

(4.6.) Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

α) Μαγνητική ροή

Έστω το ομογενές μαγνητικό πεδίο του σχήματος έντασης B (Εικ. 49). Μέσα σ' αυτό και κάθετα στις δυναμικές γραμμές θεωρούμε μία επιφάνεια που έχει εμβαδόν S .

Το γινόμενο της έντασης B του μαγνητικού πεδίου επί το εμβαδό S της επιφάνειας ορίζεται σαν ένα νέο φυσικό μέγεθος που ονομάζουμε ροή και συμβολίζεται με Φ , δηλαδή

$$\Phi = BS \quad (7)$$

Η μονάδα της μαγνητικής ροής ονομάζεται Weber, συμβολίζεται με Wb και προκύπτει από το γινόμενο της μονάδας της έντασης του μαγνητικού πεδίου επί τη μονάδα της επιφάνειας, δηλαδή

$$1\text{Wb} = 1\text{Tm}^2$$

Ξέρουμε ότι η ένταση B του μαγνητικού πεδίου μας δίνει την πυκνότητα των δυναμικών γραμμών δηλαδή τον αριθμό των δυναμικών γραμμών που περνούν ανά μονάδα επιφάνειας. Άρα η μαγνητική ροή, το γινόμενο δηλαδή BS , εκφράζει τον ολικό αριθμό των δυναμικών γραμμών που περνάνε από μία επιφάνεια S .

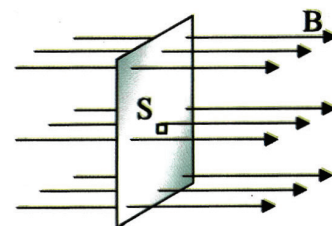
Αν η επιφάνεια S τοποθετηθεί πλάγια στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου τότε η μαγνητική ροή δίνεται από τη σχέση

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (8)$$

όπου α είναι η γωνία που σχηματίζει η κάθετη στην επιφάνεια με την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

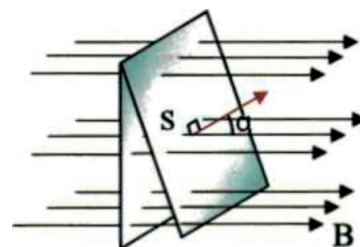
Όταν $\alpha = 0^\circ$ έχουμε $\cos 0^\circ = 1$ και $\Phi_{\max} = BS$. Όταν $\alpha = 90^\circ$ έχουμε $\cos 90^\circ = 0$ και $\Phi_{\min} = 0$. Αυτό θα συμβεί όταν ο αγωγός είναι παράλληλος στις δυναμικές οπότε καμία δυναμική γραμμή δεν διέρχεται από την επιφάνεια.

Αν μέσα σε κάποιο μαγνητικό πεδίο βάλουμε μία κλειστή επιφάνεια η ολική ροή που θα περνά μέσα από αυτή θα είναι μηδέν. Αυτό είναι φανερό επειδή όσες δυναμικές γραμμές μπαίνουν στην επιφάνεια τόσες βγαίνουν από αυτή. Πρέπει να αναφέρουμε επίσης ότι η μαγνητική ροή είναι μονόμετρο μέγεθος.



Η επιφάνεια είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές.

Εικόνα 4-49.



Η κάθετη στην επιφάνεια σχηματίζει γωνία α με τις δυναμικές γραμμές.

Εικόνα 4-50.

Παράδειγμα 6

Ένα τετράγωνο πλευράς $\alpha=10\text{cm}$ βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης $B=0,2\text{T}$. Να υπολογιστεί η ροή που περνά από το πλαίσιο όταν α) είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές, β) σχηματίζει γωνία $\phi=30^\circ$ με τις δυναμικές γραμμές, γ) είναι παράλληλο στις δυναμικές γραμμές.

