

## Νόμος του Faraday - Επαγωγή

# Το φαινόμενο της Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής

Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή είναι το φαινόμενο όπου μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή σε ένα κύκλωμα, δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο

- Εάν το κύκλωμα είναι ανοικτό, το ηλεκτρικό πεδίο εκδηλώνεται ως τάση
- Εάν το κύκλωμα είναι κλειστό, έχουμε εμφάνιση ρεύματος

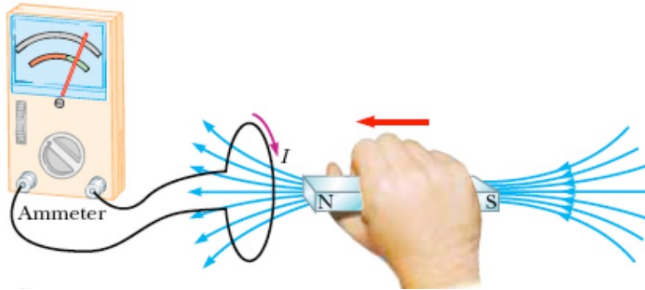
Το φαινόμενο της επαγωγής εφαρμόζεται σε:

- Ηλεκτρικές γεννήτριες, δυναμό
- Αυτόματες ασφάλειες
- Ηλεκτρικές κιθάρες

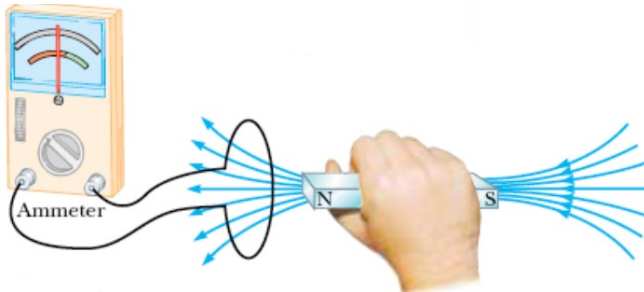
Το φαινόμενο της επαγωγής εμφανίστηκε και διατυπώθηκε σε διάφορα πειράματα:

# Πειράματα ανάδειξης φαινομένου της επαγωγής

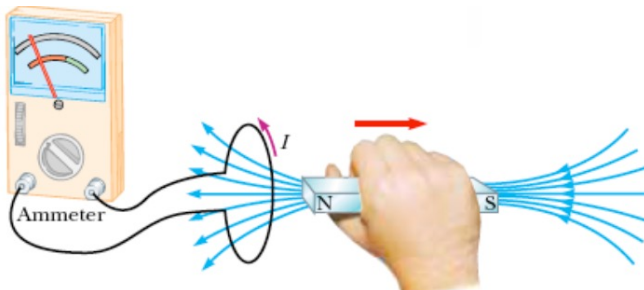
## Πείραμα 1:



Καθώς ο μαγνήτης κινείται κοντά στον βρόχο που είναι συνδεδεμένος σε ευαίσθητο αμπερόμετρο, το αμπερόμετρο αποκλίνει, υποδηλώνοντας ότι κάποιο ρεύμα επάγεται στον βρόχο



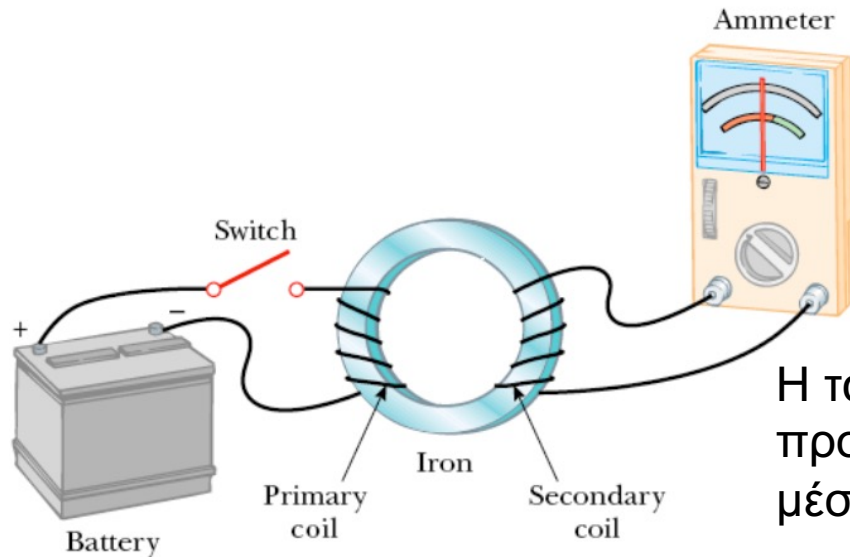
Όταν ο μαγνήτης διατηρείται ακίνητος, δεν υπάρχει ρεύμα το οποίο επάγεται στον βρόχο ακόμα και ότι ο μαγνήτης βρίσκεται στο εσωτερικό του βρόχου. Η ένδειξη του αμπερομέτρου είναι μηδέν



