικά εκτός από τα σιδηρομαγνητικά.

Όπως είπαμε και παραπάνω:

□ **Κάθε μαγνήτης έχει πάντα δυο πόλους.**

Έτσι, αν κόψουμε στη μέση ένα ραβδόμορφο μαγνήτη θα πάρουμε δύο άλλους μαγνήτες, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.1.6. Αν κόψουμε στη μέση και τους δυο νέους μαγνήτες, θα πάρουμε τέσσερις μαγνήτες, οι οποίοι θα διαθέτουν πάλι δύο πόλους ο καθένας. Όσο και να συνεχιστεί ο τεμαχισμός, πάντα τα κομμάτια που θα παίρνουμε θα αποτελούν μικρότερους μαγνήτες, που θα έχουν όλοι από δύο πόλους.



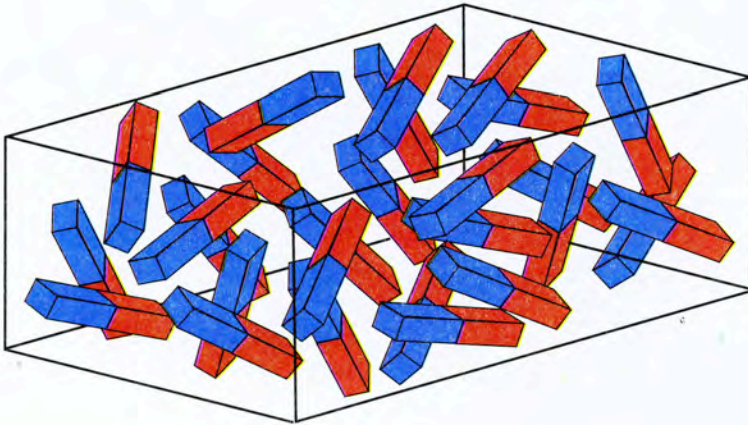
Σχήμα 3.1.6: Τεμαχίζοντας ένα μαγνήτη παίρνουμε πάντα μαγνητικά δίπολα

Η παρατήρηση αυτή μας οδηγεί στη διατύπωση της θεωρίας ότι τα σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούνται από στοιχειώδεις μαγνήτες. Όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό δεν είναι μαγνητισμένο, οι στοιχειώδεις αυτοί μαγνήτες δεν είναι προσανατολισμένοι αλλά κατέχουν τυχαίες θέσεις (Σχ.3.1.7). Με τον τρόπο αυτό, τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούν οι στοιχειώδεις μαγνήτες αλληλοαναιρούνται και το υλικό προς τα έξω φαίνεται αμαγνήτιστο, δεν δημιουργεί δηλαδή μαγνητικό πεδίο.

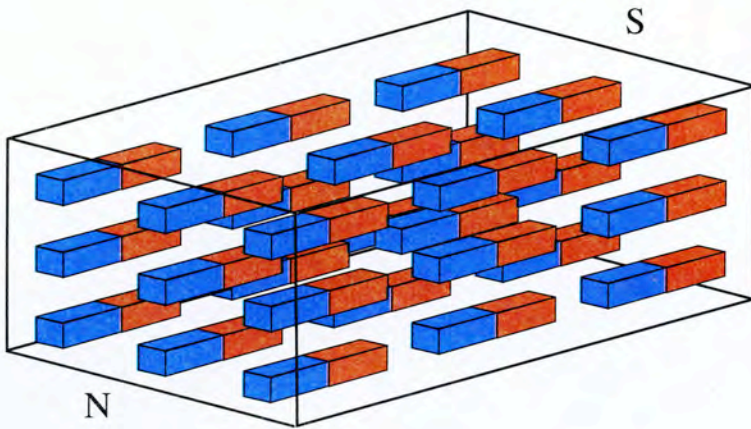
Μόλις πλησιάσουμε κοντά στο αμαγνήτιστο σιδηρομαγνητικό υλικό ένα μαγνήτη, τότε οι στοιχειώδεις μαγνήτες αρχίζουν να προσανατολίζονται. Όσο

ισχυρότερο είναι το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τόσο περισσότεροι στοιχειώδεις μαγνήτες προσανατολίζονται κατά τη φορά του πεδίου (Σχ.3.1.8). Το υλικό αποκτά έτσι μαγνητικές ιδιότητες οι οποίες μπορεί να είναι είτε μόνιμες (σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά), είτε παροδικές (μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά).

Το Σχ. 3.1.8 προσφέρεται για να κατανοήσουμε ένα ακόμα φαινόμενο που σχετίζεται με τα σιδηρομαγνητικά υλικά: Ας υποθέσουμε ότι το μαγνητικό πεδίο, μέσα στο οποίο βρίσκεται ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, γίνεται τόσο ισχυρό, ώστε να προσανατολίσει όλους τους στοιχειώδεις μαγνήτες που διαθέτει το υλικό. Από το σημείο αυτό και μετά το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο δεν μπορεί να μαγνητίσει περισσότερο το υλικό, αφού δεν υπάρχουν πια άλλοι στοιχειώδεις μαγνήτες για να προσανατολιστούν. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **μαγνητικός κορεσμός**.



Σχήμα 3.1.7: Αμαγνήτιστο σιδηρομαγνητικό υλικό



Σχήμα 3.1.8: Σιδηρομαγνητικό υλικό πλήρως μαγνητισμένο

Ανακεφαλαίωση

- Οι μόνιμοι μαγνήτες μπορεί να είναι φυσικοί ή τεχνητοί. Οι τεχνητοί μαγνήτες μαγνητίζονται με τη βοήθεια ισχυρών ηλεκτρικών ρευμάτων.
- Κάθε μαγνήτης έχει πάντα δύο πόλους: το βόρειο και το νότιο.
- Οι ομώνυμοι μαγνητικοί πόλοι απωθούνται και οι ετερόνυμοι έλκονται.
- Οι μαγνητικές γραμμές δείχνουν τη διεύθυνση και τη φορά της δύναμης που ασκεί το μαγνητικό πεδίο σε ένα βόρειο μαγνητικό πόλο.
- Οι μαγνητικές γραμμές είναι κλειστές καμπύλες που εξέρχονται από το βόρειο πόλο και εισέρχονται στο νότιο πόλο του μαγνήτη που δημιουργεί το πεδίο.
- Η Γη δημιουργεί γύρω της ένα μαγνητικό πεδίο.
- Τα υλικά χωρίζονται σε αυτά που μαγνητίζονται (σιδηρομαγνητικά υλικά) και σε αυτά που δεν μαγνητίζονται (διαμαγνητικά υλικά).
- Τα σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούνται από μικρούς στοιχειώδεις μαγνήτες και μπορεί είτε να διατηρούν το μαγνητισμό τους όταν μαγνητιστούν (σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά), είτε να απομαγνητίζονται γρήγορα (μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά).

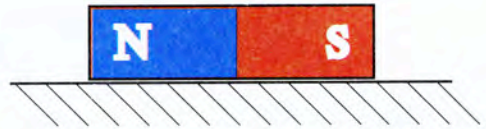
Ερωτήσεις

1. Πώς μαγνητίζονται οι τεχνητοί μαγνήτες;
2. Ο μαγνήτης A είναι τοποθετημένος πάνω σε ένα λείο επίπεδο, όπως στο σχήμα. Πώς πρέπει να τοποθετήσουμε το μαγνήτη B, ώστε να κινηθεί ο A προς τα αριστερά;

Μαγνήτης B



Μαγνήτης A



3. Αν βυθίσουμε ένα μαγνήτη σε ρινίσματα σιδήρου, πού θα συγκεντρωθούν τα περισσότερα ρινίσματα και γιατί;
4. Κοντά σε ποια γεωγραφικά σημεία είναι ισχυρότερο το μαγνητικό πεδίο της Γης;
5. Μπορούμε να προσανατολιστούμε με τη βοήθεια της μαγνητικής πυξίδας, όταν βρισκόμαστε κοντά στο Νότιο γεωγραφικό πόλο; Αιτιολογήστε την απάντησή σας.
6. Μπορούμε να προσανατολιστούμε με τη βοήθεια της μαγνητικής βελόνας, όταν βρισκόμαστε κοντά σε έναν ισχυρό μαγνήτη;
7. Αν θέλουμε να κατασκευάσουμε έναν τεχνητό μαγνήτη, τι υλικό θα χρησιμοποιήσουμε και γιατί;
8. Μπορούμε να απομονώσουμε ένα βόρειο ή ένα νότιο μαγνητικό πόλο; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.
9. Τι ιδιότητα έχουν τα διαμαγνητικά υλικά;
10. Σε τι οφείλεται το φαινόμενο του μαγνητικού κορεσμού;

Ενότητα 3.2

Το ηλεκτρικό ρεύμα και το μαγνητικό πεδίο

“Διδακτικοί στόχοι”

Με τη μελέτη της ενότητας αυτής οι μαθητές θα είναι σε θέση:

- να γνωρίζουν το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ένας ευθύγραμμος αγωγός, όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.
- να γνωρίζουν το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ένα σωληνοειδές πηνίο.
- να γνωρίζουν τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν ένα μαγνητικό πεδίο και συγχετιζόμενα: τη μαγνητική επαγωγή, τη μαγνητική ροή, τη μαγνητογενετική δύναμη και την ένταση του μαγνητικού πεδίου.
- να γνωρίζουν το νόμο του Αμπέρ ή του διαρρέυματος.

3.2.1. Προέλευση του μαγνητισμού από το ηλεκτρικό ρεύμα

Μαγνητικό πεδίο δεν εμφανίζεται μόνο γύρω από ένα μαγνήτη. Έχει παρατηρηθεί ήδη από το 1820 με το περίφημο πείραμα του Έρστεντ (Oersted) ότι ένας αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα επιδρά σε μια μαγνητική βελόνα και την εκτρέπει από τη θέση ισορροπίας της.

Η θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού, όπως διατυπώθηκε από τον Μάξγουελ κατά το 19ο αιώνα δέχεται ότι:

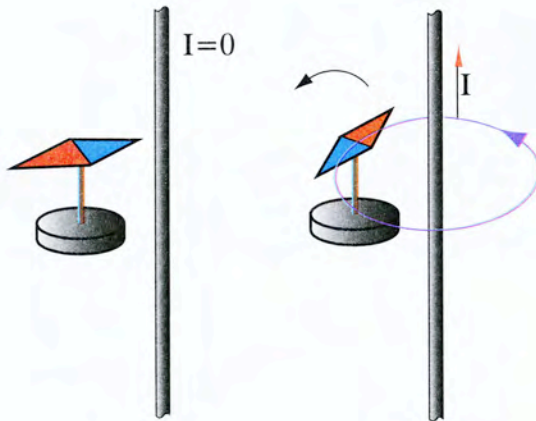
□ Το μαγνητικό πεδίο οφείλεται αποκλειστικά στα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία, δηλαδή στο ηλεκτρικό ρεύμα.

Έτσι και οι μαγνητικές ιδιότητες ενός σιδηρομαγνητικού υλικού θα πρέπει να εξηγηθούν από την κίνηση των ηλεκτρονίων (τα οποία, όπως είδαμε είναι ηλεκτρικά φορτισμένα) στο εσωτερικό των ατόμων, από τα οποία αποτελείται το υλικό. Στα περισσότερα υλικά (δηλαδή στα διαμαγνητικά) τα στοιχειώδη μαγνητικά πεδία των ηλεκτρονίων αλληλοαναιρούνται σε μεγάλο βαθμό και έτσι το υλικό εξωτερικά δεν φαίνεται μαγνητισμένο. Ειδικά όμως στα σιδηρομαγνητικά υλικά τα στοιχειώδη μαγνητικά πεδία των ηλεκτρονίων συντίθενται και δημιουργούν τους στοιχειώδεις μαγνήτες που δείξαμε στα Σχήματα 3.1.7 και 3.1.8.

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από ρευματοφόρους αγωγούς.

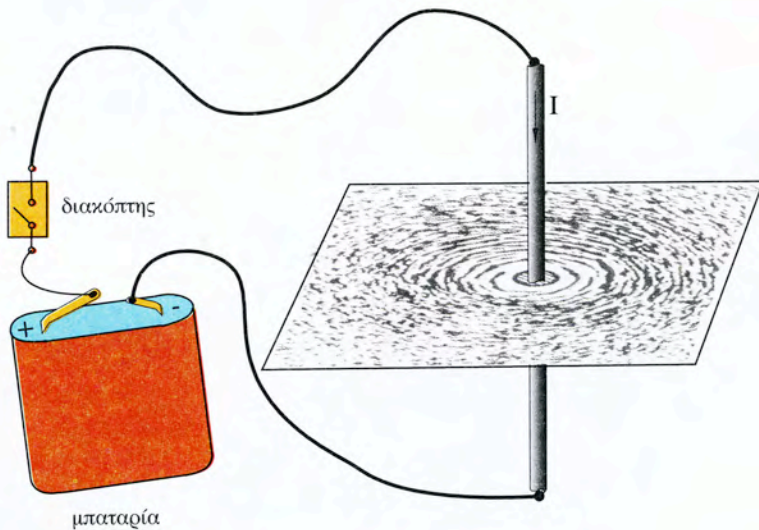
3.2.2. Το μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου αγωγού

Στο προηγούμενο κεφάλαιο διαπιστώσαμε ότι γύρω από κάθε μαγνήτη δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο. Θα εξετάσουμε τώρα το μαγνητικό πεδίο που προκαλεί το ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα 3.2.1: Εκτροπή μαγνητικής βελόνας από ρευματοφόρο αγωγό

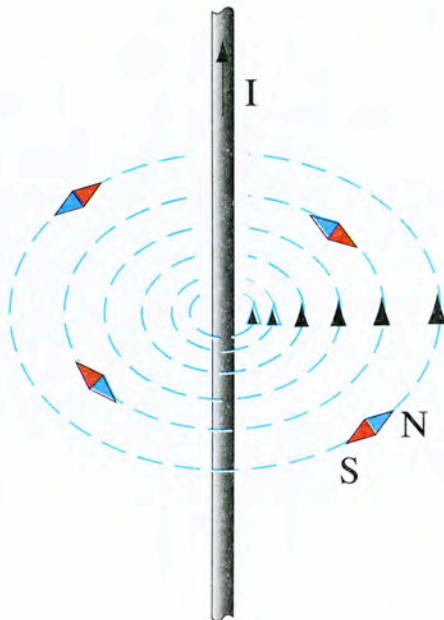
Αν πλησιάσουμε σε μια μαγνητική βελόνα που ισορροπεί έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα (Σχ. 3.2.1) θα διαπιστώσουμε ότι η βελόνα εκτρέπεται από την αρχική της θέση ισορροπίας και ισορροπεί σε μια νέα θέση. Το πείραμα αυτό αποδεικνύει πως το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 3.2.2: Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου αγωγού

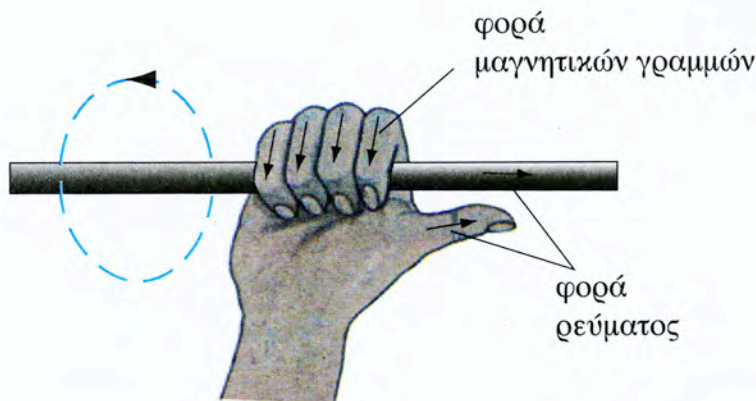
Για να εξετάσουμε τη μορφή του μαγνητικού πεδίου ενός ευθύγραμμου αγωγού, συνδέουμε σε μια πηγή συνεχούς τάσεως έναν αγωγό ο οποίος διαπερνά κάθετα ένα χαρτόνι. Επάνω στο χαρτόνι έχουμε τοποθετήσει ρινίσματα σιδήρου. Όταν κλείσουμε το διακόπτη του ηλεκτρικού κυκλώματος και ο αγωγός αρχίσει να διαρρέεται από ρεύμα, θα διαπιστώσουμε ότι τα ρινίσματα σχηματίζουν ομόκεντρους κύκλους με κέντρο το σημείο όπου ο ευθύγραμμος αγωγός διαπερνά το χαρτόνι (Σχ. 3.2.2).

Η διεύθυνση και η φορά των μαγνητικών γραμμών μπορεί να βρεθεί με τη χρήση μιας μαγνητικής βελόνας (Σχ. 3.2.3). Ο βόρειος πόλος της βελόνας δείχνει, όπως και στο μόνιμο μαγνήτη του Σχ. 3.1.3, τη φορά των μαγνητικών γραμμών. Αν το συνεχές ρεύμα I , που διαρρέει τον αγωγό, αλλάξει φορά, τότε και οι μαγνητικές γραμμές θα αλλάξουν φορά, όπως εύκολα μπορούμε να διαπιστώσουμε με τη βοήθεια της μαγνητικής βελόνας.



Σχήμα 3.2.3: Μαγνητικές γραμμές γύρω από ευθύγραμμο αγωγό

Η φορά των μαγνητικών γραμμών μπορεί να βρεθεί με τη βοήθεια του κανόνα του δεξιού χεριού. Συγκεκριμένα, αν φανταστούμε ότι πιάνουμε τον αγωγό με το δεξιό μας χέρι (Σχ. 3.2.4), έτσι που ο αντίχειρας να δείχνει τη φορά του ρεύματος, τότε τα άλλα δάκτυλα θα δείχνουν τη φορά των μαγνητικών γραμμών.



Σχήμα 3.2.4: Προσδιορισμός φοράς μαγνητικών γραμμών με τον κανόνα του δεξιού χεριού

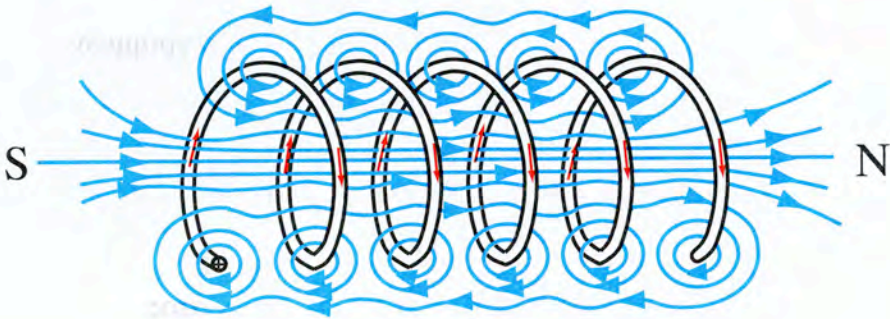
Αν θεωρήσουμε ότι ο ευθύγραμμος αγωγός έχει άπειρο μήκος, το μαγνητικό πεδίο που δείχνουν τα Σχήματα 3.2.2 και 3.2.3 επεκτείνεται κατά μήκος του αγωγού, έτσι που ουσιαστικά οι μαγνητικές γραμμές σχηματίζουν κυλινδρικούς σωλήνες με κοινό άξονα το ρευματοφόρο αγωγό.

Το μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου αγωγού είναι ισχυρότερο κοντά στον αγωγό και εξασθενεί, όσο απομακρυνόμαστε από τον αγωγό.

Όπως και στο πεδίο του ραβδόμορφου μαγνήτη (Σχ. 3.1.3), οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου που δημιουργεί ο ρευματοφόρος αγωγός είναι **κλειστές καμπύλες** δίχως αρχή και τέλος.

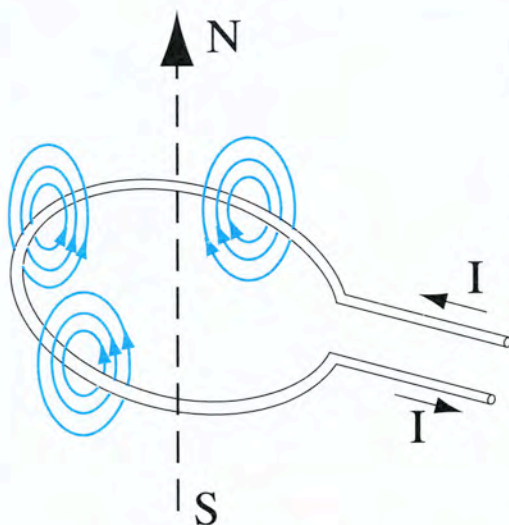
3.2.3. Μαγνητικό πεδίο πηνίου

Το μαγνητικό πεδίο, που δημιουργείται από το ηλεκτρικό ρεύμα, ενισχύεται, εάν τυλίξουμε ένα μονωμένο αγωγό γύρω από ένα κύλινδρο, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα σωληνοειδές πηνίο που αποτελείται από πολλές σπείρες, όπως στο Σχ. 3.2.5.



