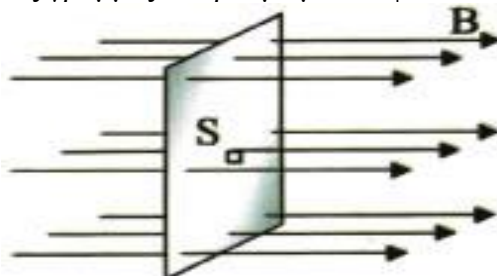


# Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

Διονύσης Παρασκευόπουλος

## α) Μαγνητική ροή

Έστω το ομογενές μαγνητικό πεδίο του σχήματος έντασης  $B$  (Εικ.1). Μέσα σ' αυτό και κάθετα στις δυναμικές γραμμές θεωρούμε μία επιφάνεια που έχει εμβαδόν  $S$ .



Εικ.1

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  $\Phi$ , δηλαδή:

$$\Phi = B \cdot S$$

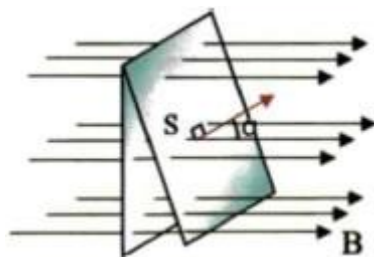
Η μονάδα της μαγνητικής ροής ονομάζεται Weber, συμβολίζεται με Wb και προκύπτει από το γινόμενο της μονάδας της έντασης του μαγνητικού πεδίου επί τη μονάδα της επιφάνειας, δηλαδή:  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$

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  $B \cdot S$ , 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:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \sigma_{\nu\alpha}$$

όπου  $\alpha$  είναι η γωνία που σχηματίζει η κάθετη στην επιφάνεια με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. (Εικ.2)



Η κάθετη στην επιφάνεια σχηματίζει γωνία  $\alpha$  με τις δυναμικές γραμμές.

Εικ.2

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

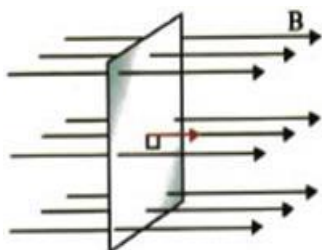
Αν μέσα σε κάποιο μαγνητικό πεδίο βάλουμε μία κλειστή επιφάνεια η ολική ροή που θα περνά μέσα από αυτή θα είναι μηδέν. Αυτό είναι φανερό επειδή όσες δυναμικές

γραμμές μπαίνουν στην επιφάνεια τόσες βγαίνουν από αυτή. Πρέπει να αναφέρουμε επίσης ότι η μαγνητική ροή είναι μονόμετρο μέγεθος.

### Παράδειγμα 1

Ένα τετράγωνο πλευράς  $a = 10\text{cm}$  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  $\varphi = 30^\circ$  με τις δυναμικές γραμμές, γ) είναι παράλληλο στις δυναμικές γραμμές.

Λύση



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

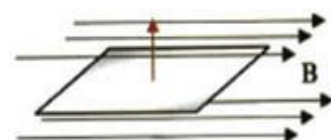
Άρα:

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



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

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



γ) Όταν το πλαίσιο βρεθεί παράλληλα με τις δυναμικές γραμμές, τότε η κάθετη στο πλαίσιο σχηματίζει γωνία  $90^\circ$  με τις δυναμικές γραμμές άρα η ροή που θα περνά από την επιφάνεια θα είναι:  $\Phi = B \cdot S \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow \Phi = 0$

Εικ.3

### 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 Άγγλο Faraday και τον Αμερικανό Henry, έντεκα χρόνια αργότερα από τα πειράματα του Oersted και ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή ή απλά επαγωγή.