Καθώς ο μαγνήτης απομακρύνεται από τον βρόχο, το αμπερόμετρο αποκλίνει προς την αντίθετη φορά από αυτή όταν πλησιάζαμε τον μαγνήτη. Αλλάζοντας τη διεύθυνση κίνησης του μαγνήτη αλλάζουμε και τη φορά του επαγωγικού ρεύματος.

# Πειράματα ανάδειξης φαινομένου της επαγωγής

## Πείραμα 2:



Όταν ο διακόπτης στο κύριο κύκλωμα (αυτό που συνδέεται με την πηγή δυναμικού) κλείσει, ο δείκτης του αμπερομέτρου αποκλίνει για πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Η τάση η οποία επάγεται στο δευτερεύον κύκλωμα προκαλείται από το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο μέσω του δευτερεύοντος πηνίου

Τα πειράματα του Faraday δείχνουν ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα επάγεται στους βρόχους ή στο πηνίο λόγω της μεταβολής ενός μαγνητικού πεδίου. Ο βρόχος ή το πηνίο συμπεριφέρεται σαν να ήταν συνδεδεμένο σε μια πηγή δυναμικού (Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης - ΗΕΔ)

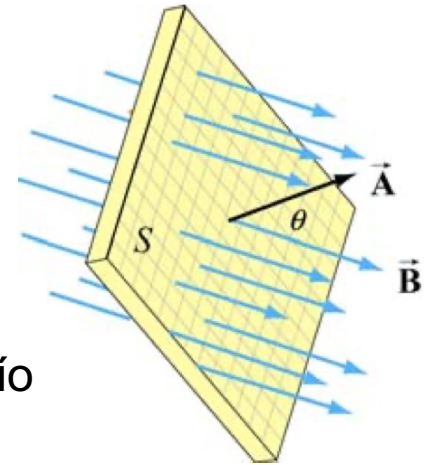
Πειραματικά βρέθηκε ότι η επαγωγική Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (ΗΕΔ) εξαρτάται από τον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από τον βρόχο ή από το πηνίο

# Ο νόμος της επαγωγής του Faraday

Έχουμε συζητήσει τη έννοια της μαγνητικής ροής παλαιότερα:

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \theta \quad \text{για ομογενές μαγνητικό πεδίο}$$

$$\Phi_B = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad \text{για ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο}$$



Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής είναι το Weber (Wb), όπου  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Tm}^2$

Ο νόμος επαγωγής του Faraday αναφέρει τα εξής:

Η επαγόμενη ΗΕΔ (Ηλεκτρεγερτική Δύναμη) σε ένα κύκλωμα, είναι ευθέως ανάλογη της χρονικής μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από το κύκλωμα

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

**Το αρνητικό πρόσημο**, προέρχεται από τον **κανόνα του Lenz**:

«Η ΗΕΔ εξ επαγωγής έχει τέτοια φορά ώστε το επαγωγικό ρεύμα που προκαλείται από αυτή τείνει να αναιρέσει το αίτιο που προκαλεί την επαγωγή»