Σχήμα 3.2.5: Μαγνητικό πεδίο πηνίου

Κάθε σπείρα ισοδυναμεί με ένα μικρό μαγνήτη, του οποίου ο βόρειος και ο νότιος πόλος φαίνονται στο Σχ. 3.2.6. Στο εσωτερικό των σπειρών οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου έχουν την ίδια φορά για όλες τις σπείρες και έτσι το πεδίο ενισχύεται. Αντίθετα το μαγνητικό πεδίο, που δημιουργεί η κάθε σπείρα στο χώρο έξω από το πηνίο, τείνει να αναιρεθεί από αυτό που προκαλεί η διπλανή της (Σχ. 3.2.5). Έτσι το μαγνητικό πεδίο έξω από το πηνίο είναι ασθενέστερο, ενώ στο εσωτερικό περισσότερο ισχυρό. Στην εικόνα του Σχ.3.2.5 βλέπουμε ότι οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου που δημιουργεί το πηνίο είναι όμοιες με αυτές του ραβδόμορφου μαγνήτη, που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα.



Σχήμα 3.2.6: Μαγνητικό πεδίο σπείρας

Όπως είπαμε και στην περίπτωση του μόνιμου μαγνήτη, η εικόνα των μαγνητικών γραμμών μας δίνει μια εποπτική εικόνα του (αόρατου κατά τα άλλα) μαγνητικού πεδίου.

3.2.4. Μαγνητική Επαγωγή - Μαγνητική ροή

Το μέγεθος που εκφράζει την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου ονομάζεται **μαγνητική επαγωγή**. Η μαγνητική επαγωγή είναι διανυσματικό μέγεθος. Σε κάθε σημείο η διεύθυνση και η φορά της μαγνητικής επαγωγής συμπίπτει με την εφαπτομένη και τη φορά των μαγνητικών γραμμών.

Μονάδα της μαγνητικής επαγωγής που συμβολίζεται με το \vec{B} είναι το τέσλα (1T). Η μαγνητική επαγωγή B μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια ειδικού οργάνου που λέγεται **πεδίομετρο (μαγνητόμετρο)**.

Ένα άλλο μέγεθος του μαγνητικού πεδίου που συνδέεται, όπως θα δούμε, με τη μαγνητική επαγωγή είναι η **μαγνητική ροή**. Για να αντιληφθούμε την έννοια της μαγνητικής ροής ας φανταστούμε μια χοάνη, όπως αυτή του Σχ. 3.2.7,

η οποία περιβάλλεται, από παντού, από μαγνητικές γραμμές. Από τη χοάνη αυτή και συγκεκριμένα από όλες τις διατομές της S_1 , S_2 , S_3 , κτλ. διέρχεται η ίδια **μαγνητική ροή**. Θα θεωρήσουμε ότι οι διαστάσεις της χοάνης είναι πολύ μικρές, έτσι ώστε σε όλα τα σημεία των διατομών S_1 , S_2 , S_3 η μαγνητική επαγωγή να είναι σταθερή και ίση αντίστοιχα με B_1 , B_2 , B_3 .

Η μαγνητική ροή συμβολίζεται με το Φ και είναι ίση με το γινόμενο της μαγνητικής επαγωγής B επί το εμβαδόν της αντίστοιχης διατομής. Έτσι στο Σχ. 3.2.7:

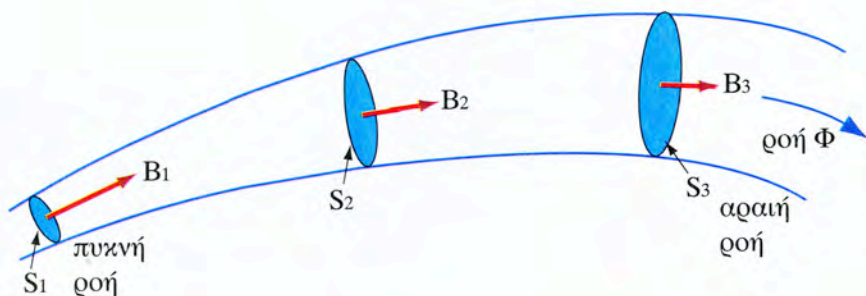
$$\Phi = S_1 B_1 = S_2 B_2 = S_3 B_3$$

Η μαγνητική ροή μετριέται σε **βέμπερ** (1Wb). Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις το βέμπερ συνδέεται με τη μονάδα της μαγνητικής επαγωγής. Είναι συγκεκριμένα:

$$1\text{Wb} = 1\text{T} \times 1\text{m}^2 = 1\text{Tm}^2$$

Αντίστοιχα το τέσλα γράφεται:

$$1\text{T} = 1\text{Wb}/\text{m}^2$$



Σχήμα 3.2.7: Ορισμός μαγνητικής ροής

Αφού από όλες τις διατομές του Σχ. 3.2.7 περνά η ίδια μαγνητική ροή Φ , στη διατομή S_1 (που είναι η μικρότερη) η μαγνητική επαγωγή θα είναι **μεγαλύτερη**. Συνεπώς στο σημείο που η μαγνητική επαγωγή είναι μεγαλύτερη, η μαγνητική ροή είναι **πυκνότερη**. Αντίστοιχα στη διατομή S_3 που είναι μεγαλύτερη, η μαγνητική ροή είναι περισσότερο **αραιή** και το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής είναι μικρότερο.

Συνεπώς:

□ Η μαγνητική επαγωγή εκφράζει την πυκνότητα της μαγνητικής ροής σε κάθε σημείο του πεδίου.

Αν θεωρήσουμε τη μαγνητική ροή σαν ένα μέγεθος αντίστοιχο με το ηλεκτρικό ρεύμα, η μαγνητική επαγωγή θα είναι αντίστοιχη της πυκνότητας του ρεύματος που είδαμε στην Ενότητα 1.2. Σε αντίθεση όμως με το ηλεκτρικό ρεύμα, στο μαγνητικό πεδίο η λέξη 'ροή' δεν αντιστοιχεί σε πραγματική κίνηση υλικών φορέων αντίστοιχων με τα ηλεκτρόνια.

Στο εσωτερικό του σωληνοειδούς πηνίου (Σχ. 3.2.5) το μαγνητικό πεδίο είναι **ομογενές** έχει δηλαδή παντού σταθερή πυκνότητα μαγνητικής ροής. Σε ένα τέτοιο ομογενές πεδίο, η μαγνητική ροή που περνά από μια διατομή δίνεται από το γινόμενο της μαγνητικής επαγωγής επί το εμβαδόν S της διατομής:

(3.2.1)

$$\Phi = B \cdot S$$

Αν παρατηρήσουμε τη γενική μορφή των πεδίων του ραβδόμορφου μαγνήτη (Σχ.3.1.3) και του πηνίου (Σχ. 3.2.5), διαπιστώνουμε ότι οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου μας δίνουν την εικόνα μιας συνολικής ροής, που εξέρχεται από το βόρειο πόλο του μαγνήτη ή του πηνίου και εισέρχεται στο νότιο πόλο. Δεδομένου όμως ότι οι μαγνητικές γραμμές συνεχίζονται και στο εσωτερικό του μαγνήτη ή του πηνίου, η μαγνητική ροή ακολουθεί μια **κλειστή διαδρομή**.

Έτσι, η μαγνητική ροή που εξέρχεται από το βόρειο πόλο του μαγνήτη είναι ίση με τη μαγνητική ροή που εισέρχεται στο νότιο πόλο. Η ροή αυτή ονομάζεται ροή **ανά πόλο** του μαγνήτη ή του πηνίου.

□ Το φυσικό μέγεθος που εκφράζει το μαγνητικό πεδίο ενός μαγνήτη ή ενός πηνίου είναι η μαγνητική ροή ανά πόλο.

Όπως είδαμε και παραπάνω, η μαγνητική ροή, όπως και το ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα κύκλωμα, ακολουθεί πάντα μια κλειστή διαδρομή. Αυτή η ιδιότητα μας έχει οδηγήσει να εισαγάγουμε σε αναλογία με τα ηλεκτρικά κυκλώματα τα **μαγνητικά κυκλώματα**, που θα εξετάσουμε παρακάτω. Σε αντίθεση όμως με το ηλεκτρικό ρεύμα δεν απαιτούνται ειδικοί αγωγοί, για να «κλείσει» ένα μαγνητικό κύκλωμα και να περάσει η μαγνητική ροή.

3.2.5. Μαγνητεγερτική δύναμη - Ένταση μαγνητικού πεδίου

Όπως είπαμε, το μαγνητικό πεδίο οφείλεται στο ηλεκτρικό ρεύμα, δηλαδή στην κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων. Για να εκφράσουμε την ιδιότητα του ηλεκτρικού ρεύματος να παράγει μαγνητικό πεδίο εισάγουμε το μέγεθος που ονομάζεται **μαγνητεγερτική δύναμη** ή συντομογραφικά **ΜΕΔ**. Θα συμβολίζουμε τη ΜΕΔ με το σύμβολο Θ .

Σε ένα πηνίο N σπειρών, όπως αυτό του Σχ. 3.2.5, η μαγνητεγερτική δύναμη Θ εκφράζεται από το γινόμενο του ρεύματος I που διαρρέει το πηνίο επί τον αριθμό των σπειρών N :

$$\Theta = N \cdot I \quad (3.2.2)$$

Η ΜΕΔ έχει προφανώς τις ίδιες διαστάσεις με το ρεύμα δεδομένου ότι ο αριθμός των σπειρών είναι αδιάστατος. Επειδή όμως θέλουμε να εκφράσουμε τη ΜΕΔ ως διαφορετικό μέγεθος από το ρεύμα, τη μετράμε με διαφορετικές μονάδες, που ονομάζονται *αμπερελίγματα* και συμβολίζονται με $A\text{-}\epsilon$.

> Παράδειγμα 1

Να υπολογιστεί η ΜΕΔ ενός πηνίου 100 σπειρών, που διαρρέεται από ρεύμα 5A.

Λύση

Με εφαρμογή του τύπου (3.2.2) έχουμε:

$$\Theta = NI = 100 \times 5A = 500 A\text{-}\epsilon$$

Απάντηση: Η μαγνητεγερτική δύναμη του πηνίου είναι 500 A-ε.

Το μέγεθος που περιγράφει την επίδραση της ΜΕΔ σε κάθε σημείο του χώρου ονομάζεται **ένταση μαγνητικού πεδίου**, συμβολίζεται με το \vec{H} και είναι διανυσματικό μέγεθος. Η διεύθυνση και η φορά της εντάσεως του μαγνητικού πεδίου δίνεται από τις μαγνητικές γραμμές. Κατά συνέπεια το διάνυσμα \vec{H} έχει την ίδια διεύθυνση και φορά με τη μαγνητική επαγωγή \vec{B} . Το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο εξαρτάται από τη ΜΕΔ που δημιουργεί το πεδίο καθώς και από τη γεωμετρία του μαγνητικού κυκλώματος.

Μονάδα της εντάσεως H του μαγνητικού πεδίου είναι το 1 A/m (αμπέρ ανά μέτρο). Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε τον όρο αμπερελίγματα ανά μέτρο (A-ε/m).

Τα διανύσματα \vec{H} και \vec{B} έχουν μεταξύ τους σχέση αιτίου (ηλεκτρικό ρεύμα, ΜΕΔ) και αποτελέσματος (μαγνητική επαγωγή, πυκνότητα μαγνητικής ροής).

□ ΜΕΔ (Θ), ένταση μαγνητικού πεδίου (H) → αιτία

□ Μαγνητική επαγωγή (B), μαγνητική ροή (Φ) → αποτέλεσμα

Η μαγνητική επαγωγή, δηλαδή η πυκνότητα μαγνητικής ροής (B), που θα προκαλέσει μια δεδομένη ένταση μαγνητικού πεδίου (H), εξαρτάται από το είδος του υλικού, μέσα στο οποίο αναπτύσσεται το μαγνητικό πεδίο. Σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό δημιουργείται πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής για την ίδια ένταση μαγνητικού πεδίου, απ' ό,τι σε ένα διαμαγνητικό υλικό, όπως π.χ. ο αέρας.

Αυτό εκφράζεται στην ακόλουθη σχέση, που συνδέει τα μέτρα των διανυσμάτων H και B :

$$B = \mu \cdot H \quad (3.2.3)$$

Η σταθερά μ εξαρτάται από το υλικό μέσα στο οποίο αναπτύσσεται το πεδίο και ονομάζεται **μαγνητική διαπερατότητα** του υλικού. Οι μονάδες της μαγνητικής διαπερατότητας προκύπτουν από τη σχέση 3.2.3 και είναι:

$$\frac{1\text{ T}}{1\text{ A/m}} = \frac{1\text{ Wb/m}^2}{1\text{ A/m}} = \frac{1\text{ Wb/A}}{1\text{ m}} = 1 \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

όπου η μονάδα $1\text{H}=1\text{Wb}/\text{A}$ ονομάζεται αντρί (Henry) και αντιστοιχεί, όπως θα δούμε παρακάτω στο μέγεθος που ονομάζεται συντελεστής αυτεπαγωγής.

Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού χώρου συμβολίζεται με το μ_0 και είναι πολύ μικρή. Συγκεκριμένα είναι ίση με:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

Την ίδια μαγνητική διαπερατότητα με το κενό έχουν, με πολύ καλή προσέγγιση, όλα τα διαμαγνητικά υλικά, όπως ο αέρας, το νερό κτλ. Αντίθετα τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν μαγνητική διαπερατότητα που είναι από 1000 έως και 80.000 φορές μεγαλύτερη από το μ_0 .

Συνεπώς το ίδιο πηνίο θα προκαλέσει πολύ μεγαλύτερη μαγνητική ροή σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, απ' ό,τι στον αέρα. Για το λόγο αυτό στην κατασκευή ηλεκτρομαγνητών και άλλων ηλεκτροτεχνικών συσκευών και μηχανών χρησιμοποιούνται **πυρήνες** από σιδηρομαγνητικά υλικά για την ενίσχυση του μαγνητικού πεδίου.

Λόγω του φαινομένου του μαγνητικού κορεσμού –το οποίο αναφέραμε παραπάνω– η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή. Πιο συγκεκριμένα, η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι πολύ μεγάλη για μικρές σχετικά εντάσεις μαγνητικού πεδίου, αλλά μειώνεται, λόγω κορεσμού, αν αυξηθεί πολύ η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Τη μεταβολή αυτή της μαγνητικής διαπερατότητας θα εξετάσουμε στην επόμενη ενότητα 3.3.

3.2.6. Νόμος του Αμπέρ. Υπολογισμός του H σε ευθύγραμμο αγωγό.

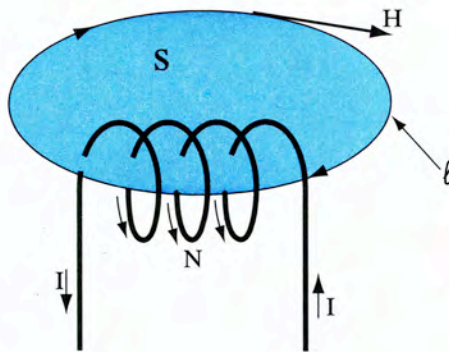
Ο νόμος του Αμπέρ μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με το ηλεκτρικό ρεύμα που την προκαλεί. Στο Σχ. 3.2.8 φαίνεται μια μαγνητική γραμμή μήκους ℓ που ανήκει στο μαγνητικό πεδίο ενός πηνίου N σπειρών, το οποίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα I .

Με τον όρο **διάρρευμα** εννοούμε το συνολικό ηλεκτρικό ρεύμα που διασχίζει την επιφάνεια S που ορίζει η κλειστή μαγνητική γραμμή. Στην περίπτωση του Σχ.3.2.8 το συνολικό αυτό ρεύμα ή διάρρευμα είναι ίσο με N φορές το I , αφού υπάρχουν N σπείρες που διασχίζουν την S και η κάθε σπείρα διαρρέεται από το ίδιο ρεύμα I .

Το διάρρευμα λοιπόν είναι ίσο με τη ΜΕΔ του πηνίου και για αυτό το λόγο θα το συμβολίσουμε με το ίδιο σύμβολο Θ :

$$\Theta = N \cdot I$$

Σε κάθε σημείο της μαγνητικής γραμμής του Σχ. 3.2.8 η ένταση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να έχει διαφορετική τιμή. Χωρίζοντας όμως τη μαγνητική γραμμή σε μικρά κομμάτια μπορούμε να θεωρήσουμε ότι στο καθένα η τιμή του H διατηρείται σταθερή. Ο μέσος όρος αυτών των τιμών του H μας δίνει τη μέση τιμή H_μ της εντάσεως του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος της μαγνητικής γραμμής.



Σχήμα 3.2.8: Ο νόμος του Αμπέρ

Σύμφωνα με το νόμο του Αμπέρ:

□ Το γινόμενο της μέσης τιμής H_μ της εντάσεως του μαγνητικού πεδίου πάνω σε μια μαγνητική γραμμή επί το μήκος ℓ της μαγνητικής γραμμής είναι ίσο με το διάρρευμα Θ .

Δηλαδή:

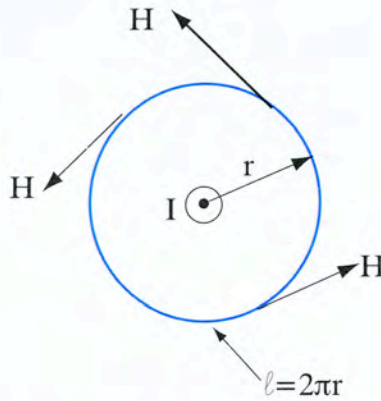
$$H_\mu \ell = N \cdot I = \Theta \quad (3.2.4)$$

Από τη σχέση (3.2.4) γίνεται αμέσως φανερό γιατί η ένταση του μαγνητικού πεδίου H έχει μονάδα της 1A/m ή $1\text{A}\cdot\text{ε}/\text{m}$.

Αν εφαρμόσουμε το νόμο του διαρρεύματος στο μαγνητικό πεδίο του ευθύγραμμου αγωγού (Σχ.3.2.3) μπορούμε να υπολογίσουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου που προκαλεί ο ρευματοφόρος αγωγός σε μια απόσταση r από τον αγωγό.

Πράγματι, όπως είδαμε παραπάνω, οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου του ευθύγραμμου αγωγού είναι κύκλοι. Στο Σχ. 3.2.9 φαίνεται μια τέτοια κυκλική μαγνητική γραμμή που απέχει απόσταση r από τον αγωγό. Το μήκος της μαγνητικής αυτής γραμμής είναι ως γνωστόν:

$$\ell = 2\pi \cdot r$$



Σχήμα 3.2.9: Μαγνητική γραμμή ευθύγραμμου αγωγού

Τα σύμβολα \odot και \otimes δείχνουν τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος κάθετα προς τη σελίδα. Συγκεκριμένα το σύμβολο \odot σημαίνει φορά ρεύματος προς τα έξω και το σύμβολο \otimes φορά του ρεύματος προς το μέσα μέρος της σελίδας. Είναι δηλαδή σαν να βλέπουμε την αιχμή ή τα φτερά ενός βέλους που δείχνει τη φορά του ρεύματος.

Λόγω της κυλινδρικής συμμετρίας, σε όλα τα σημεία της μαγνητικής γραμμής η ένταση του μαγνητικού πεδίου έχει το ίδιο μέτρο H . Συνεπώς και η μέση τιμή της εντάσεως του πεδίου H_μ είναι ίση με H . Ακόμα το διάρρευμα σε αυτή την περίπτωση είναι I , αφού ο αγωγός διασχίζει μία και μόνο φορά τον κυκλικό δίσκο που ορίζει η μαγνητική γραμμή ($N=1$). Έτσι αν

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r}$$

στη σχέση (3.2.4) προκύπτει:

$$(3.2.5)$$

Σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο (3.2.5) η ένταση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος που τον διαρρέει και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης από τον αγωγό.

➤ Παράδειγμα 2

Μια εναέρια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας διαρρέεται από συνεχές ρεύμα έντασης 1000 A. Ζητούνται η ένταση του μαγνητικού πεδίου και η μαγνητική επαγωγή σε απόσταση 50 μέτρων από τη γραμμή.

Λύση

Αντικαθιστώντας στον τύπο (3.2.5) $I=1000\text{A}$ και $r=50\text{m}$ προκύπτει απευθείας:

$$H = \frac{1000 \text{ A}}{100\pi \text{ m}} = \frac{10}{\pi} \frac{\text{A}}{\text{m}} = 3,2 \text{ A/m}$$

Η ένταση μαγνητικού πεδίου H που υπολογίσαμε, παράγει μια πυκνότητα μαγνητικής ροής B , που δίνεται από τη σχέση (3.2.3). Αφού βρισκόμαστε στον αέρα, η μαγνητική διαπερατότητα μ είναι κατά μεγάλη προσέγγιση αυτή του κενού χώρου μ_0 . Άρα με αντικατάσταση:

$$B = 4\pi \times 10^{-7} \times 10/\pi = 4 \times 10^{-6} \text{ T} = 4 \mu\text{T}$$

Απάντηση: Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι 3,2 A/m και η μαγνητική επαγωγή 4 μT .