Λύση

α) Όταν το πλαίσιο είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές τότε $\Phi=BS\sin\alpha$ όπου α είναι η γωνία που σχηματίζουν οι δυναμικές γραμμές με την κάθετη επιφάνεια.

$$\text{Άρα } \Phi = BS\sin 0^\circ \Rightarrow \Phi = 0,2\text{T}(10 \cdot 10^{-2}\text{m})^2 \cdot 1 \Rightarrow \Phi = 2 \cdot 10^{-3}\text{Wb}$$

β) Η κάθετη στην επιφάνεια με τις δυναμικές γραμμές σχηματίζει γωνία 60° άρα, η ροή που περνά μέσα από την επιφάνεια θα είναι:

$$\Phi = BS\sin 60^\circ \Rightarrow \Phi = 0,2\text{T}(10 \cdot 10^{-2}\text{m})^2 \frac{1}{2} \Rightarrow \Phi = 10^{-3}\text{Wb}$$

γ) Όταν το πλαίσιο βρεθεί παράλληλα με τις δυναμικές γραμμές, τότε η κάθετη στο πλαίσιο σχηματίζει γωνία 90° με τις δυναμικές γραμμές άρα η ροή που θα περνά από την επιφάνεια θα είναι:

$$\Phi = BS\sin 90^\circ \Rightarrow \Phi = 0$$

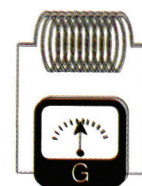
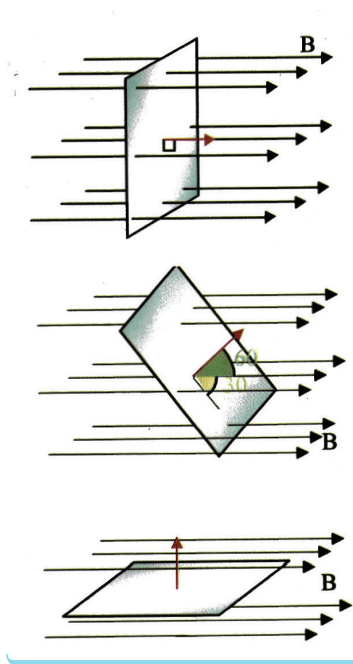
β) Ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή

Όπως μάθαμε το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Τώρα θα εξετάσουμε το αντίθετο. Δηλαδή τη δημιουργία ρεύματος από το μαγνητικό πεδίο. Ακριβέστερα βέβαια θα εξετάσουμε τη δημιουργία ηλεκτρεγερτικής δύναμης από το μαγνητικό πεδίο.

Το φαινόμενο αυτό ανακαλύφθηκε από τον Αγγλο Faraday και τον Αμερικανό Henry, έντεκα χρόνια αργότερα από τα πειράματα του Oersted και ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή ή απλά επαγωγή.

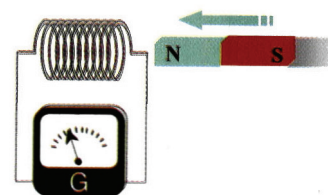
Συνδέουμε τις άκρες ενός πηνίου με ένα γαλβανόμετρο μηδενός. Αρχικά, βλέπουμε ότι ο δείκτης του οργάνου δεν έχει καμία απόκλιση. Η διαφορά δυναμικού δηλαδή στα άκρα του πηνίου είναι μηδέν.

Στη συνέχεια, παίρνουμε ένα μαγνήτη και τον πλησιάζουμε προς το πηνίο (Εικ. 52). Βλέπουμε τότε ότι ο δείκτης του οργάνου θα έχει κάποια απόκλιση. Στις άκρες του δηλαδή, θα υπάρχει κάποια διαφορά δυναμικού η οποία παύει να υπάρχει όταν ακινητοποιήσουμε το μαγνήτη. Αν αναστρέψουμε το μαγνήτη και κάνουμε το ίδιο πείραμα θα παρατηρήσουμε ότι ο δείκτης του οργάνου θα έχει κάποια απόκλιση αντίθετη όμως από την αρχική. Αυτό δείχνει ότι στα άκρα του πηνίου παρουσιάστηκε πάλι μία διαφορά δυναμικού, με αντίθετη όμως πολικότητα από την προηγούμενη.



Το γαλβανόμετρο δείχνει ένδειξη μηδέν.

Εικόνα 4-51.



Όταν ο μαγνήτης κινείται το όργανο δείχνει κάποια ένδειξη.

Εικόνα 4-52.

Αξίζει επίσης να παρατηρήσουμε ότι όσο πιο γρήγορα μετακινούμε το μαγνήτη μέσα στο πηνίο, τόσο πιο μεγάλη απόκλιση εμφανίζεται στο δείκτη του βολτομέτρου. Το ίδιο θα συμβεί αν χρησιμοποιήσουμε έναν πιο ισχυρό μαγνήτη.

Επαναλαμβάνουμε το ίδιο πείραμα με τη διαφοροποίηση όμως ότι αντί για μαγνήτη πλησιάζουμε προς το πηνίο ένα σωληνοειδές, που διαρρέεται από ρεύμα σταθερής έντασης. Θα παρατηρήσουμε τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα που παρατηρήσαμε όταν χρησιμοποιήσαμε το μαγνήτη (Εικ. 54).