# Ο νόμος του Lenz

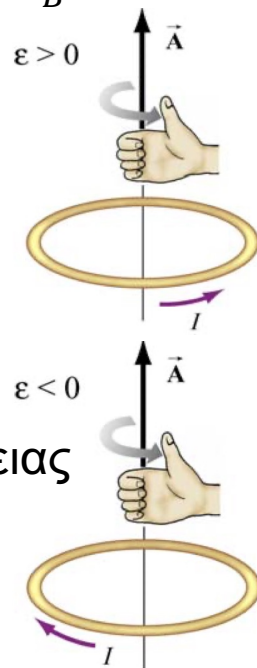
Η διεύθυνση του επαγόμενου ρεύματος καθορίζεται από τον νόμο του Lenz:

Το επαγόμενο ρεύμα δημιουργεί μαγνητικά πεδία τα οποία τείνουν να αντισταθούν στην αλλαγή της μαγνητικής ροής που επάγει τέτοια ρεύματα

Για να δείξουμε πως δουλεύει ο νόμος του Lenz, θεωρούμε έναν αγωγίμο βρόχο που εισάγεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία:

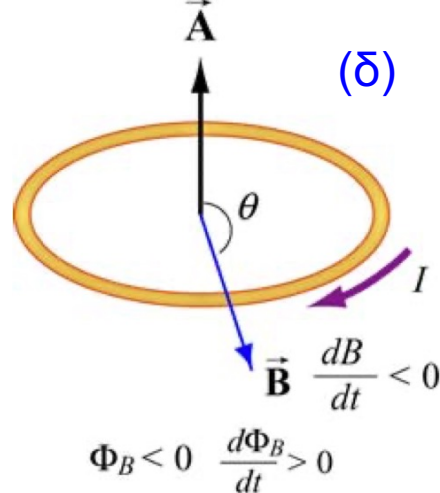
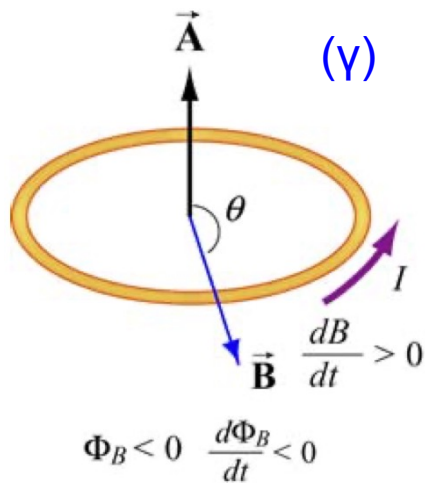
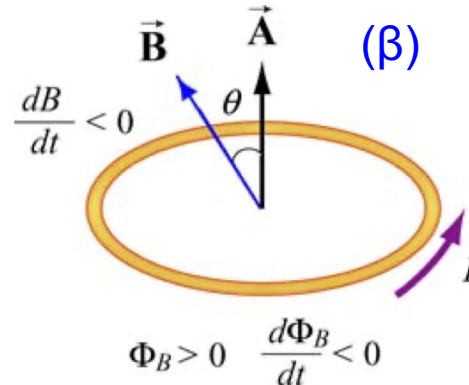
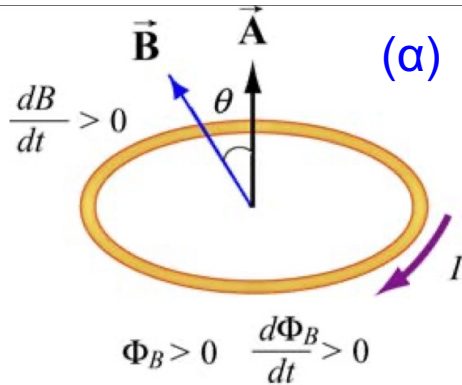
- Θεωρούμε μια θετική διεύθυνση για το διάνυσμα της επιφάνειας  $\vec{A}$
- Υποθέτοντας ότι το μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  είναι ομογενές, υπολογίζουμε το εσωτερικό γινόμενο  $\vec{B} \cdot \vec{A}$  προσδιορίζοντας έτσι το πρόσημο της μαγνητικής ροής  $\Phi_B$ .
- Υπολογίζουμε τον ρυθμό μεταβολής της ροής  $d\Phi_B/dt$  με 3 δυνατά αποτελέσματα:
 