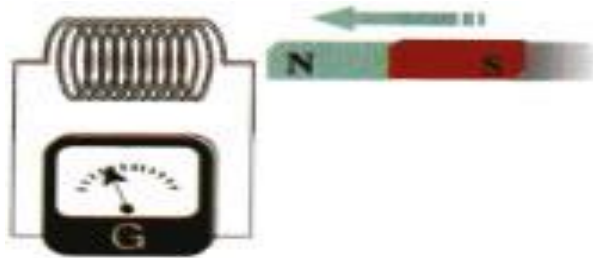
Συνδέουμε τις άκρες ενός πηνίου με ένα γαλβανόμετρο μηδενός. Αρχικά, βλέπουμε ότι ο δείκτης του οργάνου δεν έχει καμία απόκλιση. Η διαφορά δυναμικού δηλαδή στα άκρα του πηνίου είναι μηδέν. (Εικ.4)



Το γαλβανόμετρο δείχνει ένδειξη μηδέν.

Εικ.4

Στη συνέχεια, παίρνουμε ένα μαγνήτη και τον πλησιάζουμε προς το πηνίο (Εικ.5).



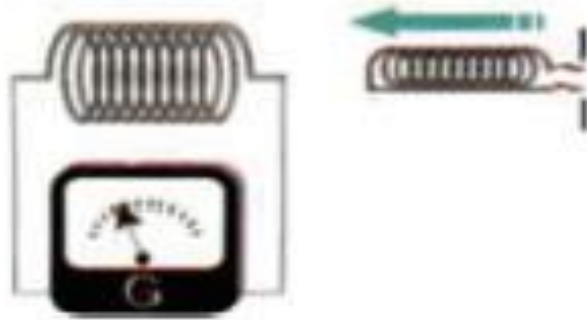
Όταν ο μαγνήτης κινείται το όργανο δείχνει κάποια ένδειξη.

Εικ.5

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. 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.

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 μεταβάλλουμε την ένταση, ο δείκτης του γαλβανόμετρου μηδενός δεν εμφανίζει καμία απόκλιση. (Εικ.6)



Όσο το ρευματοφόρο σωληνοειδές κινείται το όργανο δείχνει κάποια ένδειξη.

Εικ.6.

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.

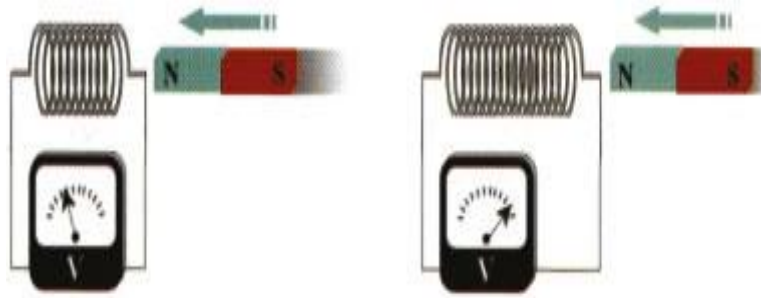
Το φαινόμενο αυτό ονομάζουμε επαγωγή.

#### **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 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.7).



Μεγαλύτερη ΗΕΔ αναπτύσσεται στο πηνίο με τις περισσότερες σπείρες.

Εικ.7

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**

$$\mathcal{E} = - (\Delta\Phi/\Delta t) \cdot N \quad (\text{Μονάδα στο S.I.: } 1 \text{ Wb/s} = \text{V})$$

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:

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

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 1s, αναπτύσσει ΗΕΔ επαγωγής ίση με 1V.** Δηλαδή  $1\text{Wb} = 1\text{V}\cdot\text{s}$

#### 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.

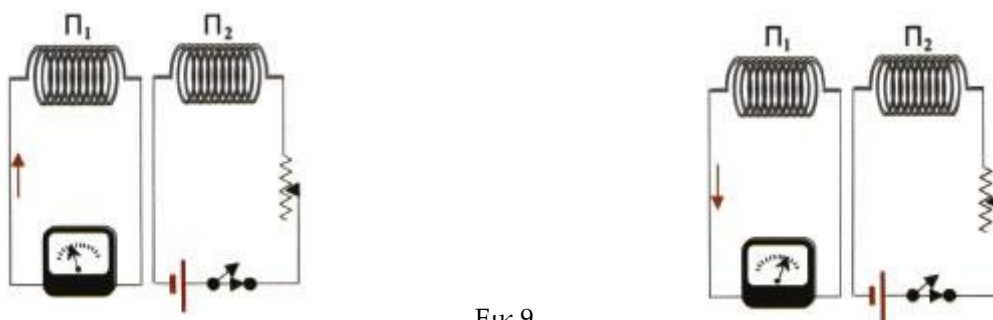
Η δημιουργία επαγωγικής τάσης είναι αποτέλεσμα της μεταβολής της ροής. Η δημιουργία όμως επαγωγικού ρεύματος προϋποθέτει ότι το κύκλωμα στο οποίο συμβαίνει η μεταβολή της ροής θα είναι **κλειστό**.