Την τιμή αυτή της μαγνητικής επαγωγής μπορούμε να τη συγκρίνουμε με αυτή του γήινου μαγνητικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο της γης μεταβάλλεται με το γεωγραφικό πλάτος, αλλά και με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Σαν μια μέση τιμή της οριζόντιας συνιστώσας του γήινου μαγνητικού πεδίου –αυτή που προσανατολίζει τη μαγνητική βελόνα– μπορούμε να πάρουμε τα 18 μT .

Ανακεφαλαίωση

- Το μαγνητικό πεδίο οφείλεται στα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία.
- Το μαγνητικό πεδίο ενός πηνίου παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με αυτό ενός ραβδόμορφου μαγνήτη.
- Το μέγεθος που εκφράζει το μαγνητικό πεδίο ενός μαγνήτη είναι η μαγνητική ροή Φ ανά πόλο. Η μαγνητική ροή σχηματίζει πάντα κλειστή διαδρομή, που την αντιλαμβανόμαστε με τη βοήθεια των μαγνητικών γραμμών.
- Η μαγνητική επαγωγή B έχει τη διεύθυνση και φορά των μαγνητικών γραμμών. Το μέτρο της εκφράζει την πυκνότητα της μαγνητικής ροής.
- Η μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) ενός πηνίου είναι το γινόμενο του ρεύματος επί τον αριθμό των σπειρών του πηνίου.
- Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη της ΜΕΔ. Η ένταση H του μαγνητικού πεδίου προκαλεί μια μαγνητική επαγωγή B που εξαρτάται από τη μαγνητική διαπερατότητα μ του υλικού.
- Η μαγνητική διαπερατότητα είναι πολύ μεγάλη στα σιδηρομαγνητικά υλικά και πολύ μικρή στα διαμαγνητικά υλικά.
- Η ένταση του μαγνητικού πεδίου (και η μαγνητική επαγωγή), που προκαλεί ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός, είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος που τον διαρρέει και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης από τον αγωγό.

Πίνακας Συμβόλων και Μονάδων

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα
Μαγνητική επαγωγή	B	Τέσλα (1T)
Μαγνητική ροή	Φ	Βέμπερ (1Wb)
Μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ)	Θ	Αμπερελίγματα (A-ε)
Ένταση μαγνητικού πεδίου	H	Αμπέρ ανά μέτρο (1A/m)
Μαγνητική διαπερατότητα	μ	Ανρί ανά μέτρο (1H/m)

Ερωτήσεις

1. Περιγράψτε ένα πείραμα, με το οποίο να μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι ένας ρευματοφόρος αγωγός προκαλεί μαγνητικό πεδίο.
2. Σχεδιάστε ένα πηνίο διαρρεόμενο από ρεύμα και σημειώστε τους μαγνητικούς πόλους του πεδίου που σχηματίζεται.
3. Τι εκφράζει το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής;
4. Πότε ένα μαγνητικό πεδίο λέγεται ομογενές;
5. Αν διπλασιαστεί η ένταση του ρεύματος ενός πηνίου πόσο θα αλλάξει η μαγνητεγερτική του δύναμη;
6. Δύο πηνία διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα και έχουν διαφορετικό αριθμό σπειρών. Ποιο πηνίο έχει μεγαλύτερη ΜΕΔ;
7. Στη σχέση $B = \mu H$ ποιο είναι το αίτιο και ποιο το αποτέλεσμα; Τι εκφράζει το μ ;
8. Ποιο υλικό έχει μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα, ο σίδηρος ή το αλουμίνιο;
9. Γιατί είναι ευκολότερο να δημιουργήσουμε ένα μαγνητικό πεδίο στο σίδηρο παρά στον αέρα;
10. Σε ποιο σημείο εμφανίζεται μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής; Σε απόσταση 1m ή σε απόσταση 10m από μια γραμμή που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα;
11. Αν διπλασιαστεί η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει έναν αγωγό, πόσο θα αλλάξει η μαγνητική επαγωγή που προκαλεί σε κάποιο σημείο;

Ασκήσεις

1. Ένα πηνίο που διαρρέεται από ρεύμα έχει κυκλική διατομή με διάμετρο 2cm. Η μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό του πηνίου είναι 0,2 T. Να υπολογιστεί η μαγνητική ροή Φ .

$$\text{Απ. } 6,28 \times 10^{-5} \text{ Wb}$$

2. Το εσωτερικό ενός πηνίου με κυκλική διατομή ακτίνας 1 cm αποτελείται από σιδηρομαγνητικό υλικό μαγνητικής διαπερατότητας $\mu=0,01$ H/m. Όταν το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα, αναπτύσσεται στο εσωτερικό του ένταση μαγνητικού πεδίου 100 A/m. Να υπολογιστούν η μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό του πηνίου και η μαγνητική ροή του πεδίου.

$$\text{Απ. } B=1\text{T}, \Phi=3,14 \times 10^{-4} \text{Wb}$$

3. Σε ένα σιδερένιο πυρήνα με κυκλική διατομή διαμέτρου 10 cm και μαγνητική διαπερατότητα 0,02 H/m αναπτύσσεται ομογενές μαγνητικό πεδίο με μαγνητική ροή 0,00314 Wb. Να υπολογιστούν η μαγνητική επαγωγή και η ένταση του μαγνητικού πεδίου στον πυρήνα.

$$\text{Απ. } B=0,4\text{T}, H=20\text{A/m}$$

4. Η περιέλιξη ενός ηλεκτρικού κινητήρα πρέπει να αναπτύσσει ΜΕΔ ίση με 2000 A-ε. Ο αγωγός που θα χρησιμοποιηθεί επιτρέπει ένταση ρεύματος μέχρι 5 A. Πόσα ελίγματα (σπείρες) τουλάχιστον πρέπει να έχει η περιέλιξη;

$$\text{Απ: } 400$$

5. Ένας ευθύγραμμος αγωγός μεγάλου μήκους διαρρέεται από ρεύμα 628 A. Να υπολογιστεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε απόσταση 1 m από τον αγωγό.

$$\text{Απ: } H=100 \text{ A/m}$$

6. Σε μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας η μέγιστη ένταση ρεύματος είναι 1500 A. Εάν θέλουμε η μαγνητική επαγωγή να μην ξεπερνά τα 5μT πόση απόσταση πρέπει να κρατήσουμε από τη γραμμή;

$$\text{Απ: } 60 \text{ m}$$

Ενότητα 3.3

Μαγνητικά κυκλώματα – Μαγνητική αντίσταση

“Διδακτικοί στόχοι”

Με τη μελέτη της ενότητας αυτής οι μαθητές θα είναι σε θέση:

- να γνωρίζουν τι ονομάζεται μαγνητικό κύκλωμα και ποια είναι η αναλογία του με τα ηλεκτρικά κυκλώματα.
- να γνωρίζουν τι είναι η μαγνητική αντίσταση και να την υπολογίζουν.
- να γνωρίζουν τι είναι η καμπύλη μαγνητίσεως των σιδηρομαγνητικών υλικών.
- να γνωρίζουν τι ονομάζουμε μαγνητική υστέρηση.

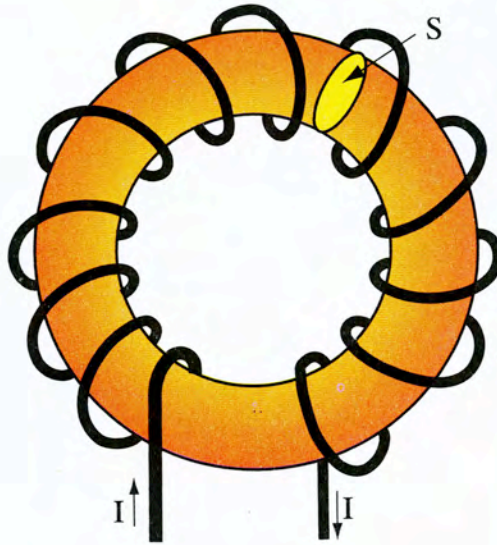
3.3.1. Μαγνητικό κύκλωμα δακτυλίου

Όπως είδαμε μέχρι τώρα, η μαγνητική ροή σε οποιοδήποτε μαγνητικό πεδίο διαγράφει πάντα μια κλειστή διαδρομή. Στις περισσότερες ηλεκτροτεχνικές συσκευές φροντίζουμε, ώστε η μαγνητική ροή να περνά στο μεγαλύτερο μέρος αυτής της κλειστής διαδρομής μέσα από σιδηρομαγνητικό υλικό. Ορίζεται έτσι ένα **μαγνητικό κύκλωμα**.

Τέτοιες εφαρμογές, όπου χρησιμοποιείται μαγνητικό πεδίο είναι οι ηλεκτρονόμοι (ρελέ), οι μετασχηματιστές, οι ηλεκτρικές μηχανές κτλ. Ένα μαγνητικό κύκλωμα αποτελείται συνήθως στο μεγαλύτερο μέρος του από μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά που διευκολύνουν την ανάπτυξη ισχυρής μαγνητικής επαγωγής – και άρα μαγνητικής ροής – με σχετικά μικρές εντάσεις ρεύματος. Το μέρος του μαγνητικού κυκλώματος που αποτελείται από σιδηρομαγνητικό υλικό ονομάζεται **πυρήνας** του μαγνητικού κυκλώματος και παίζει κατά κάποιο τρόπο το ρόλο που παίζουν οι αγωγοί στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Η μεγάλη διαφορά όμως από τα ηλεκτρικά κυκλώματα είναι ότι το μαγνητικό κύκλωμα δεν ‘διακόπτεται’ όταν στο δρόμο της μαγνητικής ροής περιλαμβάνονται και διαμαγνητικά υλικά. Για παράδειγμα σε όλες τις ηλεκτρικές μηχανές υπάρχουν **διάκενα αέρος**.

Ένα μαγνητικό κύκλωμα περιλαμβάνει απαραίτητα ένα τουλάχιστον **ηλεκτρικό τύλιγμα** (πηνίο) το οποίο προκαλεί την απαραίτητη ΜΕΔ για να αναπτυχθεί το μαγνητικό πεδίο.

Στο Σχ. 3.3.1 φαίνεται ένα μαγνητικό κύκλωμα που αποτελείται από έναν κυκλικό δακτύλιο μήκους l και διατομής S , κατασκευασμένον από σιδηρομαγνητικό υλικό μαγνητικής διαπερατότητας μ . Γύρω από το δακτύλιο έχουμε τυλίξει έναν αγωγό που σχηματίζει πηνίο με N σπείρες και διαρρέεται από συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα I .



Σχήμα 3.3.1: Μαγνητικό κύκλωμα δακτυλίου

Λόγω της συμμετρίας του δακτυλίου θεωρούμε ότι παντού στο εσωτερικό του η ένταση του μαγνητικού πεδίου έχει το ίδιο μέτρο H . Θεωρούμε επίσης ότι δεν προκαλείται μαγνητικό πεδίο έξω από το δακτύλιο.

Από το νόμο του διαρρεύματος (3.2.4) κατά μήκος μιας μαγνητικής γραμμής στο εσωτερικό του δακτυλίου μπορούμε εύκολα να βρούμε ότι η ένταση μαγνητικού πεδίου H δίνεται από τη σχέση:

$$H = \frac{N \cdot I}{\ell} = \frac{\Theta}{\ell}$$

Από την ένταση του μαγνητικού πεδίου H προκύπτει μέσω της σχέσεως (3.2.3) η μαγνητική επαγωγή B :

$$B = \mu \cdot H = \frac{\mu \cdot \Theta}{\ell}$$

Αν θεωρήσουμε ότι κατά προσέγγιση στο εσωτερικό του δακτυλίου το μαγνητικό πεδίο είναι ομογενές (δηλαδή ότι η πυκνότητα της μαγνητικής ροής που δίνεται από το B είναι σταθερή σε όλα τα σημεία της διατομής S), μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον τύπο (3.2.1) της προηγούμενης ενότητας για να υπολογίσουμε τη μαγνητική ροή Φ που περνάει από το δακτύλιο:

$$\Phi = B \cdot S = \Theta \frac{\mu S}{\ell}$$

Παρατηρούμε πως η μαγνητική ροή (Φ) είναι ανάλογη της ΜΕΔ (Θ). Είναι επίσης αντιστρόφως ανάλογη της ποσότητας:

$$R_m = \frac{\ell}{\mu \cdot S} \quad (3.3.1)$$

η οποία ονομάζεται **μαγνητική αντίσταση**. Σε αντιστοιχία με την ηλεκτρική αντίσταση:

□ Η μαγνητική αντίσταση εκφράζει τη δυσκολία να αναπτυχθεί μαγνητική ροή σε ένα μαγνητικό κύκλωμα.

Από τη σχέση (3.3.1) βλέπουμε ότι η μαγνητική αντίσταση εξαρτάται από το υλικό του μαγνητικού κυκλώματος (και συγκεκριμένα από τη μαγνητική διαπερατότητα μ) και τις διαστάσεις του (μήκος ℓ και διατομή S). Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η μαγνητική διαπερατότητα μ τόσο μικρότερη γίνεται η μαγνητική αντίσταση R_m . Αφού λοιπόν τα διαμαγνητικά υλικά έχουν πολύ μικρότερη μαγνητική διαπερατότητα από τα σιδηρομαγνητικά υλικά:

□ Τα σιδηρομαγνητικά υλικά εμφανίζουν πολύ μικρότερη μαγνητική αντίσταση από τα διαμαγνητικά υλικά.

Επίσης η μαγνητική αντίσταση αυξάνει, όσο μεγαλύτερο γίνεται το μήκος του μαγνητικού κυκλώματος (δηλαδή, όσο περισσότερο δρόμο έχει να διανύσει η μαγνητική ροή) και ελαττώνεται αν αυξηθεί το εμβαδόν της διατομής του μαγνητικού κυκλώματος.

Αν θυμηθούμε τον τύπο (2.1.4) που δίνει την ηλεκτρική αντίσταση συναρτήσει της ειδικής αντίστασης ενός αγωγού, θα διαπιστώσουμε μια πλήρη αντιστοιχία με τη σχέση (3.3.1). Η αντιστοιχία αυτή μας βοηθάει να αναλύσουμε ένα μαγνητικό κύκλωμα με τη βοήθεια αυτών που ξέρουμε για τα ηλεκτρικά κυκλώματα.

Θα πρέπει όμως να προσέξουμε ότι η μαγνητική αντίσταση είναι διαφορετικό φυσικό μέγεθος από την ηλεκτρική αντίσταση. Έτσι, η μαγνητική αντίσταση μετρείται σε αμπερελίγματα ανά βέμπερ (A-ε/Wb). Αν χρησιμοποιήσουμε τον ορισμό της μονάδας ανρί που δώσαμε παραπάνω, τότε:

$$1 \frac{\text{A} \cdot \varepsilon}{\text{Wb}} = 1 \frac{1}{\text{H}} = 1 \text{ H}^{-1}$$

Δηλαδή η μονάδα της μαγνητικής αντίστασης είναι το αντίστροφο του ανρί.

Με τη βοήθεια της μαγνητικής αντίστασης μπορούμε να γράψουμε τη σχέση που μας δίνει τη μαγνητική ροή με ένα τρόπο που θυμίζει το νόμο του Ωμ:

$$\Phi = \frac{\Theta}{R_m} \quad (3.3.2)$$

Δηλαδή η μαγνητική ροή είναι ανάλογη της ΜΕΔ που ασκείται και αντίστροφως ανάλογη της μαγνητικής αντίστασης R_m . Η σχέση (3.3.2) αναφέρεται από ορισμένους ως **τύπος του Hopkinson**.

> Παράδειγμα 1

Ένα μαγνητικό κύκλωμα αποτελείται από ένα κυκλικό δακτύλιο (Σχ.3.3.1) από σιδηρομαγνητικό υλικό με μαγνητική διαπερατότητα $\mu = 125 \times 10^{-4} \text{ H/m}$. Το μήκος του δακτυλίου είναι 100 cm και η διατομή του 2 cm². Πόσα αμπερελίγματα (ΜΕΔ) απαιτούνται, ώστε η μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό του δακτυλίου να είναι 1T;

Σημ: Το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του δακτυλίου θεωρείται ομογενές.

Λύση

Αφού το πεδίο θεωρείται ομογενές η μαγνητική ροή θα είναι το γινόμενο της μαγνητικής επαγωγής επί τη διατομή:

$$\Phi = B \cdot S = 1\text{T} \times 2 \times 10^{-4} \text{m}^2 = 2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

Η μαγνητική αντίσταση δίνεται από τη σχέση (3.3.1):

$$R_m = \frac{\ell}{\mu \cdot S} = \frac{1\text{m}}{(125 \times 10^{-4} \text{H/m})(2 \times 10^{-4} \text{m}^2)} = 400000 \text{H}^{-1} = 4 \times 10^5 \text{ A}\cdot\epsilon/\text{Wb}$$

Χρησιμοποιώντας τώρα τον τύπο (3.3.2) λύνουμε ως προς την άγνωστη ΜΕΔ:

$$\Theta = \Phi \cdot R_m = (2 \times 10^{-4} \text{ Wb})(4 \times 10^5 \text{ A}\cdot\epsilon/\text{Wb}) = 80 \text{ A}\cdot\epsilon$$

Απάντηση: Απαιτείται μαγνητεγερτική δύναμη 80 A·ε.

> Παράδειγμα 2

Στο μαγνητικό κύκλωμα του προηγούμενου παραδείγματος το ηλεκτρικό τύλιγμα γύρω από το δακτύλιο έχει 100 σπείρες και διαρρέεται από συνεχές ρεύμα 1 A. Να υπολογιστεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο δακτύλιο.

Λύση

Στο παράδειγμα αυτό μπορούμε να ακολουθήσουμε δύο δρόμους:

α) Εφαρμόζουμε το νόμο του διαρρεύματος κατά μήκος μιας μαγνητικής γραμμής:

$$H \cdot \ell = \Theta = N \cdot I$$

Οπότε:

$$H = \frac{N \cdot I}{\ell} = \frac{100A - \varepsilon}{1m} = 100 \text{ A}\cdot\text{ε}/\text{m} \text{ ή } 100 \text{ A}/\text{m}$$

β) Από τον τύπο (3.3.2) υπολογίζουμε πρώτα τη μαγνητική ροή:

$$\Phi = \frac{\Theta}{R_m} = \frac{100A - \varepsilon}{4 \times 10^5 \text{ A} - \varepsilon / \text{Wb}} = 25 \times 10^{-5} \text{ Wb}$$

Στη συνέχεια βρίσκουμε την πυκνότητα της μαγνητικής ροής, δηλαδή τη μαγνητική επαγωγή:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{25 \times 10^{-5} \text{ Wb}}{2 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1,25 \text{ T}$$

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου βρίσκεται τώρα από τον τύπο της μαγνητικής διαπερατότητας (3.2.3):

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{1,25\text{T}}{125 \times 10^{-4} \text{ H}/\text{m}} = 100 \text{ A}/\text{m}$$

Απάντηση: Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι 100 A/m.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι για τα σιδηρομαγνητικά υλικά η μαγνητική αντίσταση δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται (όπως και η μαγνητική διαπερατότητα) με την αύξηση της μαγνητικής ροής λόγω της εμφάνισης του φαινομένου του κορεσμού. Συγκεκριμένα:

□ Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, όσο αυξάνει η μαγνητική ροή αυξάνει και η δυσκολία να μαγνητίσουμε περισσότερο το υλικό, δηλαδή η μαγνητική αντίσταση.

Έτσι η αναλογία μεταξύ ΜΕΔ και μαγνητικής ροής που εμφανίζεται στον τύπο (3.3.2) ισχύει για τα σιδηρομαγνητικά υλικά μόνο κατά προσέγγιση.

Ο πίνακας 3.3.1 δείχνει τις αντιστοιχίες μεταξύ των ποσοτήτων που εμφανίζονται στα ηλεκτρικά και στα μαγνητικά κυκλώματα.