$$\frac{d\Phi_B}{dt}: \begin{cases} > 0 \Rightarrow \text{επαγόμενη ΗΕΔ} & \mathcal{E} < 0 \\ = 0 \Rightarrow \text{επαγόμενη ΗΕΔ} & \mathcal{E} = 0 \\ < 0 \Rightarrow \text{επαγόμενη ΗΕΔ} & \mathcal{E} > 0 \end{cases}$$
- Προσδιορισμός του επαγόμενου ρεύματος από τον κανόνα του δεξιού χεριού:

Με τον αντίχειρα να δείχνει στη διεύθυνση του διανύσματος της επιφάνειας κλείνουμε την παλάμη γύρω από τον βρόχο. Το επαγόμενο ρεύμα έχει την διεύθυνση της παλάμης αν  $\mathcal{E} > 0$  και αντίθετη διεύθυνση αν  $\mathcal{E} < 0$



# Ο νόμος του Lenz

Τα 4 δυνατά σενάρια μιας χρονικά μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής και ο τρόπος με τον οποίο ο νόμος του Lenz χρησιμοποιείται για την εύρεση της διεύθυνσης του επαγόμενου ρεύματος φαίνεται στα παρακάτω σχήματα



$\Phi_B$	$d\Phi_B/dt$	$\mathcal{E}$	$I$
+	+	-	-
	-	+	+
-	+	-	-
	-	+	+

Το θετικό και αρνητικό πρόσημο αντιστοιχούν σε φορά ρεύματος αντίθετα και ίδια με την φορά των δεικτών του ρολογιού

## Ο νόμος του Lenz

Σαν παράδειγμα του νόμου του Lenz, θεωρούμε έναν ραβδόμορφο μαγνήτη που κινείται προς έναν αγώγιμο βρόχο, με τον βόρειο πόλο του στην κάτω πλευρά.

Με τον μαγνήτη να δείχνει προς τα κάτω και το διάνυσμα της επιφάνειας να δείχνει προς τα πάνω, μαγνητική ροή είναι  $\Phi_B = -BA < 0$ .

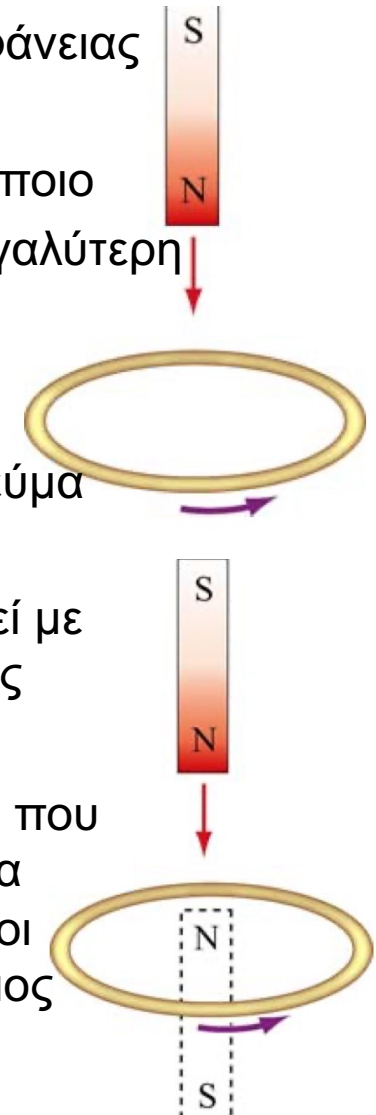
Καθώς ο μαγνήτης πλησιάζει τον βρόχο, το μαγνητικό πεδίο σε κάποιο τμήμα του βρόχου αυξάνει και επομένως:  $\frac{dB}{dt} > 0$  προκαλώντας μεγαλύτερη μαγνητική ροή. Επομένως:

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = -A \frac{dB}{dt} < 0$$

Επομένως θα έχουμε θετική επαγόμενη ΗΕΔ και το επαγόμενο ρεύμα κινείται αντίθετα με την φορά των δεικτών του ρολογιού

Το ρεύμα αυτό προκαλεί επαγόμενο μαγνητικό πεδίο που προκαλεί με τη σειρά του θετική μαγνητική ροή που αντιδρά στην αλλαγή (όπως φαίνεται στην περίπτωση (γ) της προηγούμενης διαφάνειας).