Ας δούμε μερικούς τρόπους παραγωγής επαγωγικών ρευμάτων.



Εικ.8

Πλησιάζοντας (Εικ.8 αριστερά) ή απομακρύνοντας (Εικ.8 δεξιά) το νότιο πόλο του μαγνήτη, το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα οπότε το δεξιό άκρο του σωληνοειδούς γίνεται αντίστοιχα νότιος ή βόρειος πόλος.



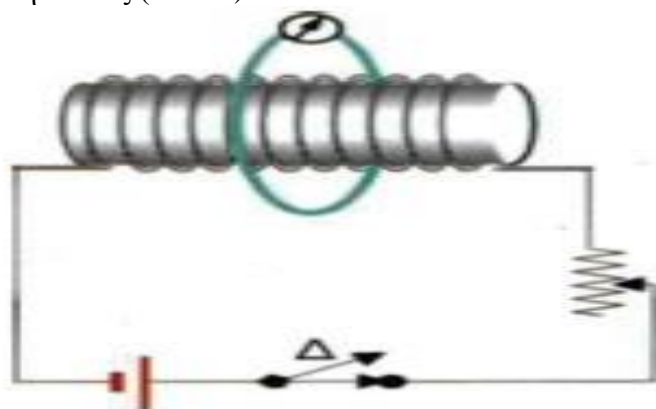
Εικ.9

Αύξηση της έντασης του ρεύματος στο Π<sub>2</sub> (Εικ.9 αριστερά) προκαλεί ρεύμα στο πηνίο Π<sub>1</sub>.

Μείωση της έντασης του ρεύματος στο Π<sub>2</sub> (Εικ.9 δεξιά) προκαλεί επίσης ρεύμα στο πηνίο Π<sub>1</sub>. Αυτό το ρεύμα έχει φορά αντίθετη από τη φορά του ρεύματος της προηγούμενης περίπτωσης.

Για όσο χρόνο μεταβάλλεται η ένταση στο πηνίο Π<sub>2</sub> βλέπουμε το αμπερόμετρο να δείχνει ρεύμα στο πηνίο Π<sub>1</sub>. Παρατηρούμε επίσης ότι, όταν αυξάνουμε το ρεύμα στο πηνίο Π<sub>2</sub>, το δεξιό άκρο του πηνίου Π<sub>1</sub> γίνεται βόρειος πόλος, ενώ όταν το ελαττώνουμε, γίνεται νότιος πόλος.

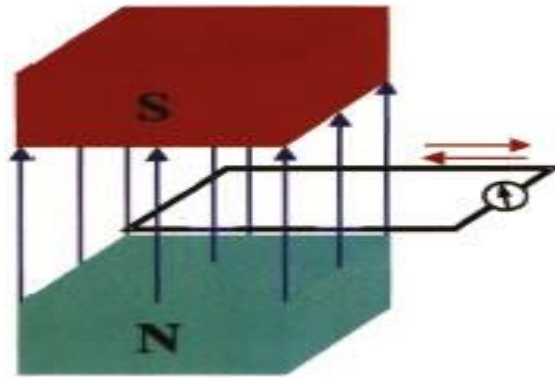
Όταν διακόπτουμε το ρεύμα στο σωληνοειδές παρατηρούμε ότι ο κυκλικός αγωγός διαρρέεται από ρεύμα η ένταση του οποίου αλλάζει με την αποκατάσταση του ρεύματος στο σωληνοειδές (Εικ.10).



Η φορά του ρεύματος αλλάζει αν ανοίγουμε ή κλείνουμε το διακόπτη.

Εικ.10

Κάθετα σε ένα ισχυρό ηλεκτρομαγνήτη τοποθετούμε ένα συρμάτινο πλαίσιο (Εικ.11). 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.