Αν τώρα το σωληνοειδές το ακινητοποιήσουμε μέσα στο πηνίο ή πολύ κοντά σ' αυτό και μεταβάλλουμε την ένταση του ρεύματος που το διαρρέει, θα δούμε ότι αναπτύσσεται στις άκρες του πηνίου κάποια διαφορά δυναμικού όσο χρόνο εμείς μεταβάλλουμε την ένταση του ρεύματος. Όταν σταματήσουμε να μεταβάλουμε την ένταση, ο δείκτης του γαλβανομέτρου μηδενός δεν εμφανίζει καμία απόκλιση.

Επειδή η κίνηση είναι σχετική, τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα θα παρατηρήσουμε αν αντί να μετακινούμε το μαγνήτη ή το σωληνοειδές, μετακινούμε το πηνίο.

Εξήγηση του φαινομένου της επαγωγής

Είδαμε ότι το φαινόμενο της επαγωγής είναι άμεσα συνδεδεμένο με την κίνηση του μαγνήτη. Η κίνηση αυτή προκαλεί μεταβολή της μαγνητικής ροής που διέρχεται μέσα από τις σπείρες του πηνίου.

Το ίδιο συμβαίνει και όταν πλησιάζουμε ή απομακρύνουμε το σωληνοειδές, το οποίο όπως ξέρουμε, συμπεριφέρεται σαν ένας μαγνήτης.

Όμως, όπως είδαμε το φαινόμενο της επαγωγής παρατηρείται ακόμα και αν ακινητοποιήσουμε το σωληνοειδές και μεταβάλουμε την ένταση του ρεύματος. Η μεταβολή όμως, της έντασης του ρεύματος του σωληνοειδούς, προκαλεί μεταβολή της έντασης μαγνητικού του πεδίου και άρα μεταβολή της μαγνητικής ροής που διέρχεται μέσα από αυτό και κατά συνέπεια και μέσα από το πηνίο.

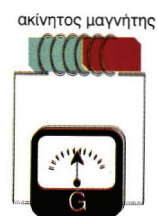
Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι:

Η μεταβολή με οποιονδήποτε τρόπο της μαγνητικής ροής που περνά από τις σπείρες ενός πηνίου προκαλεί ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης στο πηνίο που διαρκεί όσο χρόνο διαρκεί η μεταβολή της μαγνητικής ροής.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζουμε επαγωγή.

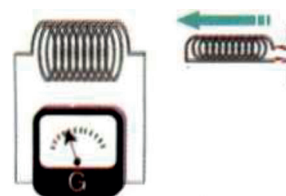
γ) Νόμος επαγωγής (Faraday)

Είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο ότι η επαγωγική τάση είναι μεγαλύτερη, όταν στο πηνίο πλησιάσουμε με την ίδια ταχύτητα ένα ισχυρότερο μαγνήτη. Η μεγαλύτερη επαγωγική τάση του πηνίου είναι φανερό ότι οφείλεται στη μεγαλύτερη μεταβολή της μαγνητικής ροής, αφού όλα τα άλλα μεγέθη παραμένουν σταθερά. Δηλαδή



Όταν ο μαγνήτης είναι ακίνητος το όργανο δεν δείχνει ένδειξη.

Εικόνα 4-53.



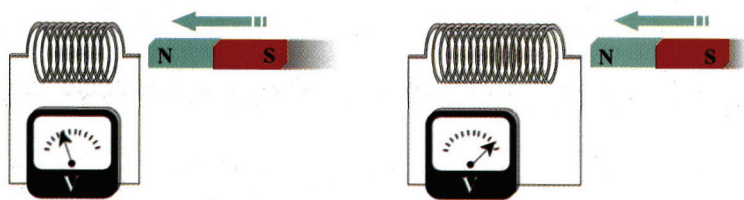
Όσο το ρευματοφόρο σωληνοειδές κινείται το όργανο δείχνει κάποια ένδειξη.

Εικόνα 4-54.

η επαγωγική τάση του πηνίου είναι μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη γίνεται η μεταβολή της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό κάθε σπείρας του πηνίου.