Το ίδιο θα μπορούσαμε να το δούμε με βάση τη μαγνητική δύναμη που αναπτύσσεται. Καθώς ο μαγνήτης πλησιάζει τον βρόχο, δέχεται μια απωστική δύναμη εξαιτίας της επαγόμενης ΗΕΔ. Εφόσον ομώνυμοι πόλοι απωθούνται, αν ο βρόχος ήταν μαγνήτης θα έπρεπε ο βόρειος πόλος του να ήταν προς τα πάνω και η διεύθυνση του ρεύματος αντίθετα των δεικτών του ρολογιού.





# Νόμος του Faraday – Επαγωγή

## Παραδείγματα

# Ο νόμος της επαγωγής του Faraday

Για ένα σωληνοειδές που αποτελείται από  $N$  σπείρες η ολική επαγόμενη ΗΕΔ είναι:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Συνδυάζοντας τον τύπο του νόμου του Faraday με τον τύπο της μαγνητικής ροής ομογενούς μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$ :

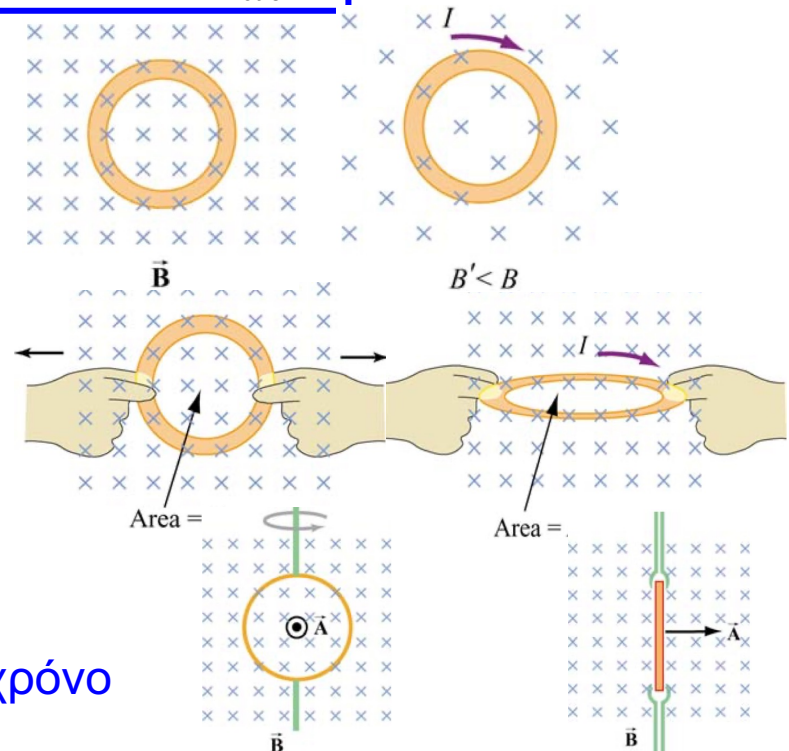
$$\mathcal{E} = -\frac{d(BA\cos\theta)}{dt} = -\frac{dB}{dt}A\cos\theta - B\frac{dA}{dt}\cos\theta + BA\sin\theta\frac{d\theta}{dt}$$

Επομένως η ΗΕΔ μπορεί να προκληθεί από τους εξής τρόπους:

