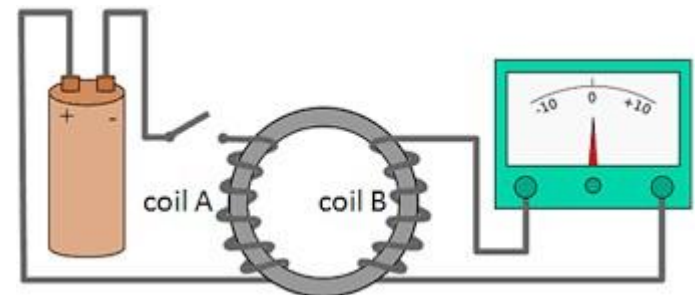
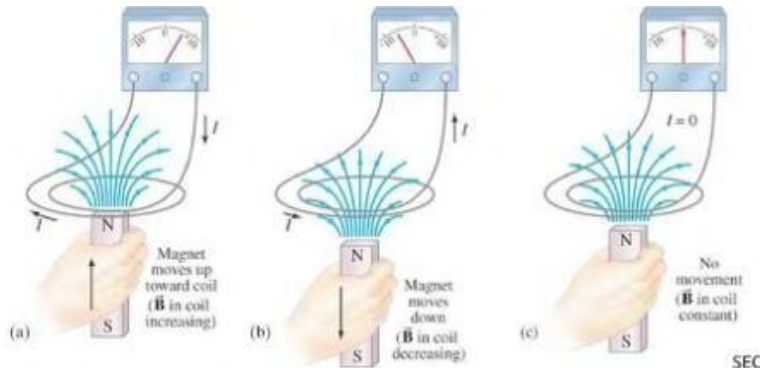


Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή και Νόμος του Faraday

Επαγόμενη ΗΕΔ

- Faraday:
 - σταθερό μαγνητικό πεδίο δεν παράγει ρεύμα
 - Μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει (επαγόμενο ρεύμα)
- Επαγόμενο ρεύμα: το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται από μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο
- Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή: Μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει ΗΕΔ
- ΗΕΔ εξ'επαγωγής: απαιτείται κίνηση ή μεταβολή (σχετική κίνηση)
- Γρήγορος ρυθμός μεταβολής -> ισχυρότερη επαγόμενη ΗΕΔ



Επαγωγή

- Μαγνητική ροή – 1 Weber(Wb)=1 Tm²

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

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

- ΗΕΔ $\propto \frac{d\Phi_B}{dt}$

- Ο αριθμός των γραμμών του E και του B είναι ανάλογες της έντασης των πεδίων.

- $\Phi_B \propto$ του αριθμού των γραμμών που διέρχονται από την επιφάνεια που περιβάλλεται από το βρόχο

$$\theta = 90^\circ$$

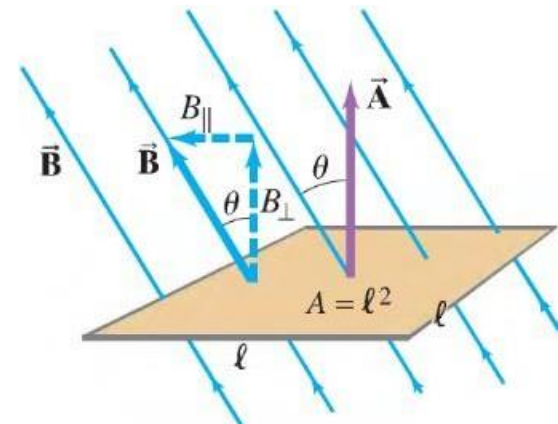
$$\theta = 45^\circ$$

$$\theta = 0$$

$$\Phi_B = 0$$

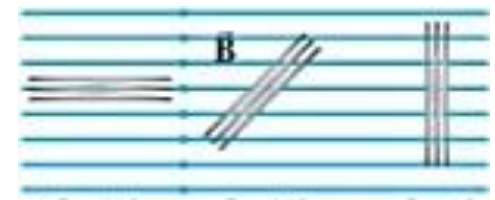
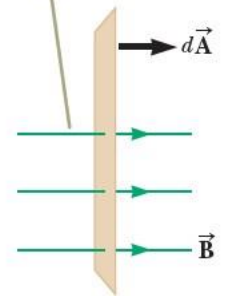
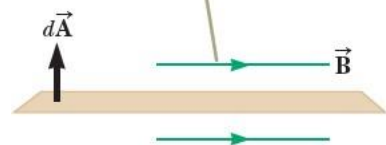
$$\Phi_B = BA \cos 45$$