Είδαμε επίσης ότι, όσο πιο γρήγορα πλησιάζουμε τον ίδιο μαγνήτη στο πηνίο τόσο μεγαλύτερη επαγωγική τάση παίρνουμε στο πηνίο. Δηλαδή η επαγωγική τάση του πηνίου για την ίδια μεταβολή της ροής, είναι μεγαλύτερη, όσο μικρότερος είναι ο χρόνος μεταβολής της ροής.

Τέλος, με ένα απλό πείραμα βλέπουμε ότι η επαγωγική τάση γίνεται μεγαλύτερη, όσο μεγαλώνει ο αριθμός των σπειρών του πηνίου, εφόσον ο ίδιος μαγνήτης πλησιάζει το πηνίο με την ίδια ταχύτητα (Εικ.55).



Εικόνα 4-55. Μεγαλύτερη ΗΕΔ αναπτύσσεται στο πηνίο με τις περισσότερες σπείρες.

Συνοψίζοντας τώρα τα συμπεράσματα από τα παραπάνω πειράματα παίρνουμε τον ακόλουθο νόμο της επαγωγής (Νόμος Faraday):

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή που δημιουργείται σε ένα πηνίο είναι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής $\Delta\Phi/\Delta t$ και ανάλογη με τον αριθμό N των σπειρών του πηνίου

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} N \quad (9)$$

$$\text{Μονάδα στο SI: } \frac{1\text{Wb}}{\text{s}} = 1\text{V}$$

Η σημασία του αρνητικού προσήμου δικαιολογείται με τον κανόνα Lenz που περιγράφεται πιο κάτω.

Δώσαμε το νόμο της επαγωγής με τη βοήθεια ενός πηνίου, είναι φανερό όμως, ότι **ισχύει για οποιοδήποτε κύκλωμα**. Τότε ο τύπος θα γίνεται:

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

Επειδή συνήθως μας ενδιαφέρει το μέτρο της επαγωγικής τάσης το αρνητικό πρόσημο μπορούμε να το παραλείψουμε.

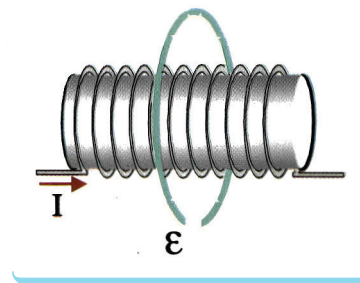
Με τη βοήθεια του νόμου της επαγωγής μπορούμε τώρα να δώσουμε τον ορισμό της μονάδας της μαγνητικής ροής:

1Wb είναι η μαγνητική ροή η οποία όταν περνά από μία σπείρα και ελαττώνεται ομοιόμορφα ως την τιμή μηδέν μέσα σε 1 s, αναπτύσσει ΗΕΔ επαγωγής ίση με 1 V.

$$1\text{Wb}=1\text{V}\cdot\text{s}$$

Παράδειγμα 7

Ένα σωληνοειδές έχει 100 σπείρες/m, κάθε σπείρα έχει εμβαδόν $S=0,2\text{m}^2$ και διαρρέεται από ρεύμα έντασης $I=10\text{A}$. Στο κέντρο του σωληνοειδούς και κάθετα προς τον άξονά του βρίσκεται ένας κυκλικός αγωγός που περιβάλλει το σωληνοειδές. Αν διπλασιαστεί η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σωληνοειδές σε χρόνο $\Delta t=0,01\text{s}$ να υπολογιστεί η επαγωγική τάση που θα αναπτυχθεί στον κυκλικό αγωγό.



Λύση

Αρχικά η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του σωληνοειδούς είναι:

$$B_1 = k_\mu 4\pi \frac{N}{\ell} I_1 \Rightarrow B_1 = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} 4\pi \frac{100}{1\text{m}} 10\text{A} \Rightarrow B_1 = 4\pi 10^{-4}\text{T}$$

Όταν διπλασιάσουμε την ένταση του ρεύματος, θα διπλασιαστεί και η ένταση του μαγνητικού πεδίου, αφού αυτή είναι ανάλογη προς το ρεύμα, δηλαδή θα γίνει $B_2 = 8\pi 10^{-4}\text{T}$.