➤ Μεταβάλλοντας το μέτρο του  $\vec{B}$  με το χρόνο

➤ Μεταβάλλοντας το μέτρο του  $\vec{A}$  με το χρόνο

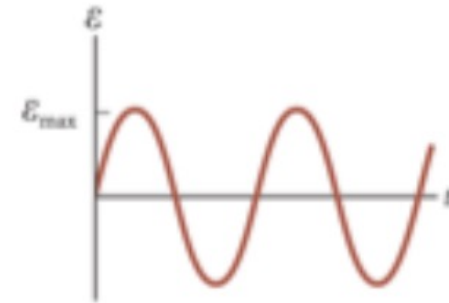
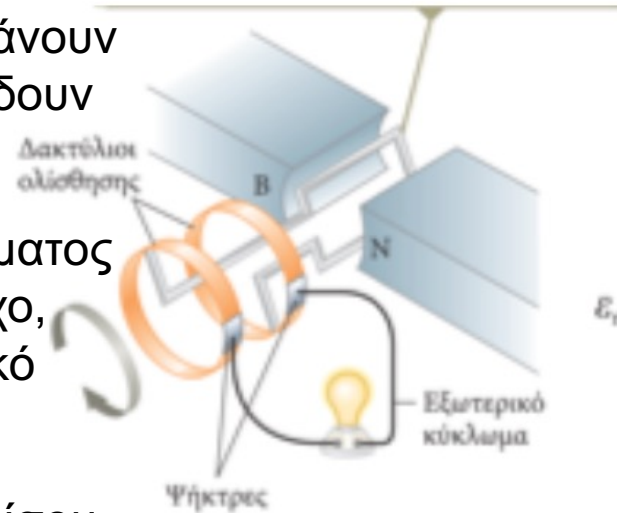
➤ Μεταβάλλοντας τη γωνία του  $\vec{A}$  και  $\vec{B}$  με το χρόνο



## Παράδειγμα: Η ηλεκτρική γεννήτρια

Οι ηλεκτρικές γεννήτριες προσλαμβάνουν ενέργεια μέσω έργου, και την αποδίδουν μέσω ηλεκτρικής μετάδοσης

Μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελείται από ένα συρμάτινο βρόχο, που περιστρέφεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο από εξωτερικό μέρος.



Θεωρούμε ένα βρόχο με  $N$  σπείρες, ίσου μεταξύ τους εμβαδού, ο οποίος περιστρέφεται σε μαγνητικό πεδίο

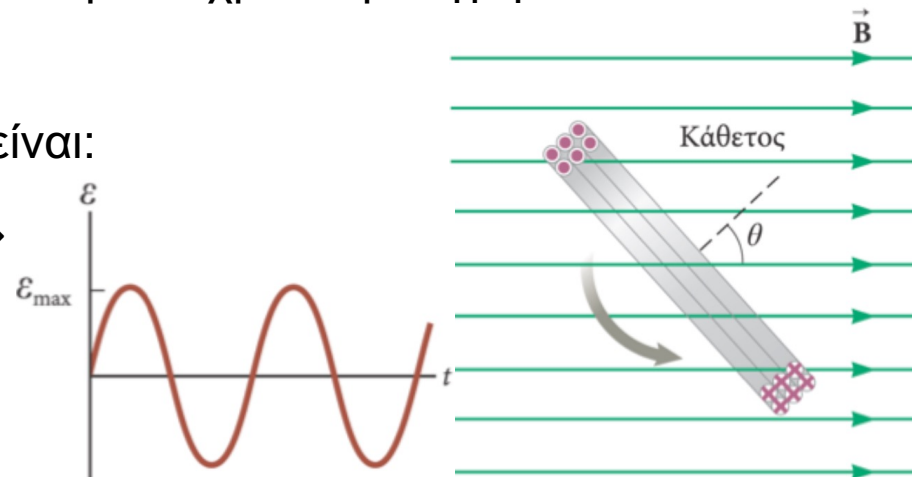
Η ροή που διαπερνά το βρόχο οποιαδήποτε χρονική στιγμή είναι:

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \theta = BA \cos \omega t$$

Η ΗΕΔ που επάγεται στον βρόχο είναι:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -N \frac{d(BA \cos \omega t)}{dt} \Rightarrow$$

$$\mathcal{E} = -NB\omega A \sin \omega t$$



## Παράδειγμα: ράβδος μέσα σε μαγνητικό πεδίο

Θα εξετάσουμε, ότι λόγω της κίνησης της ράβδου στο ομογενές μαγνητικό πεδίο, επάγεται ΗΕΔ στα άκρα της.