Πίνακας 3.3.1: Αναλογία ηλεκτρικών και μαγνητικών κυκλωμάτων

Ηλεκτρικό κύκλωμα	Μαγνητικό κύκλωμα
Ρεύμα I (A)	Μαγνητική ροή Φ (Wb)
ΗΕΔ E (V)	ΜΕΔ Θ (A-ε)
Αντίσταση R (Ω)	Μαγνητική αντίσταση R_m (A-ε/Wb= H^{-1})
Ειδική αγωγιμότητα κ	Μαγνητική διαπερατότητα μ

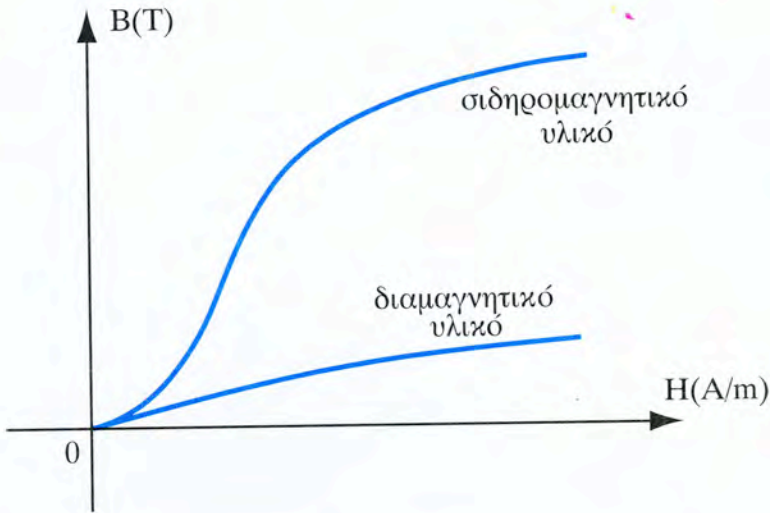
Οι μαγνητικές αντιστάσεις σε ένα μαγνητικό κύκλωμα συνδέονται με τρόπο ανάλογο με τα ηλεκτρικά κυκλώματα. Έτσι μπορούμε να συνθέτουμε τις αντιστάσεις ενός μαγνητικού κυκλώματος, ώστε να πάρουμε στο τέλος μια ισοδύναμη μαγνητική αντίσταση. Συγκεκριμένα, όταν δύο μαγνητικές αντιστάσεις διαρρέονται από την ίδια μαγνητική ροή, συνδέονται **σε σειρά**, ενώ όταν έχουν στα άκρα τους την ίδια ΜΕΔ συνδέονται **παράλληλα**. Οι τύποι για τη σύνδεση μαγνητικών αντιστάσεων σε σειρά ή παράλληλα είναι ακριβώς ίδιοι με αυτούς που είδαμε για τα ηλεκτρικά κυκλώματα στην Ενότητα 2.2.

3.3.2. Καμπύλες μαγνητίσεως - μαγνητική υστέρηση

Αναφερθήκαμε προηγουμένως στη μεταβαλλόμενη σχέση μεταξύ εντάσεως μαγνητικού πεδίου και πυκνότητας μαγνητικής ροής, όταν έχουμε σιδηρομαγνητικά υλικά.

Η **καμπύλη μαγνητίσεως** (Σχ. 3.3.2) είναι ένα διάγραμμα με άξονες την ένταση του μαγνητικού πεδίου H (στον οριζόντιο άξονα) και τη μαγνητική επαγωγή B (στον κατακόρυφο), το οποίο δείχνει πώς αυξάνει η μαγνητική επαγωγή – άρα και η πυκνότητα της μαγνητικής ροής – όταν μαγνητίζεται ένα υλικό, δηλαδή, όταν σε αυτό επιδρά μια αυξανόμενη ένταση μαγνητικού πεδίου.

Στο Σχ. 3.3.2 φαίνεται η καμπύλη μαγνητίσεως ενός σιδηρομαγνητικού και ενός διαμαγνητικού υλικού.



Σχήμα 3.3.2 Καμπύλες μαγνητίσεως σιδηρομαγνητικού και διαμαγνητικού υλικού.

Ας παρατηρήσουμε πρώτα την καμπύλη μαγνητίσεως του σιδηρομαγνητικού υλικού. Υποθέτουμε ότι αρχικά το υλικό είναι αμαγνήτιστο ($B=0$) και δεν επιδρά επάνω του μαγνητικό πεδίο ($H=0$). Στη συνέχεια μαγνητίζουμε το υλικό επιβάλλοντας ένα μαγνητικό πεδίο αυξανόμενης εντάσεως H . Θα μπορούσαμε, για παράδειγμα, να πλησιάσουμε στο υλικό μας σιγά-σιγά ένα μόνιμο μαγνήτη. Πιο απλά μπορούμε να τυλίξουμε γύρω του ένα ηλεκτρικό πηνίο, στο οποίο να οδηγούμε ένα συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα αυξανόμενο με πολύ αργό ρυθμό.

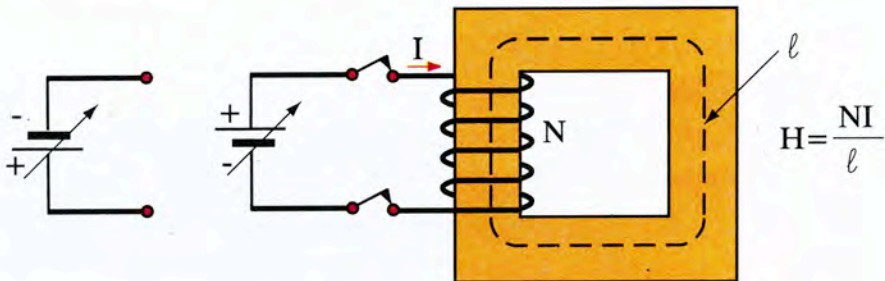
Όπως φαίνεται στο Σχ.3.3.2, όταν αρχίσει να επιβάλλεται στο σιδηρομαγνητικό υλικό μια αυξανόμενη ένταση μαγνητικού πεδίου αρχίζει να αυξάνει με μεγάλο αρχικά ρυθμό η μαγνητική επαγωγή. Όταν όμως η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξηθεί μετά από ένα ορισμένο σημείο, ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνει η μαγνητική επαγωγή αρχίζει να μειώνεται. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται, όπως είπαμε παραπάνω, στο μαγνητικό **κορεσμό**.

Στο Σχ. 3.3.2 φαίνεται επίσης η καμπύλη μαγνητίσεως ενός διαμαγνητικού υλικού. Παρατηρούμε πως η κλίση αυτής της καμπύλης είναι πολύ μικρότερη από αυτήν του σιδηρομαγνητικού υλικού. Δηλαδή παίρνουμε πολύ μικρότερη

μαγνητική ροή με την ίδια ένταση μαγνητικού πεδίου από αυτήν που θα πέρασε σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό. Παρατηρούμε επίσης ότι η κλίση της καμπύλης μαγνητίσεως του διαμαγνητικού υλικού είναι σταθερή, δηλαδή με άλλα λόγια η «καμπύλη» αυτή είναι μια ευθεία γραμμή.

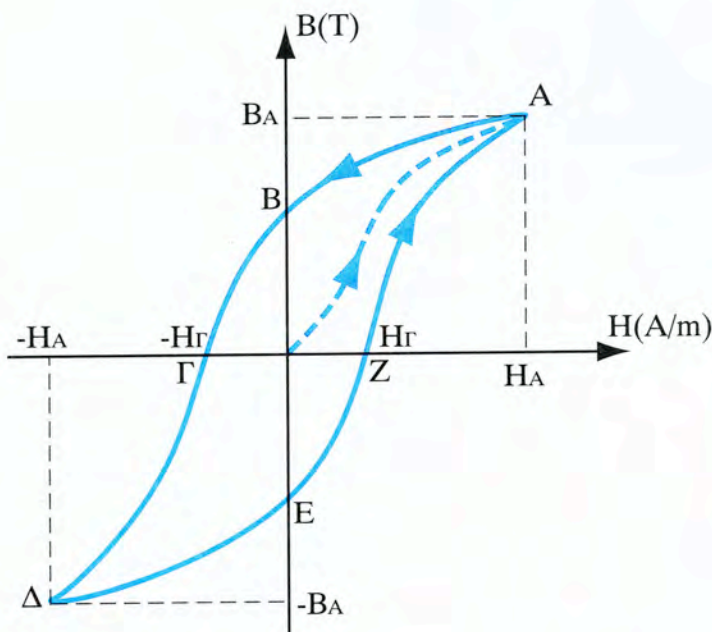
Τα διαμαγνητικά υλικά εμφανίζουν λοιπόν **γραμμική** μαγνητική συμπεριφορά, ενώ τα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι **μη γραμμικά**. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά εμφανίζουν επίσης μια άλλη ιδιότητα, που δεν έχουν τα διαμαγνητικά υλικά. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται **μαγνητική υστέρηση** και σχετίζεται με τη συμπεριφορά των σιδηρομαγνητικών υλικών, όταν προσπαθούμε να τα απομαγνητίσουμε, αφού έχουν πρώτα μαγνητιστεί.

Για να περιγράψουμε το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης θα θεωρήσουμε ότι έχουμε έναν πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό, τον οποίο υποβάλλουμε σε μια μεταβαλλόμενη ένταση μαγνητικού πεδίου αυξο-μειώνοντας το ρεύμα του ηλεκτρικού τυλίγματος (Σχ. 3.3.3).



Σχήμα 3.3.3: Διάταξη για την περιγραφή του βρόχου υστέρησης

Θεωρούμε ότι ο πυρήνας είναι αρχικά αμαγνήτιστος. Αυξάνουμε σιγά-σιγά την ένταση του ρεύματος – και άρα του μαγνητικού πεδίου – αρχίζοντας από το μηδέν. Φυσικά η μαγνητική επαγωγή θα μεταβληθεί σύμφωνα με την καμπύλη μαγνητίσεως που έχουμε ήδη εξετάσει και φαίνεται στο Σχ. 3.3.4 με διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 3.3.4: Βρόχος υστερήσεως σιδηρομαγνητικού υλικού

Όταν φτάσουμε στην ένταση που αντιστοιχεί στο σημείο A σταματάμε να αυξάνουμε την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου και αρχίζουμε αντίθετα να τη μειώνουμε. Μόλις συμβεί αυτό, η μαγνητική επαγωγή θα αρχίσει να μειώνεται από την τιμή B_A που είχε στο σημείο A. Καθώς όμως μειώνουμε το H παρατηρούμε ότι η μαγνητική επαγωγή είναι μεγαλύτερη από ότι ήταν για την ίδια τιμή του H προηγουμένως, όταν αυξάναμε το H. Αυτό συμβαίνει γιατί οι στοιχειώδεις μαγνήτες του σιδηρομαγνητικού υλικού έχουν ήδη προσανατολιστεί προς μια ορισμένη φορά και έχουν την τάση να παραμείνουν προσανατολισμένοι, παρά το γεγονός ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου μειώθηκε.

Συνεχίζουμε να μειώνουμε την τιμή του H μέχρι να φτάσουμε στο σημείο B του Σχ. 3.3.4, όπου η ένταση του μαγνητικού πεδίου μηδενίζεται. Παρατηρούμε τώρα ότι και χωρίς να έχουμε ένταση μαγνητικού πεδίου εξακολουθεί να υπάρχει μια ορισμένη πυκνότητα μαγνητικής ροής. Αυτός είναι ο παραμένων μαγνητισμός. Το υλικό δηλαδή συμπεριφέρεται τώρα σαν μόνιμος

μαγνήτης. Αν είναι σκληρό σιδηρομαγνητικό υλικό θα κρατήσει το μαγνητισμό αυτό για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αν όμως είναι μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό σύντομα θα απομαγνητιστεί.

Συνεχίζουμε το πείραμά μας ως εξής. Αντιστρέφουμε την πολικότητα της πηγής συνεχούς ρεύματος και αρχίζουμε να οδηγούμε αργά-αργά ηλεκτρικό ρεύμα με αντίθετη φορά. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου θα γίνει τώρα αρνητική. Η αρνητική αυτή ένταση θα μειώσει σταδιακά τον παραμένοντα μαγνητισμό και όταν φτάσουμε στο σημείο Γ όπου $H = -H_T$, η μαγνητική ροή θα μηδενιστεί. Η ένταση μαγνητικού πεδίου που απαιτείται για να απομαγνητιστεί τελείως ένα μαγνητισμένο υλικό ονομάζεται **ένταση επαναφοράς**.

Συνεχίζουμε να αυξάνουμε το αρνητικό ρεύμα μέχρις ότου η ένταση του μαγνητικού πεδίου γίνει ίση με $-H_A$ στο σημείο Δ. Στο σημείο αυτό έχουμε την ίδια ένταση και μαγνητική επαγωγή όπως και στο σημείο Α, αλλά με αντίθετη φορά. Από το σημείο αυτό αρχίζουμε να μειώνουμε την αρνητική ένταση του μαγνητικού πεδίου μέχρι να τη μηδενίσουμε στο σημείο Ε.

Παρατηρούμε ότι τώρα έχουμε ένα παραμένοντα μαγνητισμό κατά την αντίθετη φορά από ό,τι προηγουμένως. Για να τον εξαλείψουμε αλλάζουμε πάλι την πολικότητα της πηγής και αρχίζουμε να παράγουμε μίαν αυξανόμενη θετική ένταση μαγνητικού πεδίου. Στο σημείο Ζ ο παραμένων αρνητικός μαγνητισμός μηδενίζεται και από εκεί και πέρα δημιουργείται πάλι μαγνητική ροή κατά τη θετική φορά μέχρι να ξαναφτάσουμε στο σημείο Α.

Παρατηρούμε ότι καθώς αυξομειώσαμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου αλλάζοντας δυο φορές την πολικότητα της ηλεκτρικής πηγής και άρα τη φορά του μαγνητικού πεδίου, διαγράψαμε στο διάγραμμα $H-B$ μια κλειστή καμπύλη, η οποία ονομάζεται **βρόχος υστερήσεως**. Ο βρόχος υστερήσεως είναι χαρακτηριστικό του σιδηρομαγνητικού υλικού και το εμβαδόν του είναι ανάλογο των **απωλειών υστερήσεως**, δηλαδή της ενέργειας που χάνεται με μορφή θερμότητας, όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου κάνει ένα πλήρη κύκλο, όπως τον περιγράψαμε παραπάνω.

Ανακεφαλαίωση

- Ένα μαγνητικό κύκλωμα αποτελείται από ένα πυρήνα σιδηρομαγνητικού υλικού στον οποίο μπορεί να παρεμβάλλονται διάκενα με αέρα ή άλλο διαμαγνητικό υλικό.
- Το μαγνητικό κύκλωμα διεγείρεται από ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά τυλίγματα (πηνία), τα οποία εξασφαλίζουν την απαραίτητη ΜΕΔ, για να εγκατασταθεί στο μαγνητικό κύκλωμα μαγνητική ροή.
- Η μαγνητική αντίσταση εκφράζει τη δυσκολία να εγκατασταθεί στο μαγνητικό κύκλωμα μαγνητική ροή και εξαρτάται από τις διαστάσεις και το υλικό του μαγνητικού κυκλώματος.
- Σε αναλογία με το νόμο του Ω για το ηλεκτρικό ρεύμα, η μαγνητική ροή δίνεται από το λόγο της επιβαλλόμενης ΜΕΔ προς τη μαγνητική αντίσταση.
- Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, η μαγνητική αντίσταση αυξάνει όσο περισσότερο μαγνητίζονται. Αυτό εκφράζεται γραφικά σε άξονες εντάσεως $H-B$ από την καμπύλη μαγνητίσεως.
- Η μαγνητική υστέρηση εκφράζει την «απροθυμία» του σιδηρομαγνητικού υλικού να απομαγνητιστεί όταν είναι μαγνητισμένο. Σε διάγραμμα $H-B$ το φαινόμενο της υστερήσεως χαρακτηρίζεται από το βρόχο υστερήσεως.

Πίνακας Συμβόλων και Μονάδων

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα
Μαγνητική αντίσταση	R_m	Αμπερελίγματα ανά βέμπερ ($A\text{-}\epsilon/Wb$) ή H^{-1}

Ερωτήσεις

1. Ποια υλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερη μαγνητική αντίσταση, τα διαμαγνητικά ή τα σιδηρομαγνητικά;
2. Γιατί χρησιμοποιούμε στους μετασχηματιστές σιδερένιο πυρήνα;

3. Αν σε ένα σιδερένιο πυρήνα παρεμβάλουμε ένα διαμαγνητικό υλικό (π.χ. ένα διάκενο αέρα), η μαγνητική αντίσταση θα αυξηθεί ή θα ελαττωθεί και γιατί;
4. Αν αυξηθεί η διατομή ενός μαγνητικού κυκλώματος, η μαγνητική του αντίσταση θα αυξηθεί ή θα ελαττωθεί και γιατί;
5. Αν αυξηθεί το μήκος ενός μαγνητικού κυκλώματος, η μαγνητική του αντίσταση θα αυξηθεί ή θα ελαττωθεί και γιατί;
6. Αν σε ένα δεδομένο μαγνητικό κύκλωμα αυξηθούν οι σπείρες του ηλεκτρικού τυλίγματος, που το διεγείρει, χρειάζεται περισσότερο ή λιγότερο ρεύμα για να αναπτυχθεί η ίδια μαγνητική ροή; Αιτιολογήστε την απάντησή σας.
7. Ποια υλικά παρουσιάζουν μαγνητική υστέρηση και πού οφείλεται αυτή;
8. Ποια υλικά εμφανίζουν μαγνητικό κορεσμό και ποια έχουν σταθερή μαγνητική αντίσταση;

Ασκήσεις

1. Ένα μαγνητικό κύκλωμα έχει μήκος 50 cm και διατομή 2 cm² και αποτελείται από υλικό με μαγνητική διαπερατότητα 0,005 H/m. Το μαγνητικό κύκλωμα διεγείρεται από ηλεκτρικό πηνίο που μπορεί να αντέξει ένταση ρεύματος μέχρι 1 A. Πόσες σπείρες τουλάχιστον πρέπει να έχει το τυλίγμα για να δημιουργήσει μαγνητική επαγωγή 1 T; Πόση είναι η μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος;

$$\text{Απ: } N=100, R_m=5 \times 10^5 \text{H}^{-1}$$

2. Το μαγνητικό κύκλωμα της προηγούμενης άσκησης διεγείρεται από ένα πηνίο με 200 σπείρες. Να υπολογιστεί η μαγνητική ροή και η μαγνητική επαγωγή, όταν το ρεύμα του πηνίου είναι 1,5 A.

*

$$\text{Απ: } \Phi=6 \times 10^{-4} \text{Wb}, B=3 \text{T}$$

3. Ένα μαγνητικό κύκλωμα πρέπει να έχει μήκος 50 cm και αποτελείται από σιδηρομαγνητικό υλικό με μαγνητική διαπερατότητα 0,001 H/m. Η μέγιστη διαθέσιμη ΜΕΔ είναι 200 A·ε. Ποια η ελάχιστη διατομή που πρέπει να έχει το μαγνητικό κύκλωμα, για να μπορεί να αναπτύξει μαγνητική ροή 1x10⁻⁴Wb;

$$\text{Απ: } 2,5 \text{ cm}^2$$

Ενότητα 3.4

Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή

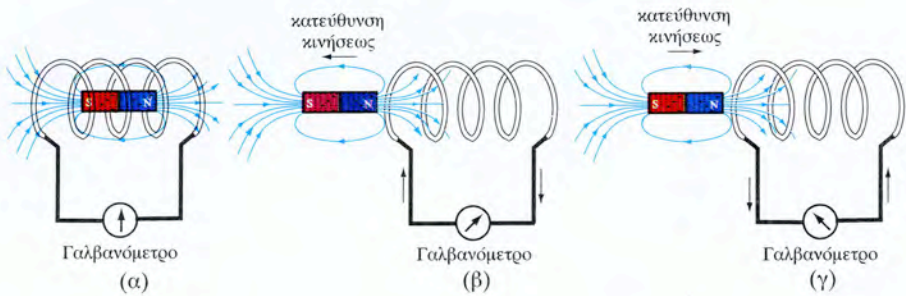
“Διδακτικοί στόχοι”

Με τη μελέτη της ενότητας αυτής οι μαθητές θα είναι σε θέση:

- να γνωρίζουν πότε και πώς αναπτύσσεται σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ηλεκτρογενετική δύναμη εξ επαγωγής.
- να γνωρίζουν τι λέει ο νόμος του Φαραντέι για το μέτρο της ΗΕΔ εξ επαγωγής.
- να γνωρίζουν πώς βρίσκουμε τη φορά της ΗΕΔ εξ επαγωγής με τη βοήθεια του κανόνα του Λεντς.
- να γνωρίζουν τι είναι η αυτεπαγωγή και τι ο συντελεστής αυτεπαγωγής.
- να γνωρίζουν πώς προκαλεί το φαινόμενο της αυτεπαγωγής μεταβατικά φαινόμενα κατά την τροφοδότηση ή τη διακοπή ενός ηλεκτρικού κυκλώματος.

3.4.1. Ηλεκτρεγερτική δύναμη εξ επαγωγής

Μέχρι τώρα είδαμε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Πώς επιδρά όμως με τη σειρά του το μαγνητικό πεδίο πάνω σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα; Όπως θα δούμε σε αυτή την ενότητα, όταν ένα μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται, επιδρά πάνω στα ηλεκτρικά κυκλώματα που βρίσκονται κοντά του αναπτύσσοντας σ' αυτά ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις. Αυτό μπορούμε να το διαπιστώσουμε κάνοντας το ακόλουθο πείραμα (Σχ. 3.4.1):



Σχήμα 3.4.1: Ανάπτυξη ΗΕΔ από την κίνηση του μαγνήτη

Έχουμε ένα πηνίο, το οποίο δεν τροφοδοτείται από καμία ηλεκτρική πηγή και στο εσωτερικό του έχουμε τοποθετήσει ένα ραβδόμορφο μαγνήτη (Σχ.3.4.1α). Συνδέουμε πρώτα στα άκρα του πηνίου ένα **γαλβανόμετρο**, ένα ευαίσθητο όργανο που μας δείχνει αν περνάει ηλεκτρικό ρεύμα από το πηνίο. Όσο ο μαγνήτης και το πηνίο είναι ακίνητα, το γαλβανόμετρο δείχνει σταθερά μηδέν. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι:

□ Ένα σταθερό (μη μεταβαλλόμενο) μαγνητικό πεδίο δεν επηρεάζει τα ηλεκτρικά κυκλώματα.