Η μεταβολή της ροής πάνω στο κυκλικό αγωγό θα είναι:

$$\Delta\Phi = \Phi_{\text{τελ}} - \Phi_{\text{αρχ}} \Rightarrow \Delta\Phi = B_2 S - B_1 S$$

Άρα η ΗΕΔ επαγωγής που θα αναπτυχθεί στις άκρες του κυκλικού αγωγού θα είναι:

$$\mathcal{E} = \frac{|\Delta\Phi|}{\Delta t} \Rightarrow \mathcal{E} = \frac{|B_2 S - B_1 S|}{\Delta t}$$

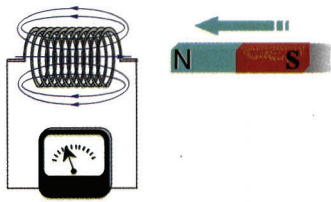
$$\mathcal{E} = \frac{8\pi 10^{-4}\text{T} \cdot 2\text{m}^2 - 4\pi 10^{-4}\text{T} \cdot 2\text{m}^2}{0,1\pi\text{s}} \Rightarrow \mathcal{E} = 8 \cdot 10^{-3}\text{V} \Rightarrow \mathcal{E} = 8\text{mV}$$

δ) Επαγωγικό ρεύμα

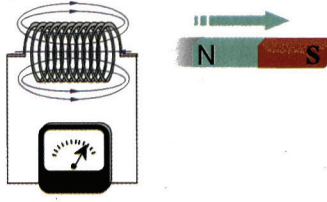
Αν στις άκρες ενός πηνίου συνδέσουμε ένα ευαίσθητο γαλβανόμετρο, θα παρατηρήσουμε ότι η οποιαδήποτε **μεταβολή της ροής** στο πηνίο συνοδεύεται από τη **δημιουργία κάποιου ρεύματος**. Το ρεύμα αυτό, ονομάζουμε, επαγωγικό ρεύμα και θα διαρκεί όσο χρόνο διαρκεί και η μεταβολή της ροής.

Η δημιουργία επαγωγικής τάσης είναι αποτέλεσμα της μεταβολής της ροής. Η δημιουργία όμως επαγωγικού ρεύματος προϋποθέτει ότι το κύκλωμα στο οποίο συμβαίνει η μεταβολή της ροής θα είναι **κλειστό**.

Ας δούμε μερικούς τρόπους παραγωγής επαγωγικών ρευμάτων.

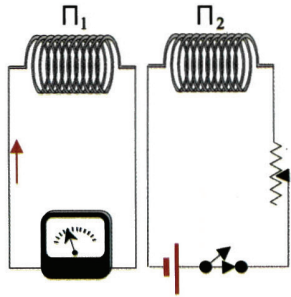


Εικόνα 4-56. Ο μαγνήτης πλησιάζει.

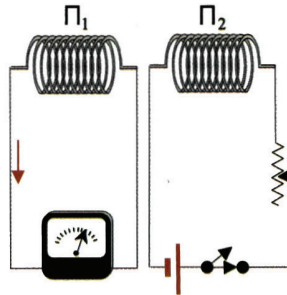


Εικόνα 4-57. Ο μαγνήτης απομακρύνεται.

Πλησιάζοντας (εικ. 56) ή απομακρύνοντας (εικ. 57) το νότιο πόλο του μαγνήτη, το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα οπότε το δεξιό άκρο του σωληνοειδούς γίνεται αντίστοιχα νότιος ή βόρειος πόλος.



Εικόνα 4-58. Αύξηση της έντασης στο Π_2 .

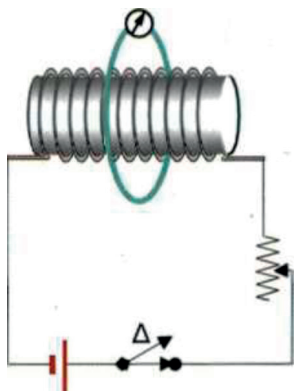


Εικόνα 4-59. Μείωση της έντασης στο Π_2 .

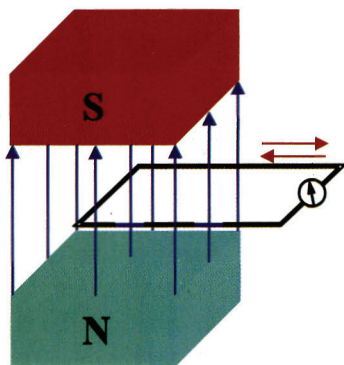
Όταν διακόπτουμε το ρεύμα στο σωληνοειδές παρατηρούμε ότι ο κυκλικός αγωγός διαρρέεται από ρεύμα η ένταση του οποίου αλλάζει με την αποκατάσταση του ρεύματος στο σωληνοειδές (Εικ. 60).