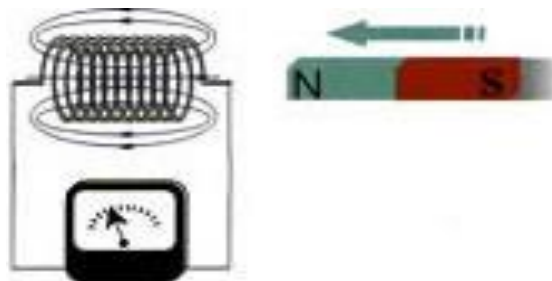
Η φορά του ρεύματος αλλάζει αλλάζοντας τη φορά κίνησης του πλαισίου.

Εικ.11

### ε) Κανόνας του Lenz

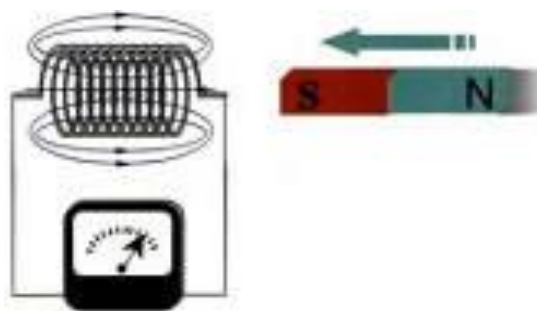
Ο νόμος του Faraday δίνει το μέτρο της ΗΕΔ από επαγωγή, η φορά όμως του επαγωγικού ρεύματος καθορίζεται από τον κανόνα του Lenz (Heinrich F. Lenz. 1804-1865).

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.



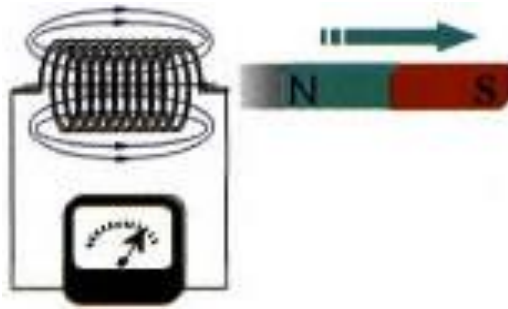
Το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται βόρειος πόλος.

Εικ.12

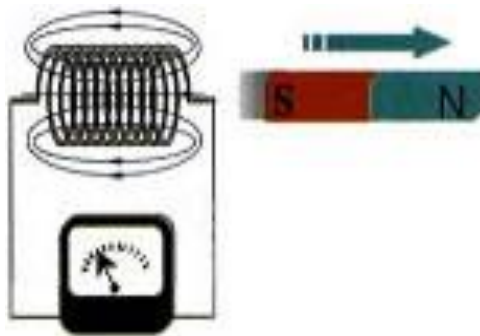


Το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται νότιος πόλος.

Εικ.13



Το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται νότιος πόλος.  
Εικ.14.



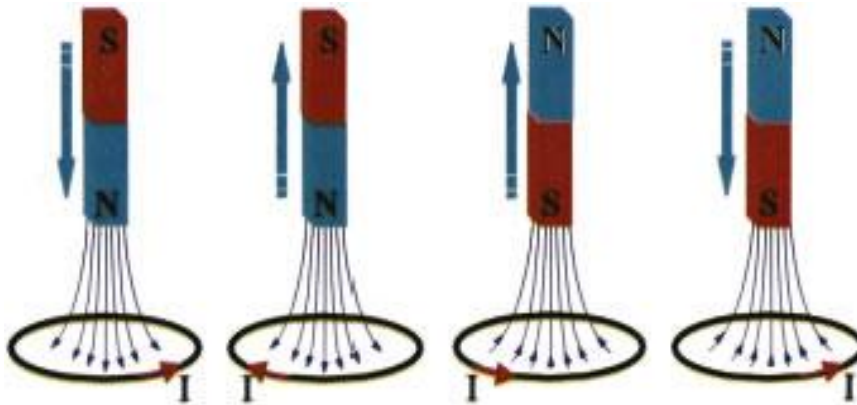
Το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται βόρειος πόλος.  
Εικ.15

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.12) 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.





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

Εικ.16

Ο κανόνας του Lenz, δηλαδή, είναι αποτέλεσμα της αρχής διατήρησης της ενέργειας.