Αν στη συνέχεια (Σχ. 3.4.1β) κινήσουμε το μαγνήτη απομακρύνοντάς τον από το πηνίο, θα παρατηρήσουμε ότι το γαλβανόμετρο θα δείξει ότι από το πηνίο πέρασε ηλεκτρικό ρεύμα κατά μία ορισμένη φορά. Θα παρατηρήσουμε ακόμα ότι για την απομάκρυνση του μαγνήτη χρειάστηκε να καταβάλουμε

κάποια **δύναμη**, πράγμα που σημαίνει ότι η αλληλεπίδραση μαγνητικού πεδίου και ηλεκτρικού κυκλώματος μας εμποδίζει να απομακρύνουμε το μαγνήτη από το εσωτερικό του πηνίου.

Στη συνέχεια κινούμε πάλι το μαγνήτη για να τον επαναφέρουμε μέσα στο πηνίο. Το γαλβανόμετρο πάλι θα καταγράψει ότι πέρασε ηλεκτρικό ρεύμα από το πηνίο, όμως τώρα με αντίθετη φορά από ό,τι προηγουμένως. Θα παρατηρήσουμε επίσης ότι και πάλι ασκήθηκε μια δύναμη που μας εμποδίζει τώρα να πλησιάσουμε το μαγνήτη στο πηνίο.

Αφού το γαλβανόμετρο κατέγραψε ηλεκτρικό ρεύμα, πρέπει να δεχθούμε ότι κατά την κίνηση του μαγνήτη αναπτύχθηκε στο πηνίο μια **ηλεκτρεγερτική δύναμη** (ΗΕΔ). Η ΗΕΔ αυτή είναι που προκάλεσε το ηλεκτρικό ρεύμα που κατέγραψε το γαλβανόμετρο. Με άλλα λόγια:

□ Ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί την εμφάνιση ΗΕΔ στα ηλεκτρικά κυκλώματα που είναι κοντά του ή το περιβάλλουν.

Η ΗΕΔ που αναπτύσσεται λόγω μεταβολής του μαγνητικού πεδίου ονομάζεται **ΗΕΔ εξ επαγωγής** και το φαινόμενο που περιγράψαμε λέγεται **ηλεκτρομαγνητική επαγωγή**.

Όπως σημειώσαμε και σε άλλες ενότητες αυτού του βιβλίου, τα ονόματα που έχουν δοθεί σε φαινόμενα και μεγέθη του ηλεκτρομαγνητισμού έχουν προκύψει από την ιστορική εξέλιξη της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας και πρέπει να προσέχουμε, ώστε να μην μας οδηγήσουν σε παρανοήσεις. Έτσι δεν πρέπει σε καμιά περίπτωση να συγχέουμε το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής που περιγράψαμε παραπάνω με το μέγεθος της μαγνητικής επαγωγής B που όπως είδαμε αντιστοιχεί στην πυκνότητα της μαγνητικής ροής.

Επίσης για να έχουμε ανάπτυξη ΗΕΔ εξ επαγωγής, πρέπει η μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή να περνάει **μέσα** από το ηλεκτρικό κύκλωμα. Για παράδειγμα στο Σχ. 3.4.1α η μαγνητική ροή του μαγνήτη περνάει μέσα από τις σπείρες του πηνίου. Λέμε τότε ότι η μαγνητική ροή **εμπλέκει** το ηλεκτρικό κύκλωμα, ή —όπως αλλιώς λέμε— το ηλεκτρικό **τύλιγμα**.

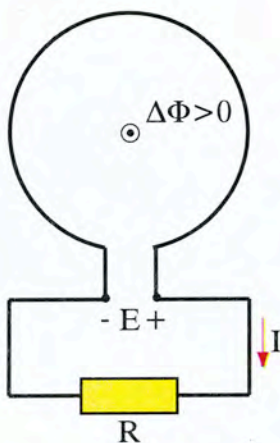
3.4.2. Νόμος του Φαραντέι και κανόνας του Λεντς

Ο Φαραντέι (Faraday) ήταν ο πρώτος που διατύπωσε το νόμο που καθορίζει την τιμή της ΗΕΔ εξ επαγωγής, της ΗΕΔ δηλαδή που παράγεται από μια μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή. Ας θεωρήσουμε μια σπείρα ενός πηνίου μέσα από την οποία περνά κάθετα μαγνητική ροή Φ (Σχ. 3.4.2).

Θεωρούμε ότι τη χρονική στιγμή t_1 η μαγνητική ροή που διασχίζει κάθετα το επίπεδο της σπείρας είναι ίση με Φ_1 . Στη συνέχεια η μαγνητική ροή μεταβάλλεται και τη χρονική στιγμή t_2 γίνεται ίση με Φ_2 . Έτσι η μαγνητική ροή μεταβλήθηκε (αυξήθηκε) κατά $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ μέσα σε χρονικό διάστημα $\Delta t = t_2 - t_1$. Ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής είναι ο λόγος $\Delta\Phi/\Delta t$ και εκφράζει το πόσο μεταβάλλεται η μαγνητική ροή στη μονάδα του χρόνου.

Σύμφωνα με το νόμο του Φαραντέι, στις συνθήκες που περιγράψαμε παραπάνω, το μέτρο της επαγόμενης ΗΕΔ στη σπείρα δίνεται από τον τύπο:

$$E = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \tag{3.4.1}$$



Σχήμα 3.4.2: Νόμος του Φαραντέι

όπου η μεταβολή της μαγνητικής ροής $\Delta\Phi$ μετράται σε βέμπερ (Wb), το χρονικό διάστημα Δt σε δευτερόλεπτα (s) και η ΗΕΔ σε βολτ (V). Συνεπώς:

□ Η ΗΕΔ που αναπτύσσεται εξ επαγωγής είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής.

Αν η μαγνητική ροή μεταβάλλεται απότομα, αν π.χ. ο μαγνήτης του Σχ.3.4.1 απομακρύνεται ή πλησιάζει με μεγάλη ταχύτητα το πηνίο, τότε η τιμή της ΗΕΔ θα είναι υψηλή. Αν αντίθετα η μαγνητική ροή μεταβάλλεται με αργό ρυθμό (π.χ. μετακινούμε το μαγνήτη του Σχ. 3.4.1 πολύ αργά) τότε και η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ θα έχει μικρή τιμή.

Σε ένα πηνίο με N σπείρες, όταν η μαγνητική ροή σε κάθε σπείρα μεταβάλλεται κατά $\Delta\Phi$ σε χρόνο Δt , ο νόμος του Φαραντέι δίνει τη **συνολική** ΗΕΔ στα άκρα του πηνίου που είναι :

$$E = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (3.4.2)$$

προσθέτουμε δηλαδή τις ΗΕΔ που αναπτύσσονται σε κάθε μια από τις N σπείρες, δεδομένου ότι οι ΗΕΔ αυτές είναι **σε σειρά**.

Από το νόμο του Φαραντέι προκύπτει πως η μονάδα της μαγνητικής ροής (βέμπερ) σχετίζεται με το βόλτ μέσω της σχέσεως:

$$1V = \frac{1Wb}{1s} \quad \text{ή} \quad 1Wb = 1V \cdot s$$

Για να προσδιορίσουμε τη φορά της επαγόμενης ΗΕΔ, πρέπει να θυμηθούμε την αντίσταση που συναντούμε όταν εισάγουμε ή απομακρύνουμε το μόνιμο μαγνήτη από το πηνίο του Σχ. 3.4.1. Η αντίσταση αυτή δείχνει ότι το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής αντιδρά στη μεταβολή της μαγνητικής ροής που επιχειρείται και προσπαθεί να την εμποδίσει. Αυτή η ιδιότητα αποτυπώνεται στον παρακάτω κανόνα του Λέντς (Lenz):

□ Η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ εξ επαγωγής σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα έχει φορά τέτοια, ώστε να εμποδίζει τη μεταβολή της μαγνητικής ροής που εμπλέκει το κύκλωμα.

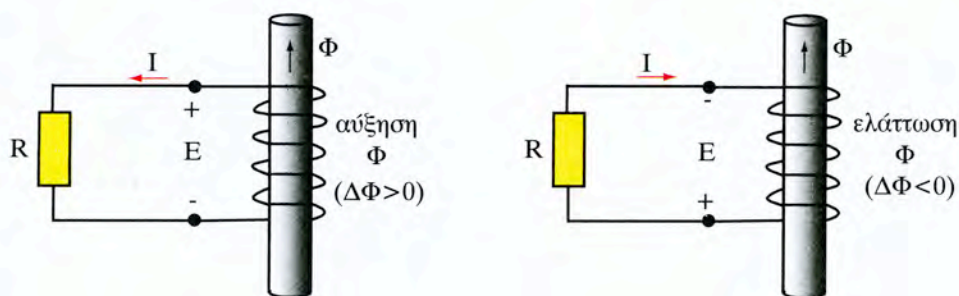
Έτσι, στο Σχ. 3.4.2 το ρεύμα I που προκαλεί η ΗΕΔ εξ επαγωγής E τείνει να προκαλέσει μαγνητική ροή αντίθετη από την $\Delta\Phi$.

Ο κανόνας του Λεντς έχει και μια γενικότερη διατύπωση:

□ Το επαγόμενο ρεύμα έχει τη φορά που αναιρεί το αίτιο που το προκάλεσε.

Ας δούμε για παράδειγμα πώς εφαρμόζεται ο κανόνας του Λεντς στο Σχ. 3.4.1β. Το **αίτιο** που προκάλεσε το επαγόμενο ρεύμα σε αυτή την περίπτωση είναι η απομάκρυνση του μαγνήτη από το πηνίο. Έτσι, το επαγόμενο ρεύμα I έχει τέτοια φορά, ώστε να παράγει μαγνητικό πεδίο, του οποίου ο βόρειος πόλος να είναι στραμμένος προς το νότιο πόλο του μαγνήτη που απομακρύνεται. Με αυτό τον τρόπο, το πηνίο ασκεί **ελκτική** δύναμη και **εμποδίζει** την απομάκρυνση του μαγνήτη.

Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να δούμε στο Σχ. 3.4.1γ, ότι η φορά του επαγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο, του οποίου ο βόρειος πόλος είναι στραμμένος προς το βόρειο πόλο του μαγνήτη που πλησιάζει στο πηνίο και κατά συνέπεια τον **απωθεί**. Πάλι λοιπόν το επαγόμενο ρεύμα αντιτίθεται στο αίτιο που το προκάλεσε.



Σχήμα 3.4.3: Εφαρμογή του κανόνα του Λέντς

Ας δούμε τώρα ένα άλλο παράδειγμα για την εφαρμογή του κανόνα του Λεντς. Στο Σχ. 3.4.3, αν η μαγνητική ροή Φ αυξηθεί ($\Delta\Phi > 0$), η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ θα έχει την πολικότητα που φαίνεται στο Σχ. 3.4.3α, ώστε το ρεύμα I που θα περάσει από την εξωτερική αντίσταση R , να προκαλέσει ένα μαγνητικό πεδίο που να **ελαττώνει** τη μαγνητική ροή Φ . Αντίθετα, αν η μαγνητική ροή

Φ ελαττωθεί ($\Delta\Phi < 0$) η πολικότητα της ΗΕΔ και του ρεύματος εξ επαγωγής θα είναι, όπως στο Σχ. 3.4.3β, δηλαδή, το ρεύμα I πάνω στην εξωτερική αντίσταση θα τείνει να **αυξήσει** τη μαγνητική ροή Φ , δηλαδή αντιτίθεται στην ελάττωσή της.

Βλέπουμε δηλαδή ότι το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής έχει μια αναλογία με την **αδράνεια** που συναντάμε στη μηχανική. Όπως ένα σώμα τείνει να διατηρήσει την ταχύτητά του, έτσι και η μαγνητική ροή που εμπλέκει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα έχει την τάση να διατηρείται σταθερή.

3.4.3. ΗΕΔ σε κινούμενο αγωγό

Ας φανταστούμε έναν αγωγό μήκους ℓ που κινείται με ταχύτητα v σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο με μαγνητική επαγωγή \vec{B} . Ο αγωγός κινείται **κάθετα** προς τις μαγνητικές γραμμές, οι οποίες στο Σχ. 3.4.4 είναι κάθετες στο επίπεδο του σχήματος με φορά προς τα μέσα. Καθώς ο αγωγός κινείται λέμε ότι "σαρώνει" μαγνητικές γραμμές.



Σχήμα 3.4.4: Ανάπτυξη ΗΕΔ σε κινούμενο αγωγό

Θεωρούμε ότι ο κινούμενος αγωγός ολισθαίνει πάνω σε δύο αγωγίμους οδηγούς, στο άκρο των οποίων συνδέεται μια ηλεκτρική αντίσταση R . Η μαγνητική ροή που περνάει από το ηλεκτρικό κύκλωμα που σχηματίζεται με αυτό τον τρόπο είναι ίση με:

$$\Phi = B \cdot S = B \cdot \ell \cdot x$$

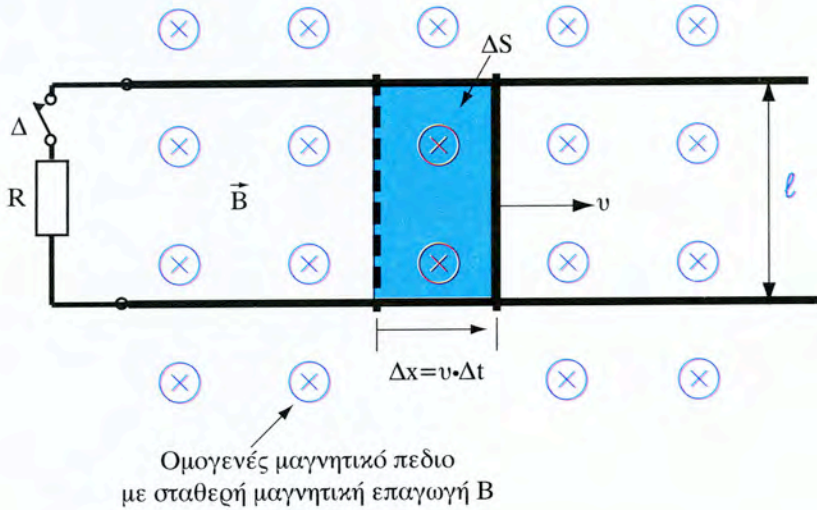
όπου x είναι το μήκος που έχει διανύσει ο κινούμενος αγωγός πάνω στους δυο οδηγούς του. Προφανώς $S = \ell x$ είναι η επιφάνεια του κυκλώματος, από την οποία περνά η μαγνητική ροή που εμπλέκει το ηλεκτρικό κύκλωμα.

Η ταχύτητα v , με την οποία κινείται ο αγωγός είναι ίση με $\Delta x / \Delta t$. Δηλαδή σε ένα χρονικό διάστημα Δt ο αγωγός θα έχει καλύψει μια απόσταση:

$$\Delta x = v \cdot \Delta t$$

όπως φαίνεται στο Σχ. 3.4.5 και θα έχει «σαρώσει» μια επιφάνεια:

$$\Delta S = \ell \cdot \Delta x = \ell \cdot v \cdot \Delta t$$



Σχήμα 3.4.5: Επιφάνεια ΔS για τον υπολογισμό του $\Delta \Phi$

Δεδομένου ότι η πυκνότητα της μαγνητικής ροής που δίνεται από τη μαγνητική επαγωγή B είναι σταθερή, η κίνηση του αγωγού αντιστοιχεί σε μεταβολή μαγνητικής ροής:

$$\Delta \Phi = B \cdot \Delta S = B \cdot \ell \cdot v \cdot \Delta t$$

Μπορούμε τώρα να εφαρμόσουμε το νόμο του Φαραντέι. Από τη σχέση (3.4.1) η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ εξ επαγωγής στον κινούμενο αγωγό είναι :

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = B \cdot \ell \cdot v \quad (3.4.3)$$

Η πολικότητα της ΗΕΔ καθορίζεται με τον ακόλουθο τρόπο:

Η μαγνητική ροή που εμπλέκει το ηλεκτρικό κύκλωμα αυξάνει καθώς ο αγωγός κινείται προς τα δεξιά. Αν συνεπώς ο διακόπτης Δ είναι κλειστός, όπως στο Σχ. 3.4.4, το ρεύμα I που θα αναπτυχθεί εξ επαγωγής, πρέπει να έχει φορά, ώστε να ελαττώνει τη μαγνητική ροή. Έτσι η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ εξ επαγωγής έχει την πολικότητα που αντιστοιχεί στο ρεύμα I, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.4.4.

Πρέπει εδώ να σημειώσουμε ότι η ΗΕΔ E θα αναπτυχθεί ακόμα και αν ο διακόπτης Δ είναι ανοικτός.

Η πολικότητα της αναπτυσσόμενης ΗΕΔ θα αλλάξει στις ακόλουθες περιπτώσεις:

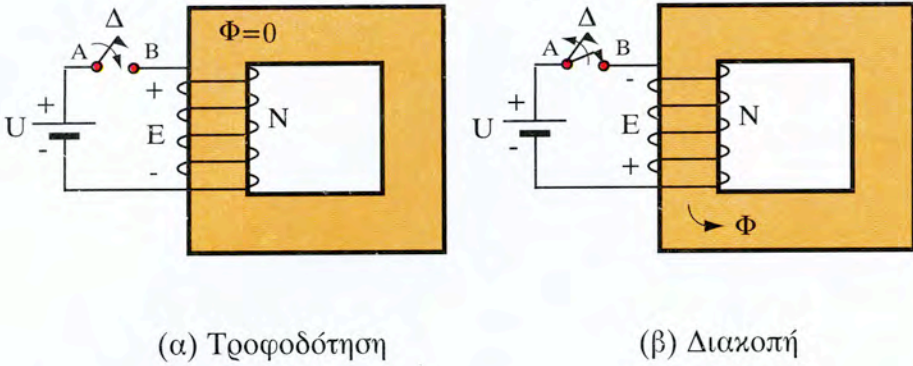
- Αν αντιστρέψουμε τη φορά της κίνησης του αγωγού
- Αν αλλάξουμε τη φορά των μαγνητικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου.

Οι εφαρμογές του νόμου του Φαραντέι είναι πάρα πολλές και οδήγησαν στη σχεδίαση και κατασκευή των ηλεκτρικών **γεννητριών**, όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 5.

3.4.4. Αυτεπαγωγή και συντελεστής αυτεπαγωγής

Ο νόμος του Φαραντέι ισχύει γενικά, ανεξάρτητα δηλαδή από το πώς προκύπτει η μεταβολή της μαγνητικής ροής ΔΦ. Έτσι, ΗΕΔ εξ επαγωγής αναπτύσσεται και όταν έχουμε μεταβολή ρεύματος σε ένα κύκλωμα.

Στο Σχ. 3.4.6 δείχνουμε ένα ηλεκτρικό πηνίο με N σπείρες που είναι τυλιγμένο σε ένα μαγνητικό πυρήνα με μαγνητική αντίσταση R_m . Αρχικά το πηνίο δε διαρρέεται από ρεύμα και η μαγνητική ροή στον πυρήνα είναι μηδέν. Αν κλείσουμε όμως το διακόπτη Δ, ξέρουμε ότι θα περάσει από το ηλεκτρικό κύκλωμα ένα ρεύμα I. Το ρεύμα αυτό θα δημιουργήσει σύμφωνα με αυτά που ξέρουμε μια μαγνητική ροή.



Σχήμα 3.4.6: Μαγνητικό κύκλωμα για την εξήγηση της αυτεπαγωγής

Συνεπώς, μόλις κλείσει ο διακόπτης Δ, η μαγνητική ροή που εμπλέκει το πηνίο θα αλλάξει. Έτσι το κλείσιμο του διακόπτη θα προκαλέσει την ανάπτυξη μιας ΗΕΔ στο πηνίο με πολικότητα, που να εμποδίζει την διέλευση του ρεύματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **αυτεπαγωγή**. Γενικά οποιαδήποτε μεταβολή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα κύκλωμα θα προκαλέσει την εμφάνιση μιας ΗΕΔ εξ αυτεπαγωγής, η οποία, σύμφωνα με τον κανόνα του Λεντς, θα αντιτίθεται στη μεταβολή αυτή.

□ **Αυτεπαγωγή είναι η εμφάνιση ΗΕΔ σε ένα κύκλωμα, που οφείλεται στη μεταβολή του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το ίδιο το κύκλωμα.**

Έτσι, εάν σε ένα κλειστό κύκλωμα ανοίξουμε ξαφνικά το διακόπτη Δ θα εμφανιστεί μια ΗΕΔ από αυτεπαγωγή με την πολικότητα του Σχ. 3.2.6β. Στην περίπτωση αυτή, σύμφωνα με τον κανόνα του Λεντς, η ΗΕΔ τείνει να διατηρήσει τη ροή του ρεύματος.