Κάθετα σε ένα ισχυρό ηλεκτρομαγνήτη τοποθετούμε ένα συμμάτινο πλαίσιο (Εικ. 61). Μετακινώντας το πλαίσιο προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά, βλέπουμε με τη βοήθεια γαλβανόμετρου ρεύμα η φορά του οποίου αλλάζει ανάλογα με την κίνηση του πλαισίου και μηδενίζεται, όταν το πλαίσιο ακινητοποιείται ή είναι ολόκληρο μέσα στο πεδίο.

Για όσο χρόνο μεταβάλλεται η ένταση στο πηνίο Π_2 βλέπουμε το αμπερόμετρο να δείχνει ρεύμα στο πηνίο Π_1 . Παρατηρούμε επίσης ότι, όταν αυξάνουμε το ρεύμα στο πηνίο Π_2 , το δεξιό άκρο του πηνίου Π_1 γίνεται βόρειος πόλος, ενώ όταν το ελαττώνουμε, γίνεται νότιος πόλος.



Εικόνα 4-60. Η φορά του ρεύματος αλλάζει αν ανοίγουμε ή κλείνουμε το διακόπτη.

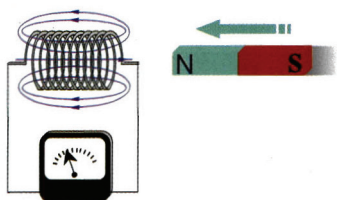


Εικόνα 4-61. Η φορά του ρεύματος αλλάζει αλλάζοντας τη φορά κίνησης του πλαισίου.

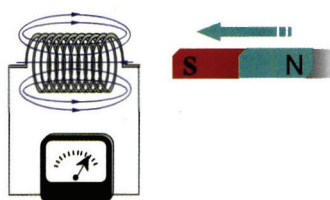
Κανόνας του Lenz

Ο νόμος του Faraday δίνει το μέτρο της ΗΕΔ από επαγωγή, η φορά όμως του επαγωγικού ρεύματος καθορίζεται από τον κανόνα του Lenz (Heinrich F. Lenz. 1804-1865).

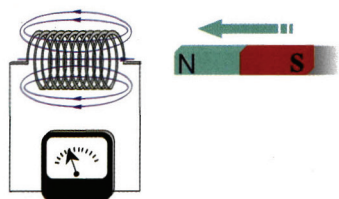
Κάνοντας το παρακάτω πείραμα με τη βοήθεια του γαλβανόμετρου βλέπουμε ότι, όταν ο μαγνήτης πλησιάζει το πηνίο με το βόρειο ή το νότιο πόλο, τότε το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται αντίστοιχα βόρειος ή νότιος πόλος, ώστε να αντιστέκεται στο πλησίασμα του μαγνήτη, ενώ όταν απομακρύνεται το άκρο του πηνίου γίνεται αντίστοιχα νότιος ή βόρειος πόλος, ώστε να αντιστέκεται στην απομάκρυνση του μαγνήτη.



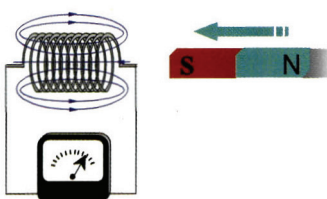
Εικόνα 4-62. Το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται νότιος πόλος.



Εικόνα 4-63. Το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται βόρειος πόλος.



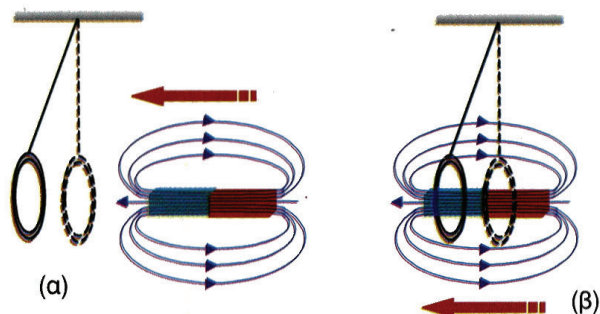
Εικόνα 4-64. Το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται βόρειος πόλος.



Εικόνα 4-65. Το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται νότιος πόλος.

Κρεμάμε με μονωτικό νήμα ένα μεταλλικό δακτύλιο, τον αφήνου-

με να ηρεμήσει σε κατακόρυφη θέση και μετά πλησιάζουμε σ' αυτόν ένα μαγνήτη απότομα. Παρατηρούμε ότι ο δακτύλιος απομακρύνεται από το μαγνήτη. Αν στη συνέχεια, αφού ο δακτύλιος έχει ηρεμήσει ξανά σε κατακόρυφη θέση, απομακρύνουμε το μαγνήτη απότομα, βλέπουμε ότι ο δακτύλιος θα κινηθεί προς το μαγνήτη.