$$\Phi_B = BA$$



$\Phi = \max$ όταν το B είναι κάθετο στο επίπεδο της επιφάνειας

$\Phi = 0$ όταν το B είναι παράλληλο στο επίπεδο της επιφάνειας



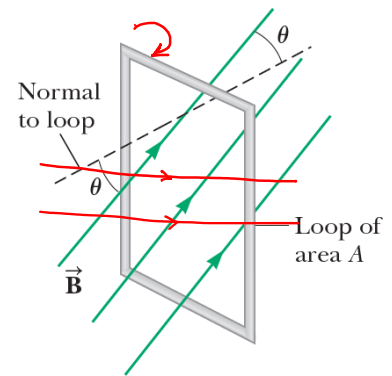
Νόμος Επαγωγής Faraday

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

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

Για N βρόχους πυκνά τυλιγμένους

$$\mathcal{E} = -\frac{d}{dt}(BA\cos\theta)$$



Επαγόμενη ΗΕΔ σε κύκλωμα μπορεί να προκληθεί:

- Μεταβολή του μέτρου του \mathbf{B} με το χρόνο
- Μεταβολή της επιφάνειας που περικλείει ο βρόχος με το χρόνο
- Μεταβολή της γωνίας θ μεταξύ του \mathbf{B} και της κάθετου στο επίπεδο του βρόχου με το χρόνο
- Οποιοδήποτε συνδυασμό των παραπάνω

Παράδειγμα

Βρόχος σε μαγνητικό πεδίο

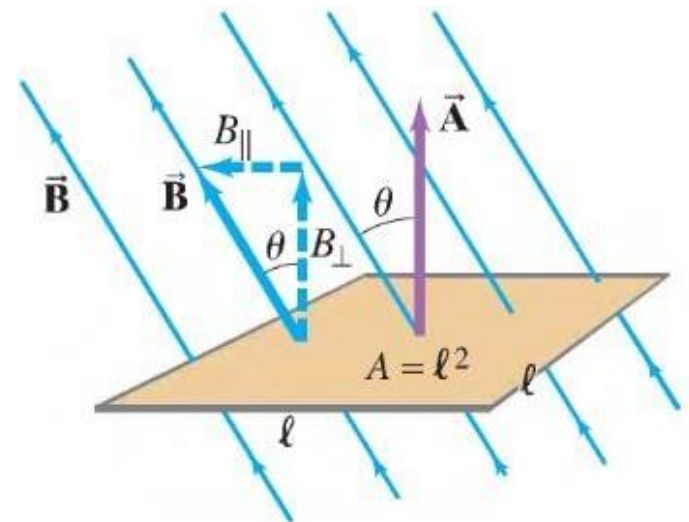
Ένας τετραγωνικός βρόχος με πλευρά $\ell = 5,0\text{cm}$ εισάγεται σε ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο $B = 0,16\text{T}$.

Ποια θα είναι η μαγνητική ροή στο βρόχο

α) όταν το \vec{B} είναι κάθετο στο επίπεδο του βρόχου &

β) όταν το \vec{B} σχηματίζει γωνία 30° με την επιφάνεια A του βρόχου;

γ) Ποια είναι η μέση τιμή του ρεύματος στο βρόχο, εάν ο τελευταίος έχει αντίσταση $R=0,012\Omega$ και περιστρέφεται από τη θέση (α) στη θέση (β) σε χρονικό διάστημα $0,14\text{ s}$.



Επαγόμενη ΗΕΔ σε κινούμενο αγωγό

- Εναλλακτικός τρόπος παραγωγής ΗΕΔ

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{BdA}{dt} = \frac{B\ell v dt}{dt} = B\ell v$$

- Ισχύει για B , ℓ , v αμοιβαία ορθογώνια

- ΗΕΔ κίνησης: επαγόμενη σε κινούμενο αγωγό εντός μαγνητικού πεδίου



Επαγόμενη ΗΕΔ σε κινούμενο αγωγό

- Χωρίς τη χρήση του Faraday
- Φορτισμένο σωματίδιο κινείται κάθετα σε B με ταχύτητα v

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

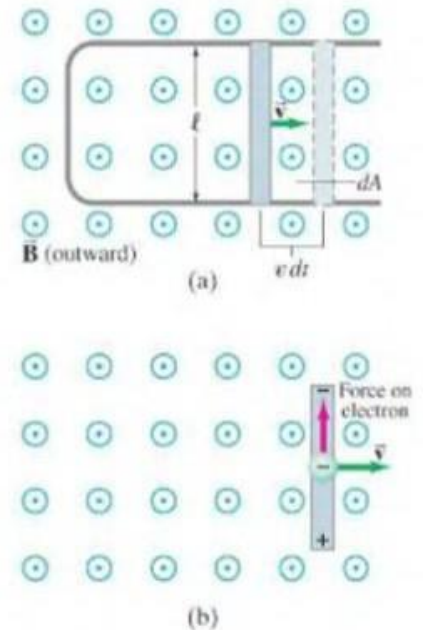
- Αφού $\vec{v} \perp \vec{B}$, κάθε ηλεκτρόνιο υφίσταται