Το μέγεθος που χαρακτηρίζει την αυτεπαγωγή είναι ο **συντελεστής αυτεπαγωγής L**. Αν το ρεύμα ενός κυκλώματος είναι I_1 τη χρονική στιγμή t_1 και μεταβληθεί, έτσι ώστε να πάρει την τιμή I_2 κατά τη χρονική στιγμή t_2 , η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ από αυτεπαγωγή δίνεται από τον τύπο :

$$E = L \frac{I_2 - I_1}{t_2 - t_1} = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (3.4.4)$$

όπου ΔI είναι η μεταβολή του ρεύματος μέσα στο χρονικό διάστημα Δt . Με άλλα λόγια η ΗΕΔ από αυτεπαγωγή είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής του ρεύματος και ο συντελεστής αναλογίας είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής.

Ο συντελεστής αυτεπαγωγής L έχει μονάδα το Ανρί (1H) που είδαμε και παραπάνω. Από τον τύπο (3.4.4) προκύπτει ότι:

$$1\text{H} = \frac{1\text{V}}{1\text{A/s}} = 1 \frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{A}} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{A}}$$

Υποπολλαπλάσια του ανρί είναι το μιλιανρί και το μικροανρύ:

Μιλιανρί: $1\text{mH} = 10^{-3}\text{H}$

Μικροανρύ: $1\mu\text{H} = 10^{-6}\text{H}$.

Πολλές φορές, όταν δεν υπάρχει κίνδυνος παρανόησης, ο συντελεστής αυτεπαγωγής αναφέρεται απλά ως "αυτεπαγωγή". Μπορεί δηλαδή κάποιος να αναφέρει την "αυτεπαγωγή ενός πηνίου" εννοώντας στην πραγματικότητα το συντελεστή αυτεπαγωγής του πηνίου. Η έκφραση αυτή είναι αρκετά διαδεδομένη, αν και όχι απόλυτα ακριβής.

Η σχέση (3.4.4) χρησιμοποιήθηκε για να ορίσουμε το συντελεστή αυτεπαγωγής ενός κυκλώματος. Η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ από αυτεπαγωγή μπορεί όμως να υπολογιστεί και απευθείας από το νόμο του Φαραντέι. Έτσι, για το πηνίο με N σπείρες του Σχ. 3.4.6 μπορούμε να εφαρμόσουμε τον τύπο (3.4.2) ως εξής :

Η μεταβολή της μαγνητικής ροής $\Delta\Phi$ οφείλεται μόνο στη μεταβολή του ρεύματος ΔI . Από το μαγνητικό κύκλωμα του Σχ. 3.4.6 όμως η μαγνητική ροή είναι:

$$\Phi = \frac{\Theta}{R_m} = \frac{N \cdot I}{R_m}$$

όπου Θ είναι η ΜΕΔ του πηνίου και R_m η μαγνητική αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος του Σχ. 3.4.6. Άρα η μεταβολή της μαγνητικής ροής $\Delta\Phi$ που οφείλεται σε μεταβολή ρεύματος ΔI είναι:

$$\Delta\Phi = \frac{N}{R_m} \Delta I$$

Αντικαθιστώντας το $\Delta\Phi$ στον τύπο (3.4.2) έχουμε την παρακάτω σχέση που δίνει την αναπτυσσόμενη ΗΕΔ από αυτεπαγωγή:

$$E = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{N^2}{R_m} \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Συγκρίνοντας τώρα με τον τύπο (3.4.4) είναι φανερό πως ο **συντελεστής αυτεπαγωγής** L συνδέεται με τη **μαγνητική αντίσταση** R_m με την απλή σχέση:

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2 \cdot S}{\mu \cdot \ell} \quad (3.4.5)$$

όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα, S η διατομή και ℓ το μήκος του μαγνητικού κυκλώματος.

Δεδομένου ότι ο αριθμός των σπειρών N είναι μέγεθος αδιάστατο, η σχέση (3.4.5) εξηγεί γιατί η μονάδα της μαγνητικής αντίστασης εκφράζεται ως το αντίστροφο του ανρί :

$$1 \frac{A \cdot \varepsilon}{Wb} = 1 H^{-1}$$

Η σχέση (3.4.5) επιτρέπει επίσης να υπολογίσουμε την αυτεπαγωγή ενός πηνίου, εάν γνωρίζουμε τη γεωμετρία του μαγνητικού του κυκλώματος και τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Με ποιοτικό τρόπο η σχέση (3.4.5) μας δείχνει ότι:

- Αν διπλασιάσουμε τις σπείρες ενός πηνίου τετραπλασιάζουμε το συντελεστή αυτεπαγωγής του.
- Ένα απλό κύκλωμα, δηλαδή ένα κύκλωμα που αποτελείται από μια και μόνο σπείρα ($N=1$), έχει μικρό συντελεστή αυτεπαγωγής σε σχέση με ένα πηνίο που έχει πολλές σπείρες.
- Ένα πηνίο που δεν έχει πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό παρουσιάζει μεγαλύτερη μαγνητική αντίσταση και άρα έχει μικρότερο συντελεστή αυτεπαγωγής, σε σχέση με το ίδιο πηνίο, όταν έχει πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις έχουν ως συνέπεια να μην εμφανίζονται έντονα φαινόμενα αυτεπαγωγής στα συνηθισμένα κυκλώματα συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο, η τροφοδότηση με ρεύμα ενός κυκλώματος συνεχούς ρεύματος, όπως και η διακοπή της τροφοδότησης με το άνοιγμα ενός διακόπτη, συνεπάγονται πάντοτε **μεταβατικά φαινόμενα**, τα οποία θα εξετάσουμε στη συνέχεια.

> Παράδειγμα 1

Μια βραχυκυκλωμένη σπείρα πηνίου με αντίσταση $R=0,1 \Omega$ σχηματίζει ένα κλειστό κυκλικό κύκλωμα με ακτίνα $r=5 \text{ cm}$. Όλο το κύκλωμα βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο και κάθετα προς τις μαγνητικές γραμμές του πεδίου. Η μαγνητική επαγωγή του πεδίου είναι $B=1\text{T}$. Να υπολογιστεί το ρεύμα I που εμφανίζεται στον αγωγό, όταν διακόπτεται το πεδίο και η μαγνητική επαγωγή από 1T μηδενίζεται μέσα σε χρονικό διάστημα $t=0,1 \text{ s}$.

Λύση

Η ΗΕΔ E από επαγωγή δίδεται από τον τύπο (3.4.2):

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Επειδή η μαγνητική επαγωγή μεταβάλλεται από την τιμή 1T στο μηδέν, έπεται ότι μεταβάλλεται η μαγνητική ροή από την αρχική της τιμή:

$$\Phi = B \cdot S$$

όπου

$$S = \pi r^2 = 3.14 \times (0.05\text{m})^2 = 0.00785 \text{ m}^2 = 7.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\Phi = 1\text{T} \times 7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 7,85 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

μέχρι να μηδενιστεί επίσης. Δηλαδή θα είναι $\Delta\Phi = -\Phi$, άρα

$$E = \frac{\Phi - 0}{\Delta t} = \frac{7,85 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{0,1 \text{ s}} = 78,5 \text{ mV}$$

Σημ: Επειδή η ροή μειώνεται, το $\Delta\Phi$ είναι στην πραγματικότητα αρνητικός αριθμός. Ωστόσο, από το νόμο του Φαραντέι κρατάμε μόνο το μέτρο της ΗΕΔ, ενώ την πολικότητά της θα βρούμε (όποτε χρειαστεί) από τον κανόνα του Λέντς.

Το ρεύμα δίνεται από το νόμο του $\Omega\mu$:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{78,5\text{mV}}{0,1\Omega} = 785\text{ mA} = 0,785\text{ A}$$

Η φορά του ρεύματος θα τείνει να αυξήσει τη μαγνητική ροή Φ .

Απάντηση: Το ρεύμα που θα διατρέξει το κύκλωμα είναι 0,785 A.

> Παράδειγμα 2

Ένα πηνίο με 20 σπείρες και διατομή 50 cm^2 βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, με μαγνητική επαγωγή $B_1 = 120 \times 10^{-4}\text{T}$. Οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου διαπερνούν κάθετα τη διατομή του πηνίου. Να υπολογιστεί η ΗΕΔ εξ επαγωγής που εμφανίζεται στα άκρα του πηνίου, ύστερα από διακοπή του πεδίου, όταν η μαγνητική επαγωγή μεταβάλλεται ομοιόμορφα από την τιμή B_1 στην τιμή $B_2=0$ μέσα σε διάστημα 0,1s.

Λύση

Από τον τύπο (3.4.2):

$$E = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Η μαγνητική ροή μεταβάλλεται από την τιμή:

$$\Phi_1 = B_1 S = (120 \times 10^{-4}\text{T})(50 \times 10^{-4}\text{ m}^2) = 0,6 \times 10^{-4}\text{ Wb}$$

μέχρι το μηδέν. Άρα:

$$E = N \frac{\Phi_1 - 0}{\Delta t} = 20 \frac{0,6 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{0,1 \text{ s}} = 12 \text{ mV} = 0,012 \text{ V}$$

Απάντηση: Θα αναπτυχθεί ΗΕΔ 0,012 V.

➤ Παράδειγμα 3

Να υπολογιστεί ο συντελεστής αυτεπαγωγής ενός πηνίου 200 σπειρών με σιδερένιο πυρήνα μαγνητικής διαπερατότητας 0,01 H/m, μήκους 24 cm και διατομής 6 cm². Ποια ΗΕΔ εμφανίζεται στα άκρα του πηνίου αυτού, όταν διακόπτεται ρεύμα $I_1 = 5\text{A}$ που περνά από το πηνίο, με αποτέλεσμα να φθάσει το ρεύμα στην τιμή $I_2 = 0$ μέσα σε χρονικό διάστημα 0,01s.

Λύση

Ο τύπος (3.3.1) για τη μαγνητική αντίσταση ενός μαγνητικού κυκλώματος έχει εξαχθεί για την περίπτωση του δακτυλίου. Μπορούμε όμως να τον εφαρμόσουμε κατά προσέγγιση σε οποιοδήποτε σιδερένιο πυρήνα. Με εφαρμογή αυτού του τύπου έχουμε:

$$R_m = \frac{\ell}{\mu \cdot S} = \frac{0,24\text{m}}{(0,01\text{H} / \text{m})(6 \times 10^{-4} \text{m}^2)} = 4 \times 10^4 \text{ H}^{-1}$$

Από τον τύπο (3.4.5) προκύπτει ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου:

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{200^2}{4 \times 10^4 \text{ H}^{-1}} = 1 \text{ H}$$

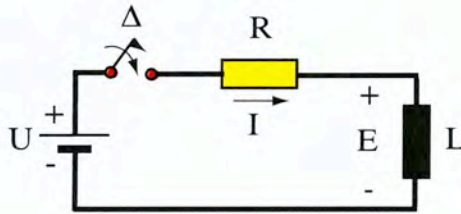
Η ΗΕΔ κατά τη διακοπή δίδεται από τον τύπο (3.4.4):

$$E = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 1\text{H} \frac{5\text{A} - 0}{10^{-2}\text{s}} = 500\text{V}$$

Απάντηση: Ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου είναι 1H και η ΗΕΔ που αναπτύσσεται κατά τη διακοπή είναι 500 V.

3.4.5. Τροφοδότηση ηλεκτρικού κυκλώματος

Στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε το μεταβατικό φαινόμενο που συμβαίνει, όταν τροφοδοτήσουμε με συνεχή τάση ένα πηνίο ή ένα οποιοδήποτε ηλεκτρικό κύκλωμα με αυτεπαγωγή. Για το σκοπό αυτό ας επιστρέψουμε στο Σχ. 3.4.6α, όπου κλείνουμε ένα διακόπτη Δ προκειμένου να τροφοδοτήσουμε το πηνίο. Το ηλεκτρικό κύκλωμα σχεδιάζεται συμβολικά στο Σχ. 3.4.7.



Σχήμα 3.4.7: Ηλεκτρικό κύκλωμα με αυτεπαγωγή και αντίσταση

Η ΗΕΔ E που θα αναπτυχθεί λόγω αυτεπαγωγής θα έχει την πολικότητα που φαίνεται στο Σχ. 3.4.6α και στο Σχ. 3.4.7, ώστε να τείνει σύμφωνα με τον κανόνα του Λεντς να εμποδίσει την αύξηση του ηλεκτρικού ρεύματος. Δεδομένου ότι στο ηλεκτρικό κύκλωμα εμφανίζονται δυο τάσεις (η τάση τροφοδοσίας U και η ΗΕΔ λόγω αυτεπαγωγής E) πρέπει να εφαρμόσουμε το νόμο τάσεων του Κίρχωφ, σύμφωνα με τον οποίο:

$$E = U - I \cdot R \quad (3.4.6)$$

Ο ρυθμός αύξησης του ρεύματος $\Delta I/\Delta t$ είναι ανάλογος, σύμφωνα με τον τύπο (3.4.4), με την ΗΕΔ εξ αυτεπαγωγής E . Ο ρυθμός αυτός είναι μεγαλύτερος τη χρονική στιγμή $t=0$, όταν δηλαδή κλείνουμε το διακόπτη. Τη χρονική αυτή στιγμή η ΗΕΔ λόγω αυτεπαγωγής E είναι ακριβώς ίση με την τάση τροφοδοσίας U και το ρεύμα είναι ακόμα μηδέν.

Στη συνέχεια, καθώς το ρεύμα αρχίζει να αυξάνει, η ΗΕΔ E και ο ρυθμός αύξησης του ρεύματος μειώνονται και η τιμή του ρεύματος πλησιάζει σταδιακά να φτάσει στην τιμή:

$$I = \frac{U}{R} \quad (3.4.7)$$

όπου η ΗΕΔ $E=0$ και το ρεύμα παραμένει πλέον σταθερό.

Θα προσεγγίσουμε το πραγματικό φαινόμενο με ένα παράδειγμα. Ας υποθέσουμε ότι $U=20\text{ V}$, $R=2\Omega$ και $L=1\text{ H}$. Τη χρονική στιγμή $t=0$ έχουμε $I=0$ και από τη σχέση (3.4.6) $E=U=20\text{V}$. Από τη σχέση (3.4.4) για $E=20\text{V}$ και $L=1\text{H}$ έχουμε:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{E}{L} = 20\text{ A/s}$$

δηλαδή το ρεύμα αυξάνει κατά 20 A το δευτερόλεπτο.

Αν πάρουμε ένα διάστημα $\Delta t = 0,1\text{ s}$, τότε στο τέλος του διαστήματος αυτού θα έχουμε μεταβολή ρεύματος $\Delta I=2\text{A}$. Άρα τη χρονική στιγμή $t=0,1\text{s}$ θα ισχύουν οι σχέσεις:

$$I=0+\Delta I=2\text{A},$$

$$E = U - IR = 20 - 4 = 16\text{V},$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{E}{L} = 16\text{ A/s}$$

Με τον ίδιο τρόπο συμπληρώνουμε τον παρακάτω πίνακα :

t(s)	I (A)	E (V)	$\Delta I/\Delta t$ (A/s)	ΔI (A)
0	0	20	20	2
0,1	2	16	16	1,6
0,2	3,6	12,8	12,8	1,3
0,3	4,9	10,2	10,2	1,0
0,4	5,9	8,2	8,2	0,8
0,5	6,7	6,6	6,6	0,7
0,6	7,4	5,2	5,2	0,5
0,7	7,9	4,2	4,2	0,4
0,8	8,3	3,4	3,4	0,3
0,9	8,6	2,8	2,8	0,3
1,0	8,9	2,2	2,2	0,2
1,1	9,1	1,8	1,8	0,2
1,2	9,3	1,4	1,4	0,1
1,3	9,4	1,2	1,2	0,1
1,4	9,5	1,0	1,0	0,1
1,5	9,6	0,8	0,8	0,1
1,6	9,7	0,6	0,6	0,1
1,7	9,8	0,4	0,4	0,04
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Τελική τιμή	10	0	0	0

Όπως βλέπουμε λοιπόν, το ρεύμα θα αυξάνει σταδιακά και θα χρειαστεί 2 περίπου δευτερόλεπτα για να φτάσει πολύ κοντά στην τελική του τιμή $I=U/R=10A$. Σημειώνεται ότι οι παραπάνω υπολογισμοί είναι προσεγγιστικοί επειδή ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος δεν μένει σταθερός για 0,1 s . Έχουν γίνει επίσης στρογγυλεύσεις σε πρώτο δεκαδικό ψηφίο.

Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής L του κυκλώματος τόσο περισσότερος χρόνος θα χρειαστεί για να αποκατασταθεί το ρεύμα στην τελική του τιμή. Όμως, ο χρόνος αποκατάστασης επηρεάζεται επίσης από την τιμή της αντίστασης R . Για παράδειγμα αν πάρουμε στο παραπάνω κύκλωμα $R=1\Omega$, αντί για 2Ω που ήταν πριν, θα έχουμε τον παρακάτω πίνακα για τον υπολογισμό του ρεύματος, όταν κλείνει ο διακόπτης:

t(s)	I (A)	E = U - IR	$\Delta I/\Delta t$ (A/s)	ΔI (A)
0	0	20	20	2
0,1	2	19	19	1,9
0,2	3,9	16,1	16,1	1,6
0,3	5,5	14,5	14,5	1,5
0,4	7,0	13	13	1,3
0,5	8,3	11,7	11,7	1,2
0,6	9,5	10,5	10,5	1,1
0,7	10,6	9,4	9,4	0,9
0,8	11,5	8,5	8,5	0,9
0,9	12,4	7,6	7,6	0,8
1,0	13,2	6,8	6,8	0,7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Τελική τιμή	20	0	0	0

Παρατηρούμε ότι σε ένα δευτερόλεπτο το ρεύμα έχει φτάσει τα $13,2/20$ ή περίπου το 66% της τελικής του τιμής που είναι τώρα $U/R=20A$, ενώ στον προηγούμενο πίνακα σε ένα δευτερόλεπτο το ρεύμα είχε φτάσει τα $8,9/10$ ή περίπου το 89% της τελικής του τιμής. Θα χρειαστεί λοιπόν περισσότερος χρόνος για να φτάσει το ρεύμα στην τελική του τιμή, όταν η αντίσταση είναι μικρότερη. Άρα η μείωση της αντίστασης R αυξάνει το χρόνο αποκατάστασης του ρεύματος.

Ο λόγος του συντελεστή αυτεπαγωγής L προς την αντίσταση R ενός κυκλώματος ονομάζεται **χρονική σταθερά** ή **σταθερά χρόνου** του κυκλώματος.

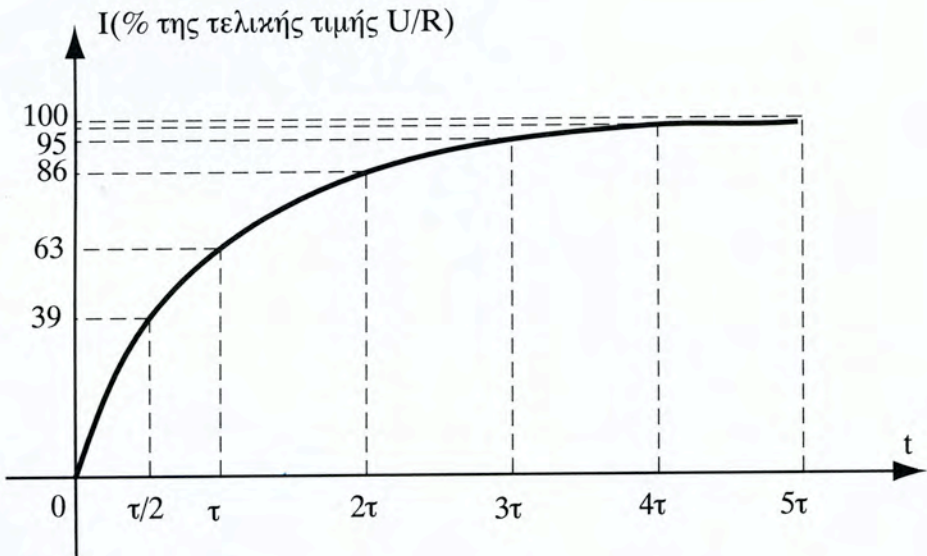
$$\tau = \frac{L}{R} \tag{3.4.8}$$

Δεδομένου ότι η μονάδα του συντελεστή αυτεπαγωγής είναι:

$$1H = \frac{1Wb}{A} = 1 \frac{Vs}{A} = 1 \Omega s$$

η σταθερά χρόνου τ προκύπτει σε δευτερόλεπτα, αν αντικαταστήσουμε το L σε ανή και το R σε $\omega\mu$. Όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά χρόνου τ , τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για την αποκατάσταση του ρεύματος. Όσο μικρότερη είναι η σταθερά χρόνου τ , τόσο πιο γρήγορα αποκαθίσταται το ρεύμα στην τελική του τιμή.