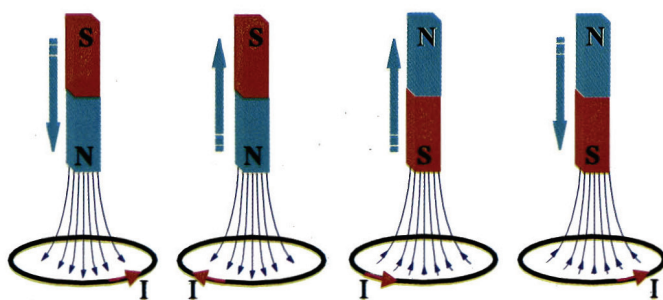
Εικόνα 4-66. α) Όταν ο μαγνήτης πλησιάζει ο δακτύλιος απομακρύνεται β) Όταν ο μαγνήτης απομακρύνεται ο δακτύλιος πλησιάζει.

Μπορούμε με τη βοήθεια των πειραμάτων να διατυπώσουμε τον κανόνα του Lenz:

Το επαγωγικό ρεύμα έχει τέτοια φορά ώστε το μαγνητικό του πεδίο να αντιτίθεται στο αίτιο που το προκάλεσε.

Είδαμε ότι όταν στη δεξιά άκρη του πηνίου πλησιάζει ο βόρειος πόλος του μαγνήτη (Εικ. 62) τότε το άκρο αυτό συμπεριφέρεται ως βόρειος πόλος. Αν υποθέσουμε ότι η δεξιά άκρη του πηνίου συμπεριφέρεται ως νότιος πόλος τότε, ο μαγνήτης θα έλκεται από το πηνίο. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση του μαγνήτη με παράλληλη αύξηση της κινητικής του ενέργειας και αφετέρου μεταφορά ενέργειας από το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη στο πηνίο λόγω δημιουργίας ΗΕΔ σ' αυτό. Από την παραπάνω υπόθεση συμπεραίνουμε ότι η αύξηση της κινητικής ενέργειας του μαγνήτη αντιτίθεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας, γιατί τότε θα είχαμε παραγωγή ενέργειας από το μηδέν.

Γι' αυτό, στο δεξιό μέρος του πηνίου δημιουργείται βόρειος μαγνητικός πόλος, ώστε για να πλησιάσει ο μαγνήτης πρέπει να ασκήσουμε σ' αυτόν μία εξωτερική δύναμη το έργο της οποίας εκφράζει την ενέργεια που μεταφέρεται από αυτόν που ασκεί τη δύναμη στο πηνίο.



Εικόνα 4-67. Φαίνονται οι φορές των επαγωγικών ρευμάτων καθώς ο μαγνήτης κινείται κατά μήκος του άξονα του κυκλικού αγωγού.

Στην (Εικ. 67) φαίνονται οι φορές των ρευμάτων καθώς ο μαγνήτης κινείται κατά μήκος του άξονα του κυκλικού αγωγού.

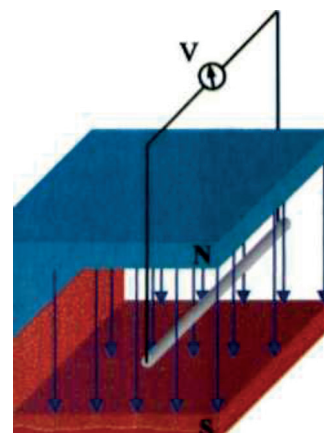
Ο κανόνας του Lenz, εύκολα επίσης επιβεβαιώνεται με το παρακάτω απλό πείραμα:

Κρεμάμε έναν ευθύγραμμο αιωρούμενο αγωγό μεταξύ των πόλων ενός ηλεκτρομαγνήτη κάθετα στις δυναμικές γραμμές.

Όταν ο ηλεκτρομαγνήτης δε διαρρέεται από ρεύμα δηλαδή, όταν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο βλέπουμε ότι εκτρέποντας τον ευθύγραμμο αγωγό, αυτός κινείται ελεύθερα και σταματά μετά από αρκετές αιωρήσεις λόγω τριβών.