Λόγω της κίνησης της ράβδου, δύναμη Lorentz αναπτύσσεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια της ράβδου και (σύμφωνα με το σχήμα) τα κινεί προς τα κάτω.

Ως αποτέλεσμα, ηλεκτρόνια συσσωρεύονται στο κάτω άκρο της ράβδου, δημιουργώντας ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του αγωγού.

Η συσσώρευση των φορτίων στα δύο άκρα του αγωγού συνεχίζεται έως ότου η ηλεκτρική δύναμη εξισωθεί με την μαγνητική δύναμη. Ισορροπία επομένως επιτυγχάνεται όταν:

$$qE = Bvq \Rightarrow E = Bv$$

Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται στον αγωγό συνδέεται με τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του σύμφωνα με τη σχέση:

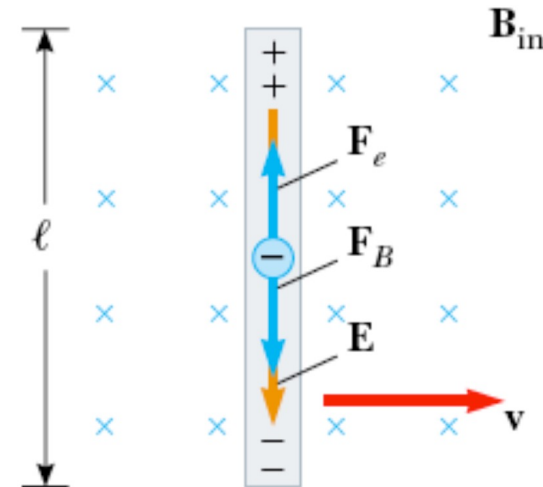
$$U = El \Rightarrow U = Bvl$$

Κινητική ΗΕΔ και εν γένει:

$$\mathcal{E} = U = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s}$$

Η διαφορά δυναμικού διατηρείται μεταξύ των άκρων του αγωγού καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης του αγωγού μέσα στο μαγνητικό πεδίο.

Αν αντιστραφεί η φορά κίνησης αντιστρέφεται και η πολικότητα της διαφοράς δυναμικού.



## Παράδειγμα:

Μια μεταλλική ράβδος μήκους  $l$  γλιστρά παράλληλα προς τον εαυτό της πάνω σε δύο παράλληλους αγωγούς (αμελητέας αντίστασης) που συνδέονται με αντίσταση  $R$ . Η ράβδος κινείται σε μαγνητικό πεδίο  $\vec{B} = B\hat{k}$ . Μια εξωτερική δύναμη  $F_{\text{ext}}$  αναγκάζει τη ράβδο να κινείται με σταθερή ταχύτητα  $\vec{v} = v\hat{i}$ . Θα υπολογίσουμε την διαφορά δυναμικού που εμφανίζεται στα άκρα της ράβδου και την ένταση που την διαρρέει

Η επιφάνεια του κυκλώματος σε κάθε χρονική στιγμή είναι:  $lx$

Η μαγνητική ροή που περνά από τον κλειστό βρόχο που σχηματίζει η ράβδος και οι παράλληλοι αγωγοί είναι:

$$\Phi_B = BA = Blx$$

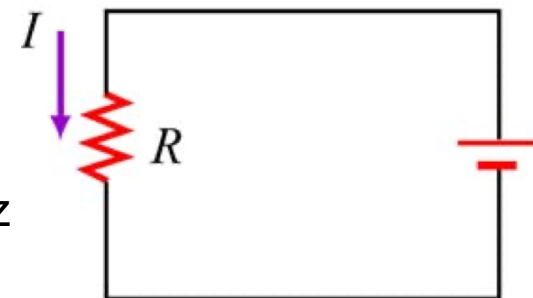
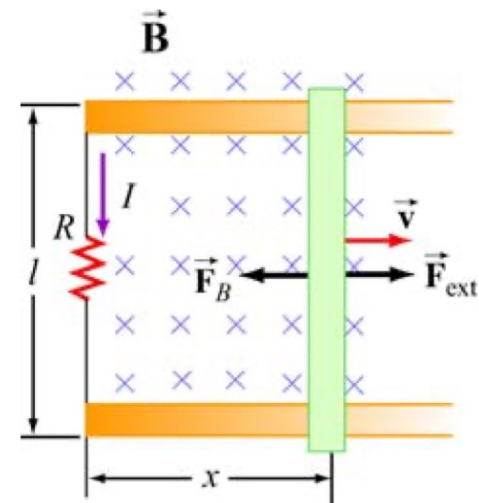
Από τον νόμο του Faraday:  $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d(Blx)}{dt} = -Bl\frac{dx}{dt}$

$$\mathcal{E} = -Blv$$

Το ρεύμα το οποίο επάγεται θα είναι:

$$I = \frac{|\mathcal{E}|}{R} = \frac{Bvl}{R}$$

Η διεύθυνση του ρεύματος αυτού είναι αντίθετη με τη φορά των δεικτών του ρολογιού σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz



## Παράδειγμα

Η μαγνητική δύναμη που αναπτύσσεται στη ράβδο καθώς κινείται προς τα δεξιά είναι:

$$\vec{F}_B = I(l\hat{j}) \times (-B\hat{k}) = -IBl\hat{i} \Rightarrow \vec{F}_B = -\frac{B^2 l^2 v}{R} \hat{i}$$

Η μαγνητική δύναμη έχει αντίθετη φορά με τη φορά κίνησης:

Για να κινείται η ράβδος με σταθερή ταχύτητα, μια εξωτερική δύναμη πρέπει να ασκείται στη ράβδο ώστε η συνισταμένη δύναμη να είναι μηδέν. Επομένως:

$$\vec{F}_{ext} = -\vec{F}_B = \frac{B^2 l^2 v}{R} \hat{i}$$

Η ισχύς που προσφέρεται από την εξωτερική αυτή δύναμη είναι ίση με την ισχύ που καταναλώνεται πάνω στην αντίσταση του κυκλώματος αυτού:

$$P = \vec{F}_{ext} \cdot \vec{v} = \frac{B^2 l^2 v}{R} \hat{i} \cdot v\hat{i} \Rightarrow P = \frac{B^2 l^2 v^2}{R} \Rightarrow P = \frac{\mathcal{E}^2}{R}$$

όπως είναι αναμενόμενο από διατήρηση ενέργειας

## Παράδειγμα

Η ράβδος κινείται με σταθερή ταχύτητα εξαιτίας της εφαρμογής μιας εξωτερικής δύναμης. Τι θα συμβεί αν τη χρονική στιγμή  $t = 0$ , η ράβδος είχε ταχύτητα  $v_0$  και η εξωτερική δύναμη σταματούσε να ασκείται στη ράβδο.

Στην περίπτωση αυτή, η ράβδος θα επιβραδυνθεί γιατί η μαγνητική δύναμη έχει φορά προς τα αριστερά.

Από τον 2<sup>ο</sup> νόμο του Newton θα έχουμε:  $F_B = -\frac{B^2 l^2 v}{R} = ma = m \frac{dv}{dt}$

Γράφουμε επομένως:  $\frac{dv}{v} = -\frac{B^2 l^2}{mR} dt = -\tau dt$  όπου:  $\tau = \frac{B^2 l^2}{mR}$

Ολοκληρώνοντας θα πάρουμε:  $v(t) = v_0 e^{-t/\tau}$

Η ταχύτητα ελαττώνεται εκθετικά απουσία μιας εξωτερικής δύναμης που παράγει έργο στο σύστημα.

Η ράβδος δεν σταματά να κινείται ποτέ αλλά μπορεί να επιβεβαιωθεί ότι η ολική μετατόπιση είναι πεπερασμένη.

## 14° Quiz

- Γράψτε σε μια σελίδα το όνομά σας και τον αριθμό ταυτότητάς σας

Έτοιμοι