Όπως είπαμε, οι αριθμητικοί υπολογισμοί που κάναμε στους παραπάνω πίνακες είναι προσεγγιστικοί. Η ακριβής καμπύλη που δείχνει την αποκατάσταση του ρεύματος σε ένα κύκλωμα με αντίσταση και αυτεπαγωγή φαίνεται στο Σχ. 3.4.8, όπου το ρεύμα παρουσιάζεται σε ποσοστό της τελικής του τιμής και ο χρόνος σε πολλαπλάσια της σταθεράς χρόνου τ .



Σχήμα 3.4.8: Καμπύλη αποκατάστασης ρεύματος

Ορισμένες τιμές της καμπύλης αποκατάστασης ρεύματος δίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.4.1:

Πίνακας 3.4.1: Τιμές ρεύματος σε ποσοστό της τελικής τιμής

t	$I/I_{\text{τελικό}}$
$\tau/2$	39%
τ	63%
2τ	86%
3τ	95%
4τ	98%
5τ	99,3%

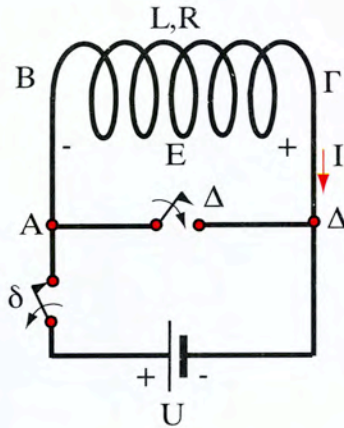
Στην πρώτη περίπτωση είχαμε $R = 2\Omega$, άρα με βάση τον τύπο (3.4.8) $\tau=0,5s$. Με βάση τον πίνακα 3.4.1 μπορούμε να υπολογίσουμε ότι σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα θα έχει αποκατασταθεί ακριβώς στο 98% της τελικής τιμής (θα είναι δηλαδή 9,8A) μετά από χρόνο:

$$t = 4\tau = 4 \times 0,5 \text{ s} = 2 \text{ s}.$$

Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση $R=1\Omega$ και $\tau=1s$. Άρα στον ίδιο χρόνο $t=2s=2\tau$ το ρεύμα θα είναι μόνο το 86% της τελικής τιμής του (που είναι τώρα 20 A), δηλαδή θα είναι $I=17,2A$. Επίσης σε χρόνο $t=\tau=1s$ το ρεύμα θα είναι 63% των 20A, δηλαδή $I=12,6 \text{ A}$ (και όχι 13,2 A που είχαμε υπολογίσει προσεγγιστικά παραπάνω).

3.4.6. Καμπύλη βραχυκύκλωσης πηνίου

Στο κύκλωμα του Σχ. 3.4.9, αποσυνδέουμε την πηγή U ανοίγοντας τον διακόπτη δ , και κλείνουμε ταυτόχρονα το διακόπτη Δ . Στην περίπτωση αυτή, παρότι το πηνίο έπαψε να τροφοδοτείται, το ρεύμα του δε θα μηδενιστεί αμέσως, αλλά θα συνεχίσει για κάποιο χρονικό διάστημα να ρέει μέσα από τον κλειστό διακόπτη Δ .

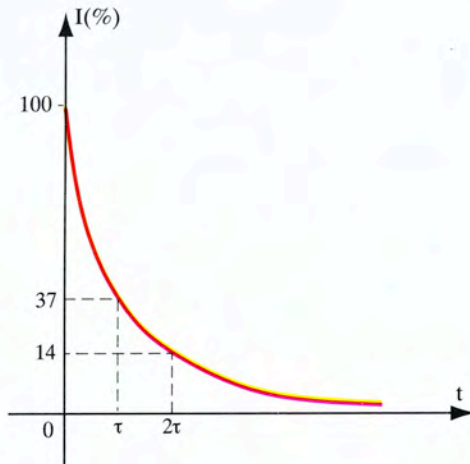


Σχήμα 3.4.9: Βραχυκύκλωση πηνίου

Από τη στιγμή που το πηνίο έπαψε να τροφοδοτείται από την πηγή, το ρεύμα I οφείλεται αποκλειστικά στην ΗΕΔ εξ αυτεπαγωγής E που έχει τώρα τη φορά που φαίνεται στο Σχ. 3.4.9 και τείνει να διατηρήσει το ρεύμα I . Με τρόπο παρόμοιο με την προηγούμενη παράγραφο μπορούμε από τη σχέση:

$$E = IR$$

να υπολογίζουμε κάθε χρονική στιγμή την ΗΕΔ αυτεπαγωγής E σε συνάρτηση με το ρεύμα I και στη συνέχεια τη μεταβολή (μείωση) ΔI από τον τύπο (3.4.4).



Σχήμα 3.4.10: Μηδενισμός ρεύματος πηνίου μετά από βραχυκύκλωση

Η μεταβολή του ρεύματος δίνεται από την καμπύλη του σχήματος 3.4.10. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για το μηδενισμό του ρεύματος εξαρτάται από τη σταθερά χρόνου τ του κυκλώματος που δίνεται πάντα από τη σχέση (3.4.8)

3.4.7. Υπέρταση από άνοιγμα διακόπτη

Αν στο κύκλωμα του Σχ. 3.4.6β ανοίξουμε το διακόπτη, η διακοπή του ρεύματος προκαλεί την ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης από αυτεπαγωγή με την πολικότητα που φαίνεται στο σχήμα. Αξίζει να παρατηρήσουμε πως στην περίπτωση αυτή η τάση στα άκρα του διακόπτη δίνεται από το **άθροισμα** της τάσης τροφοδοσίας και της ΗΕΔ από αυτεπαγωγή:

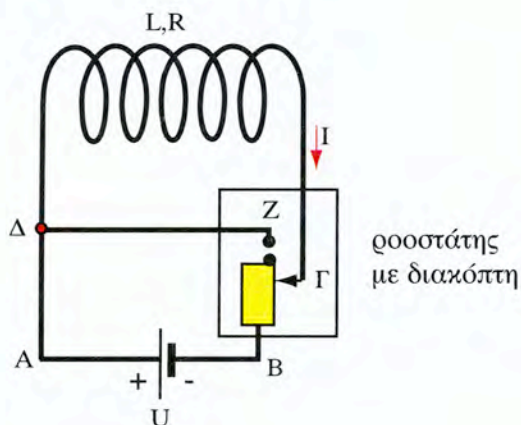
$$U_{AB} = U + E$$

είναι δηλαδή **μεγαλύτερη** από την τάση τροφοδοσίας. Επίσης, όπως είδαμε και στο Παράδειγμα 3 παραπάνω, η ΗΕΔ εξ επαγωγής μπορεί να πάρει πολύ υψηλές τιμές, οι οποίες εξαρτώνται από το συντελεστή αυτεπαγωγής του κυκλώματος και από το χρόνο Δt , μέσα στον οποίο μηδενίζεται το ρεύμα. Συνεπώς:

□ Κατά το άνοιγμα των διακοπών εμφανίζονται υπερτάσεις

Αποτέλεσμα αυτών των υπερτάσεων είναι να δημιουργείται πολλές φορές ένα **ηλεκτρικό τόξο** μεταξύ των επαφών του διακόπτη. Αυτό συνήθως φαίνεται σα μια λάμψη τη στιγμή ακριβώς που ανοίγει ο διακόπτης. Το τόξο αυτό, όταν παρουσιάζεται συνεχώς, έχει ως αποτέλεσμα την **καταστροφή** των επαφών του διακόπτη. Οι υψηλές ΗΕΔ από αυτεπαγωγή μπορεί επίσης να προκαλέσουν καταστροφή των μονώσεων των αγωγών.

Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα πρακτικά φαινόμενα παίρνονται διάφορα μέτρα. Για παράδειγμα, στο κύκλωμα του Σχ. 3.4.11 παρεμβάλλεται πριν από το διακόπτη ένας ροοστάτης, ο οποίος επιτρέπει τη ρύθμιση της έντασης του κυκλώματος, πριν αυτό διακοπεί.

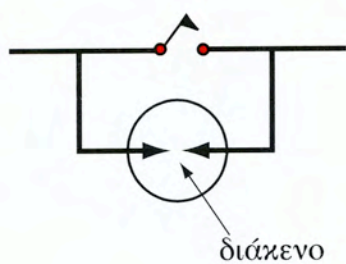


Σχήμα 3.4.11: Διακοπή μέσω ροοστάτη

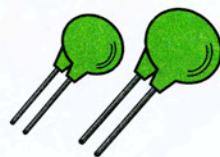
Όταν πρόκειται να διακόψουμε το ρεύμα στο κύκλωμα του Σχ. 3.4.11, το ελαττώνουμε πρώτα σιγά-σιγά μετακινώντας την κινητή επαφή Γ του ροοστάτη προς τα επάνω. Η μεταβολή αυτή δεν προκαλεί σοβαρή ΗΕΔ από αυτεπαγωγή γιατί γίνεται με αργό ρυθμό. Στη συνέχεια, αφού συνδεθεί στο κύκλωμα όλη η αντίσταση του ροοστάτη, διακόπτουμε το κύκλωμα συνδέοντας τον ακροδέκτη Γ του ροοστάτη με την επαφή Ζ.

Έτσι, όταν διακόψουμε το ηλεκτρικό ρεύμα, βραχυκυκλώνουμε ταυτόχρονα το πηνίο και το ρεύμα που δημιουργεί η ΗΕΔ από αυτεπαγωγή βρίσκει διέξοδο μέσα από το κλειστό κύκλωμα ΖΓΔ. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγουμε τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου.

Μια άλλη μέθοδος για την προστασία των εγκαταστάσεων από τις υπερτάσεις διακοπής είναι η εισαγωγή ενός αλεξικέραυνου παράλληλα προς το διακόπτη, έτσι ώστε το τόξο να μην περάσει από τις επαφές του διακόπτη. Τα αλεξικέραυνα αυτά έχουν τη μορφή σπινθηριστών (Σχ. 3.4.12α), ή αποτελούνται από ειδικούς ημιαγωγούς (Metal Oxide Varistors – MOV) από οξειδία μετάλλων, κυρίως ψευδάργυρου (ZnO). Τα MOV εμφανίζουν πολύ μεγάλη αντίσταση υπό κανονικές συνθήκες, η οποία όμως μηδενίζεται λόγω μεταβολής της μικροδομής τους (Σχ. 3.4.13), όταν επιβάλλεται μια μεταβατική υπέρταση, λόγω του ανοίγματος του διακόπτη.

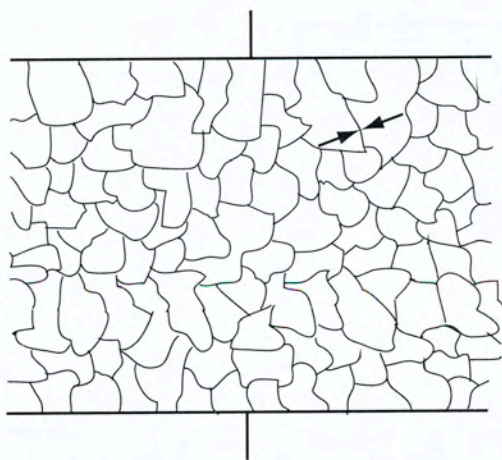


(α) Σπινθηριστής



(β) MOV

Σχήμα 3.4.12: Διατάξεις προστασίας από υπερτάσεις



Σχήμα 3.4.13: Μικροδομή ZnO: οι αγώγιμοι κόκκοι είναι χωρισμένοι μεταξύ τους

Ανακεφαλαίωση

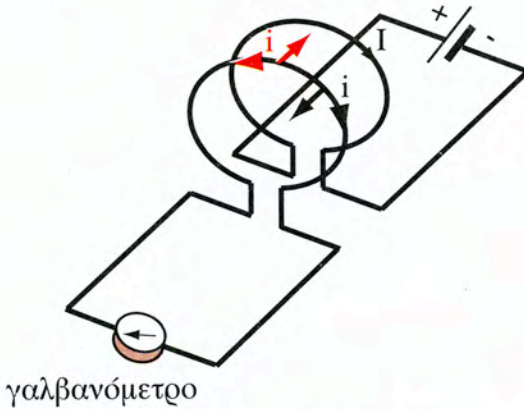
- Ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί την εμφάνιση ΗΕΔ στα ηλεκτρικά κυκλώματα που βρίσκονται στο περιβάλλον του. Η ΗΕΔ αυτή ονομάζεται ΗΕΔ εξ επαγωγής.
- Η ΗΕΔ εξ επαγωγής είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής και του αριθμού σπειρών του πηνίου.
- Η ΗΕΔ εξ επαγωγής σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα έχει φορά τέτοια, ώστε να εμποδίζει τη μεταβολή της μαγνητικής ροής που περνάει από το κύκλωμα.
- Όταν ένας αγωγός κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο αναπτύσσεται ΗΕΔ εξ επαγωγής, η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας του αγωγού, του μήκους του και της μαγνητικής επαγωγής του πεδίου.
- Αυτεπαγωγή είναι η εμφάνιση ΗΕΔ σε ένα κύκλωμα, που οφείλεται στη μεταβολή του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το ίδιο το κύκλωμα.
- Λόγω της αυτεπαγωγής ένα ηλεκτρικό κύκλωμα αντιτίθεται στη μεταβολή του ρεύματος που το διαρρέει.
- Ο συντελεστής αυτεπαγωγής ενός πηνίου είναι αντιστρόφως ανάλογος της μαγνητικής αντίστασης.
- Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα με αυτεπαγωγή δημιουργούνται μεταβατικά φαινόμενα κατά την τροφοδότηση, τη διακοπή ή τη βραχυκύκλωσή του.
- Τα μεταβατικά φαινόμενα διαρκούν περισσότερο, όταν ο συντελεστής αυτεπαγωγής είναι μεγάλος, ή η αντίσταση του κυκλώματος μικρή.
- Κατά το άνοιγμα των διακοπών δημιουργούνται λόγω αυτεπαγωγής υπερτάσεις, οι οποίες μπορεί να καταστρέψουν το διακόπτη. Γι' αυτό σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές προστασίας.

Πίνακας Συμβόλων και Μονάδων

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα
Συντελεστής αυτεπαγωγής	L	Ανρί (H)
Σταθερά χρόνου	τ	Δευτερόλεπτα (s)

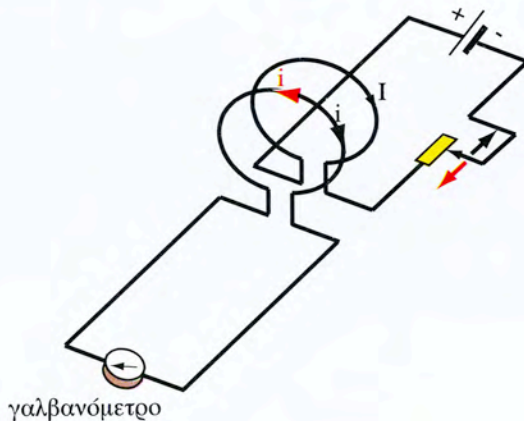
Ερωτήσεις

1. Δύο όμοιοι αγωγοί κινούνται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο κάθετα προς τις μαγνητικές γραμμές. Ο πρώτος αγωγός έχει διπλάσια ταχύτητα από το δεύτερο. Σε ποιο πηνίο αναπτύσσεται μεγαλύτερη ΗΕΔ εξ επαγωγής και γιατί;
2. Στο παρακάτω σχέδιο



αν πλησιάσουμε τα δυο κυκλώματα, θα αποκλίνει ο δείκτης του γαλβανόμετρου; Δικαιολογήστε την απάντηση.

- Ποια θα είναι η φορά του ρεύματος αν απομακρύνουμε τα δύο κυκλώματα;
3. Στο παρακάτω σχέδιο



αν μεταβάλουμε απότομα το ρεύμα στο πρωτεύον κύκλωμα μετακινώντας την κινητή επαφή του ροοστάτη, τι θα παρατηρήσουμε στο γαλβανόμετρο του άλλου κυκλώματος; Δικαιολογήστε τη φορά του ρεύματος που φαίνεται στο σχήμα όταν αυξάνεται ή ελαττώνεται η αντίσταση του ροοστάτη.

4. Σε δύο πηνία Π_1 και Π_2 μεταβάλλεται η μαγνητική ροή με τον ίδιο ρυθμό. Το πρώτο πηνίο έχει διπλάσιες σπείρες από το δεύτερο. Σε ποιο πηνίο θα αναπτυχθεί μεγαλύτερη ΗΕΔ εξ επαγωγής και γιατί;
5. Ένας αγωγός κινείται κάθετα προς τις γραμμές ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου:
 - α. Διπλασιάζουμε την ταχύτητά του.
 - β. Μειώνουμε στο μισό τη μαγνητική επαγωγή του πεδίου.
 Σε καθεμιά από τις δυο περιπτώσεις πώς θα μεταβληθεί η ΗΕΔ εξ επαγωγής που θα αναπτυχθεί στον αγωγό;
6. Πώς αλλάζει ο συντελεστής αυτεπαγωγής ενός πηνίου όταν αυξάνει η μαγνητική του αντίσταση;
7. Δύο πηνία διαφέρουν μόνο κατά τον αριθμό των σπειρών τους. Ποιό από τα δύο έχει μεγαλύτερο συντελεστή αυτεπαγωγής;
8. Αν στο εσωτερικό ενός πηνίου τοποθετήσουμε ένα σιδερένιο πυρήνα, μεταβάλλεται και πώς ο συντελεστής αυτεπαγωγής του;
9. Κατά το άνοιγμα του διακόπτη ενός κυκλώματος πώς εμφανίζεται το φαινόμενο της αυτεπαγωγής; Τι επιπτώσεις έχει αυτό και πώς αντιμετωπίζονται αυτές οι επιπτώσεις.
10. Κατά την τροφοδότηση ενός κυκλώματος με αντίσταση R και συντελεστή αυτεπαγωγής L με ποιους τρόπους μπορεί να γίνει ταχύτερη η αποκατάσταση της τελικής τιμής του ρεύματος;

Ασκήσεις

1. Μέσα σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο με $B=2\text{T}$ κινείται ένας ευθύγραμμος αγωγός με ταχύτητα $v=8\text{m/s}$ κάθετα προς τις μαγνητικές γραμμές. Αν το μήκος του αγωγού είναι 50 cm πόση είναι η ΗΕΔ που αναπτύσσεται σε αυτόν από επαγωγή.

Απ.: $E=8\text{V}$

2. Να βρεθεί η ΗΕΔ που αναπτύσσεται σε ένα πηνίο, το οποίο έχει 100 σπείρες, όταν η μαγνητική ροή που περνά μέσα από κάθε σπείρα μεταβάλλεται κατά $0,002\text{ Wb}$ σε χρόνο $0,01\text{ s}$.

Απ.: 20 V

3. Το ρεύμα που περνά από ένα πηνίο μεταβάλλεται κατά 20 A μέσα σε χρονικό διάστημα $0,02\text{ s}$. Αν ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου είναι $0,1\text{H}$ ποια η τιμή της ΗΕΔ που αναπτύσσεται από αυτεπαγωγή στο πηνίο;

Απ.: 100 V

4. Το ρεύμα ενός πηνίου μεταβάλλεται κατά 32 A σε χρόνο $0,02\text{ s}$. Η ΗΕΔ από αυτεπαγωγή που αναπτύσσεται στο πηνίο είναι 96 V . Να υπολογιστεί ο συντελεστής αυτεπαγωγής L του πηνίου.

Απ.: $L=0,06\text{ H}$

5. Ποια η σταθερά χρόνου ενός πηνίου που έχει συντελεστή αυτεπαγωγής $L=1\text{H}$ και αντίσταση $R=4\Omega$.

Απ.: $T=0,25\text{ s}$

Ενότητα 3.5

Το ηλεκτρικό ρεύμα σε μαγνητικό πεδίο

“Διδακτικοί στόχοι”

Με τη μελέτη της ενότητας αυτής οι μαθητές θα είναι σε θέση:

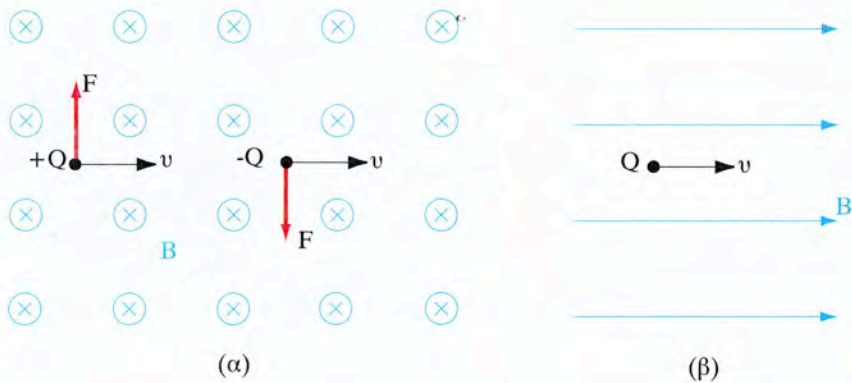
- να γνωρίζουν ότι το μαγνητικό πεδίο ασκεί δυνάμεις σε κινούμενα ηλεκτρικά φορτία και σε ρευματοφόρους αγωγούς.
- να γνωρίζουν πώς να υπολογίζεται η δύναμη που ασκείται σε ένα ηλεκτρικό φορτίο όταν κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο κάθετα προς τις μαγνητικές γραμμές.
- να υπολογίζουν την δύναμη που ασκείται σε έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα όταν βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο.
- να υπολογίζουν την δύναμη που ασκείται μεταξύ δύο παράλληλων αγωγών που διαρρέονται από ρεύμα.