Αν όμως, ο ηλεκτρομαγνήτης διαρρέεται από ρεύμα δηλαδή υπάρχει μαγνητικό πεδίο, τότε ο αγωγός δεν κινείται ελεύθερα αλλά «φρενάρει» μέσα στο μαγνητικό πεδίο και σταματά γρήγορα. Αυτό συμβαίνει, επειδή στις άκρες του κινούμενου αγωγού μέσα στο μαγνητικό πεδίο αναπτύσσεται, όπως βλέπουμε, με τη βοήθεια του βολτόμετρου ηλεκτρεγερτική δύναμη η οποία δημιουργεί στον αγωγό ένα ρεύμα τέτοιας φοράς ώστε η δύναμη Laplace που ασκείται σ' αυτόν να εμποδίζει συνεχώς την κίνηση. Επιβεβαιώνουμε λοιπόν, τον κανόνα του Lenz ότι δηλαδή το επαγωγικό ρεύμα έχει τέτοια φορά ώστε να αντιτίθεται στην αιτία που το προκαλεί.

Ο κανόνας του Lenz είναι αποτέλεσμα της **αρχής διατήρησης της ενέργειας**.



Όταν ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα φρενάρει και σταματά γρήγορα τις ταλαντώσεις του.

Εικόνα 4-68.

Υπολογισμός επαγωγικού ρεύματος

Από το νόμο του Ohm η ένταση του ρεύματος είναι:

$$\left. \begin{array}{l} I = \frac{\varepsilon}{R} \\ \text{Αλλά } \varepsilon = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \end{array} \right\} I = \frac{\Delta\Phi}{R\Delta t} \quad (10)$$

Νόμος Neumann

Το ηλεκτρικό φορτίο που μετατοπίζεται από μία διατομή του αγωγού είναι:

$$\left. \begin{array}{l} Q = I\Delta t \\ \text{Αλλά } I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \end{array} \right\} Q = \frac{\Delta\Phi}{R} \quad (11)$$

Από την τελευταία εξίσωση συμπεραίνουμε ότι: **το ηλεκτρικό φορτίο που μετατοπίζεται σε ορισμένη μεταβολή μαγνητικής ροής είναι ανεξάρτητο από το χρόνο που διαρκεί η μεταβολή αυτή (Νόμος Neumann)**.

Παράδειγμα 8

Μια μεταλλική ράβδος έχει αντίσταση $R_1=8\Omega$. Η ράβδος έχει μήκος $\ell=0,5\text{m}$ και μπορεί να κινείται χωρίς τριβές επαπτόμενη πάνω σε δύο οριζόντιες μεταλλικές ράγες, οι άκρες των οποίων συνδέονται με γαλβανόμετρο εσωτερικής αντίστασης $R_2=2\Omega$. Η ράβδος αρχίζει να κινείται με σταθερή επιτάχυνση $a=4\text{m/s}^2$ με την επίδραση εξωτερικής δύναμης. Αν το όλο σύστημα βρίσκεται μέσα σε κατακόρυφο μαγνητικό πεδίο έντασης $B=2\cdot 10^{-2}\text{T}$, να υπολογιστεί το ηλεκτρικό φορτίο που θα περάσει από το γαλβανόμετρο σε χρόνο $t=10\text{s}$.

Λύση

Το ηλεκτρικό φορτίο που θα περάσει από το γαλβανόμετρο θα

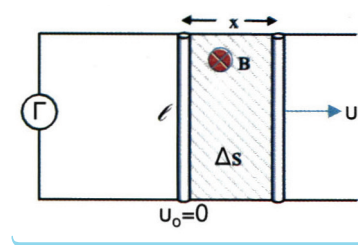
$$\text{ισούται με: } Q = \frac{\Delta\Phi}{R_{\text{ολ}}} \quad (1) \quad \text{Αλλά } \Delta\Phi = B\Delta S \quad (2)$$

Άρα

$$Q = \frac{B\Delta S}{R_{\text{ολ}}} \Rightarrow Q = \frac{B\ell x}{R_{\text{ολ}}} \Rightarrow$$

$$Q = \frac{B\ell \frac{1}{2}at^2}{R_1 + R_2} \Rightarrow$$

$$Q = \frac{2 \cdot 10^{-2}\text{T} \cdot 0,5\text{m} \cdot \frac{1}{2} \cdot 4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10^2\text{s}^2}{10\Omega} \Rightarrow Q = 0,2\text{C}$$



Το ηλεκτρικό φορτίο που θα περάσει από το γαλβανόμετρο θα είναι ίσο με $0,2\text{C}$.