3.5.1. Δύναμη σε κινούμενο φορτίο

Όπως είδαμε στην ενότητα 3.1, τα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία παράγουν γύρω τους ένα μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό αυτό πεδίο αλληλεπιδρά με τα άλλα μαγνητικά πεδία, ακριβώς, όπως δυο μαγνήτες που ασκούν δυνάμεις ο ένας στον άλλον.

Έτσι, αν ένα κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο (ή ένας ρευματοφόρος αγωγός) βρίσκεται στο χώρο ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (π.χ. κοντά σε ένα μόνιμο μαγνήτη), το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο θα δεχτεί την επίδραση του μόνιμου μαγνήτη και κατά συνέπεια θα ασκηθεί πάνω στο φορτίο (ή στο ρευματοφόρο αγωγό) μια **δύναμη** προερχόμενη από το μαγνητικό πεδίο.

Έστω ότι έχουμε ένα σημειακό ηλεκτρικό φορτίο Q το οποίο κινείται με ταχύτητα v μέσα σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} (Σχ. 3.5.1). Τότε θα ασκηθεί πάνω του μία δύναμη \mathbf{F} , όπως φαίνεται στις περιπτώσεις του Σχ. 3.5.1α.



Σχήμα 3.5.1: Φορτίο κινούμενο σε μαγνητικό πεδίο

Όταν το φορτίο κινείται παράλληλα με τις μαγνητικές γραμμές (Σχ. 3.5.1β), η τιμή της δύναμης F είναι μηδέν. Δεν ασκείται δηλαδή καμία δύναμη πάνω στο φορτίο από το μαγνητικό πεδίο. Όταν το φορτίο κινείται κάθετα προς τις

μαγνητικές γραμμές τότε η δύναμη F που ασκείται από το μαγνητικό πεδίο παίρνει τη μέγιστη τιμή της. Σε οποιαδήποτε άλλη γωνία κίνησης του φορτίου ως προς τις μαγνητικές γραμμές, η τιμή της ασκούμενης δύναμης κυμαίνεται μεταξύ του μηδενός και της μέγιστης τιμής.

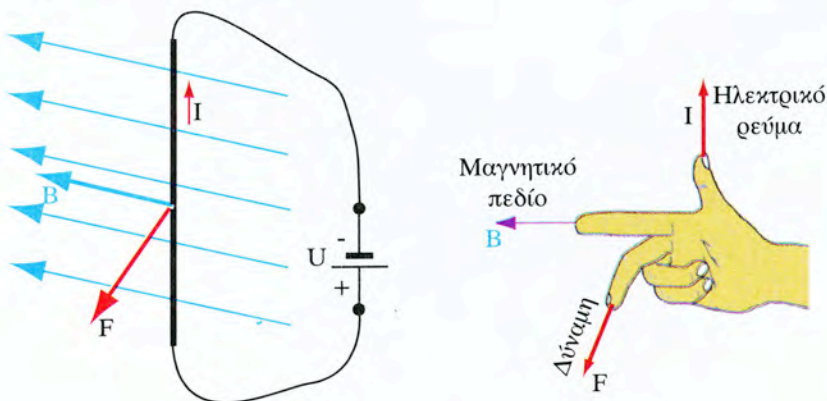
Η μέγιστη τιμή της δύναμης F , όταν το φορτίο κινείται **κάθετα** προς τις μαγνητικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, δίνεται από τον τύπο:

$$F = Q \cdot B \cdot v \quad (3.5.1)$$

Όταν η μαγνητική επαγωγή B μετριέται σε τέσλα (T), το φορτίο Q σε κουλόμπ (C) και η ταχύτητα v σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s), η δύναμη F προκύπτει σε νιούτον (N). Συνεπώς:

□ Η δύναμη που ασκείται σε ένα φορτίο κινούμενο κάθετα προς τις μαγνητικές γραμμές είναι ανάλογη με την ταχύτητα του φορτίου, με το φορτίο και με τη μαγνητική επαγωγή του πεδίου.

Η δύναμη F είναι κάθετη προς το επίπεδο που ορίζουν η ταχύτητα του φορτίου και η διεύθυνση της μαγνητικής επαγωγής. Η φορά της δύναμης εξαρτάται, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5.1, από το αν το φορτίο είναι αρνητικό ή θετικό και ο προσδιορισμός της φοράς της γίνεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού (Σχ.3.5.2).



Σχίμα 3.5.2: Προσδιορισμός φοράς δύναμης με τον κανόνα του δεξιού χεριού

Για να προσδιορίσουμε τη φορά της δύναμης που ασκείται από το μαγνητικό πεδίο σε ένα κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο ο αντίχειρας του **δεξιού** χεριού πρέπει να δείχνει τη φορά της κίνησης ενός **θετικού** φορτίου και ο δείκτης τη φορά της μαγνητικής επαγωγής. Ο μεσαίος δείχνει τότε τη φορά της δύναμης (Σχ.3.5.2). Αν το κινούμενο φορτίο είναι θετικό τότε η φορά της κίνησής του μας δίνει και τη φορά του **ηλεκτρικού ρεύματος** που προκαλεί η κίνηση του φορτίου. Αν το φορτίο είναι **αρνητικό**, τότε η φορά του προκαλούμενου ηλεκτρικού ρεύματος είναι **αντίθετη** από την κίνησή του. Στην περίπτωση αρνητικού φορτίου λοιπόν, για να βρούμε τη φορά της δύναμης που ασκεί το μαγνητικό πεδίο με τον κανόνα του δεξιού χεριού, ο αντίχειρας πρέπει να δείχνει προς την αντίθετη κατεύθυνση από την κίνηση του φορτίου.

> Παράδειγμα 1

Ένα ηλεκτρόνιο κινείται με ταχύτητα $v=5 \times 10^5$ m/s κάθετα προς τις μαγνητικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου με μαγνητική επαγωγή $B=1$ T. Να υπολογιστεί η δύναμη F που ασκείται από το μαγνητικό πεδίο στο ηλεκτρόνιο.

Λύση

Γνωρίζουμε ότι το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου είναι $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C.

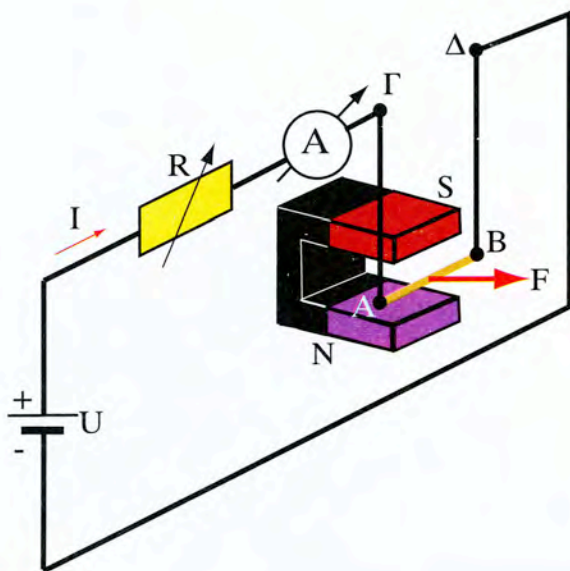
Από τον τύπο (3.5.1) έχουμε:

$$F = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) (1\text{T}) (5 \times 10^5) \text{ m / s} = 1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^5 \text{ N} = 8 \times 10^{-14} \text{ N}$$

Απάντηση: Ασκείται δύναμη 8×10^{-14} N

3.5.2. Επίδραση του μαγνητικού πεδίου σε ρευματοφόρο αγωγό

Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο τέμνοντας τις μαγνητικές γραμμές ασκείται επάνω του μία δύναμη. Ξέρουμε επίσης ότι το ηλεκτρικό ρεύμα είναι κινούμενα ηλεκτρικά φορτία τα οποία σε ένα μεταλλικό αγωγό είναι τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια. Επομένως αν τοποθετήσουμε μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα, θα ασκηθεί επάνω στα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία (και άρα πάνω στον αγωγό) μία δύναμη από το μαγνητικό πεδίο. Για να το διαπιστώσουμε κάνουμε το πείραμα του Σχ.3.5.3.



Σχήμα 3.5.3. Δύναμη σε ρευματοφόρο αγωγό

Ο αγωγός AB είναι αναρτημένος από δύο σταθερά σημεία Γ, Δ με τα οποία συνδέεται με εύκαμπτους αγωγούς και μπορεί να μετακινηθεί. Πριν πλησιάσουμε το μαγνήτη, ο αγωγός AB ισορροπεί και οι αγωγοί ΓΑ και ΔΒ είναι κατακόρυφοι. Όταν πλησιάσουμε τον μαγνήτη και κλείσουμε τον διακόπτη του κυκλώματος θα διαπιστώσουμε ότι ο αγωγός AB θα μετακινηθεί και θα

ισορροπήσει σε μία άλλη θέση κάτω από την επίδραση του μαγνητικού πεδίου. Αυτό σημαίνει ότι στον αγωγό ασκείται μία δύναμη \mathbf{F} . Τη δύναμη αυτή την ονομάζουμε **δύναμη Λαπλάς** (Laplace).

Όταν ο αγωγός είναι παράλληλος προς τις μαγνητικές γραμμές δεν ασκείται καμία δύναμη πάνω του. Αντίθετα όταν είναι κάθετος προς τις μαγνητικές γραμμές η δύναμη παίρνει τη μέγιστη τιμή της. Σε όλες τις άλλες θέσεις του αγωγού η τιμή της δύναμης κυμαίνεται μεταξύ του μηδενός και της μέγιστης τιμής. Στην περίπτωση που ο αγωγός είναι **κάθετος** προς τις μαγνητικές γραμμές του πεδίου το μέτρο της δύναμης Λαπλάς δίνεται από τη σχέση:

$$F = B \cdot I \cdot \ell \quad (3.5.2)$$

όπου I σε αμπέρ, B σε τέσλα, ℓ σε μέτρα και F σε νιούτον. Συνεπώς:

□ Η δύναμη Λαπλάς είναι ανάλογη με την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό, ανάλογη με τη μαγνητική επαγωγή του μαγνητικού πεδίου και ανάλογη με το μήκος του αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο.

Η διεύθυνση της δύναμης είναι κάθετη προς το επίπεδο που ορίζουν το ρεύμα I και η μαγνητική επαγωγή \vec{B} . Η φορά της δύναμης προσδιορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού, που είδαμε στο Σχ. 3.5.2. Όταν ο αντίχειρας του δεξιού χεριού δείχνει τη φορά του ρεύματος I και ο δείκτης τη φορά του μαγνητικού πεδίου \vec{B} τότε ο μεσαίος δείχνει τη φορά της δύναμης \vec{F} .

Στη δύναμη Λαπλάς βασίζεται η λειτουργία των ηλεκτρικών κινητήρων.

➤ Παράδειγμα 2

Ένας αγωγός μήκους 0,5 m βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο $B=2\text{T}$ και διαρρέεται από ρεύμα $I = 10\text{ A}$. Ο αγωγός είναι κάθετος προς τις μαγνητικές γραμμές του πεδίου. Να βρεθεί η δύναμη που ασκείται πάνω στον αγωγό.

Λύση

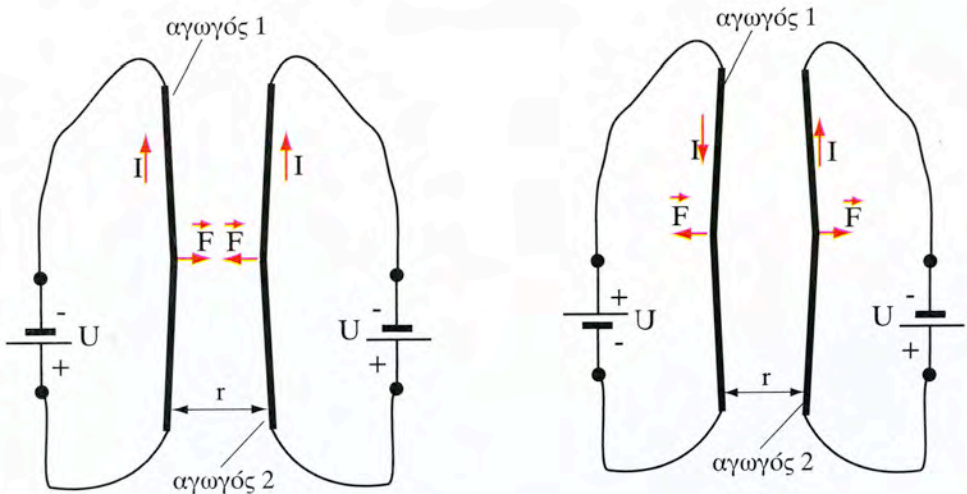
Ο τύπος (3.5.2) μας δίνει τη δύναμη. Αντικαθιστούμε τα μεγέθη με τα δεδομένα της άσκησης και έχουμε :

$$F = 10\text{A} \times 2\text{T} \times 0.5\text{m} = 10\text{N}$$

Απάντηση: Ασκείται δύναμη 10 N

3.5.3. Δυνάμεις μεταξύ αγωγών που διαρρέονται από ρεύμα

Γνωρίζουμε ότι γύρω από ένα ρευματοφόρο αγωγό δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Επίσης γνωρίζουμε ότι, αν μέσα σε μαγνητικό πεδίο φέρουμε ένα ρευματοφόρο αγωγό, αυτό θα δεχτεί μία δύναμη, που την ονομάσαμε δύναμη Λαπλάς.



Σχήμα 3.5.4: Δυνάμεις μεταξύ ρευματοφόρων αγωγών

Στο Σχ. 3.5.4 βλέπουμε δύο ρευματοφόρους αγωγούς παράλληλους και σε σχετικά μικρή απόσταση. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, αφού ο καθένας βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο του άλλου θα ασκηθεί μία δύναμη Λαπλάς από τον ένα αγωγό στον άλλον και αντίστροφα.

Συγκεκριμένα έχουμε βρει τη σχέση (3.2.5) που μας δίνει την ένταση μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσει ένας αγωγός διαρρεόμενος από ρεύμα. Συνεπώς η ένταση H_1 του μαγνητικού πεδίου που προκαλεί ο αγωγός 1 σε απόσταση r (εκεί δηλαδή που βρίσκεται ο δεύτερος αγωγός) δίνεται από τη σχέση:

$$H_1 = \frac{I_1}{2\pi r}$$

Εάν οι δυο αγωγοί βρίσκονται στον αέρα, η μαγνητική επαγωγή του πεδίου του αγωγού 1 στη θέση που βρίσκεται ο αγωγός 2 είναι:

$$B_1 = \mu_0 H_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

Η μαγνητική επαγωγή B_1 είναι η ίδια σε όλα τα σημεία του αγωγού 2 και είναι κάθετη προς τον αγωγό. Άρα, σύμφωνα με τον τύπο (3.5.2) η δύναμη Λαπλάς που ασκείται στον αγωγό 2 από το μαγνητικό πεδίο του αγωγού 1 δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{r} \ell \quad (3.5.3)$$

Προφανώς η ίδια ακριβώς δύναμη ασκείται από το μαγνητικό πεδίο του αγωγού 2 στον αγωγό 1.

Σύμφωνα με τη σχέση (3.5.3):

□ Η δύναμη Λαπλάς μεταξύ δύο παράλληλων ρευματοφόρων αγωγών είναι ανάλογη του γινομένου των εντάσεων των δύο ρευμάτων και του μήκους των αγωγών και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης μεταξύ των αγωγών.

Οι δυνάμεις στους αγωγούς μπορεί να είναι ελκτικές ή απωστικές. Λαμβάνοντας υπόψη τη φορά του μαγνητικού πεδίου που προκαλεί κάθε αγωγός και τον κανόνα του δεξιού χεριού μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι, όταν τα ρεύματα έχουν **την ίδια φορά** οι δυνάμεις μεταξύ των αγωγών είναι **ελκτικές**. Όταν όμως τα ρεύματα έχουν **αντίθετες φορές** οι δυνάμεις μεταξύ των αγωγών είναι **απωστικές**.

> Παράδειγμα 3

Δύο παράλληλοι αγωγοί μήκους 1m βρίσκονται σε απόσταση 10 cm μεταξύ τους και διαρρέονται από ρεύμα 100 A ο καθένας. Να βρεθεί η δύναμη F που ασκείται μεταξύ τους. Αν τα ρεύματα είναι αντίθετης φοράς, έλκονται ή απωθούνται οι αγωγοί;

Λύση

Από τη σχέση (3.5.3) έχουμε:

$$F = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \frac{100 \text{ A} \times 100 \text{ A}}{0,1 \text{ m}} \times 1 \text{ m} = \frac{2}{10^7} \frac{10^4}{0,1} = 20 \times 10^{-3} \text{ N} = 20 \text{ mN}$$

Απάντηση: Οι αγωγοί απωθούνται με δύναμη $F=20 \text{ mN}$

Ανακεφαλαίωση

- Όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο τέμνοντας τις μαγνητικές γραμμές, ασκείται πάνω του μία δύναμη ανάλογη με την ταχύτητά του και τη μαγνητική επαγωγή του πεδίου.
- Όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε ασκείται πάνω στον αγωγό μία δύναμη που ονομάζεται δύναμη Λαπλάς.
- Όταν δύο παράλληλοι αγωγοί διαρρέονται από ρεύμα, ασκούνται μεταξύ τους δυνάμεις που είναι τόσο μεγαλύτερες, όσο πιο κοντά βρίσκονται οι αγωγοί και, όσο ισχυρότερα είναι τα ρεύματα που τους διαρρέουν.
- Όταν τα ρεύματα των δυο αγωγών έχουν την ίδια φορά οι δυνάμεις μεταξύ των αγωγών είναι ελκτικές, ενώ όταν τα ρεύματα έχουν αντίθετη φορά οι δυνάμεις είναι απωστικές.

Ερωτήσεις

1. Συγκρίνετε μεταξύ τους τις δυνάμεις που θα δεχτούν ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο, αν κινούνται με την ίδια ταχύτητα σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο κάθετα προς τις μαγνητικές γραμμές του πεδίου. Δικαιολογήστε την απάντησή σας.
2. Ένα σημειακό φορτίο Q , που κινείται με ταχύτητα v σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο, δέχεται μία δύναμη F . Αν αλλάξει η φορά του μαγνητικού πεδίου, η κίνηση του φορτίου θα επηρεαστεί ;
3. Πόσο θα αλλάξει η δύναμη F που δέχεται ένα κινούμενο φορτίο μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, αν η ταχύτητά του διπλασιαστεί;
4. Στο πείραμα του Σχ. 3.5.3, αν εναλλάξουμε τους πόλους του μαγνήτη τι θα κάνει ο αγωγός;
5. Η δύναμη F που δέχεται ένας ρευματοφόρος αγωγός μέσα σε μαγνητικό πεδίο πώς θα επηρεαστεί αν τριπλασιάσουμε το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό;
6. Τι μπορούμε να κάνουμε για να μειώσουμε τη δύναμη που δέχεται ένας ρευματοφόρος αγωγός, που βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο;
7. Σε δύο παράλληλους αγωγούς που διαρρέονται από ρεύματα I_1 και I_2 :
 - α. διπλασιάζουμε την ένταση ρεύματος του ενός αγωγού.
 - β. διπλασιάζουμε την ένταση ρεύματος και των δύο αγωγών.
 - γ. διπλασιάζουμε την απόσταση μεταξύ τους.
 Πώς μεταβάλλεται σε κάθε μια από τις τρεις αυτές περιπτώσεις η δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ τους;
8. Εξηγήστε γιατί, όταν δύο ρευματοφόροι αγωγοί έχουν την ίδια φορά ρεύματος, οι ασκούμενες μεταξύ τους δυνάμεις είναι ελκτικές.

Ασκήσεις

1. Ένα φορτίο $Q=10\text{ C}$ κινείται κάθετα προς τις μαγνητικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου με ταχύτητα $v=10\text{ m/s}$. Η μαγνητική επαγωγή του πεδίου είναι $B=1\text{ T}$. Να βρεθεί η δύναμη που ασκεί το πεδίο στο φορτίο.

Απ: $F=100\text{ N}$

2. Ένας ρευματοφόρος αγωγός που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο δέχεται δύναμη $F=40\text{ N}$. Αν η μαγνητική επαγωγή του πεδίου είναι $B=2\text{ T}$ και το μήκος του αγωγού είναι 1 m να βρεθεί η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

Απ: $I=20\text{ A}$

3. Δύο παράλληλοι ρευματοφόροι αγωγοί μήκους 2 m βρίσκονται στον αέρα σε απόσταση μεταξύ τους $r=10\text{ cm}$ και διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα I . Να βρεθεί η ένταση του ρεύματος I , αν η δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ των αγωγών είναι $F=1\text{ N}$.

Απ: $I=500\text{ A}$