$$F = qvB$$

- Είτε ακουμπάει στον αγωγό είτε όχι υπάρχει ΗΕΔ

$$W = \text{δύναμη} \times \text{απόσταση} = (qvB)(\ell)$$

$$\mathcal{E} = \frac{W}{q} = \frac{qvB\ell}{q} = vB\ell$$

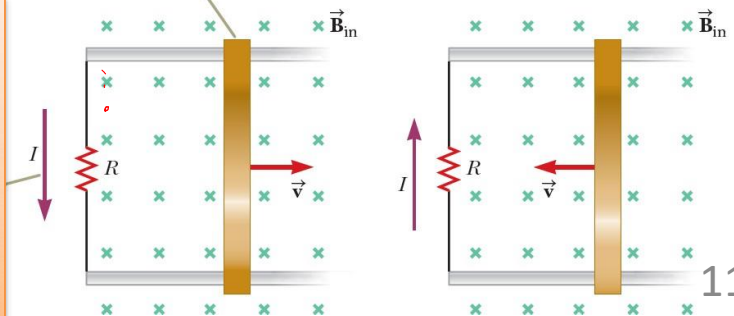


Νόμος του Lenz

- Η επαγόμενη ΗΕΔ και η μεταβολή στη ροή έχουν αντίθετα πρόσημα
- **Νόμος του Lenz:** Η κατεύθυνση της επαγόμενης ΗΕΔ είναι πάντοτε τέτοια, ώστε να αντιτίθεται στην αρχική μεταβολή της ροής που την προκάλεσε.
- **Νόμος του Lenz:** Η κατεύθυνση του ρεύματος που προκαλείται από μια ΗΕΔ είναι τέτοια, ώστε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από αυτό να αντιτίθεται στην αρχική μεταβολή ροής

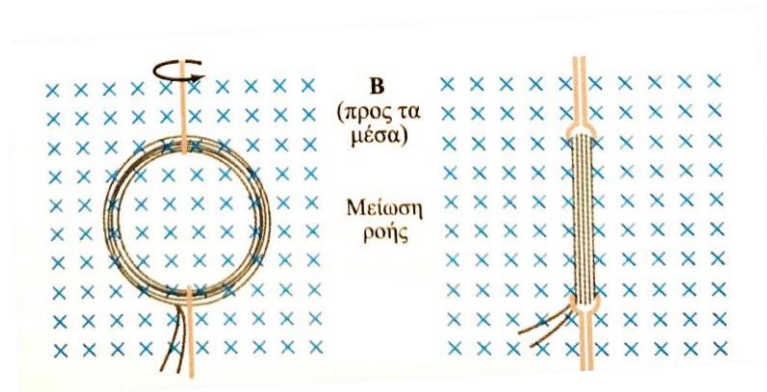
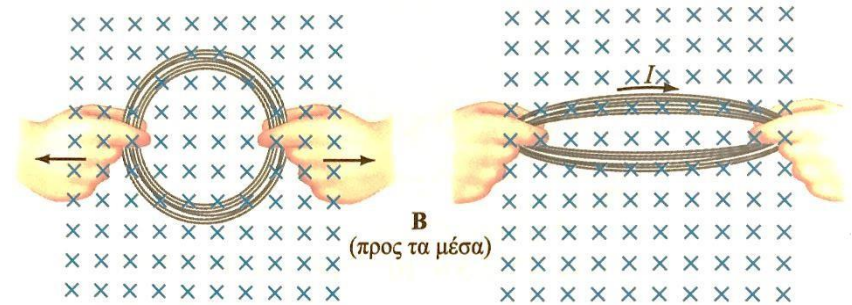
Καθώς ο αγωγός κυλάει προς τα δεξιά, η μαγνητική ροή (εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου με φορά προς τα μέσα) αυξάνει με το χρόνο

Νόμος Lenz: το επαγόμενο ρεύμα θα πρέπει να έχει φορά αριστερόστροφη ώστε να παραχθεί μαγνητικό πεδίο που αντιτίθεται στη μεταβολή με φορά προς τα έξω



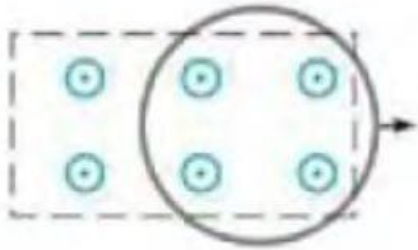
Τρόποι δημιουργίας ΗΕΔ

- Μεταβολή μαγνητικού πεδίου
- Μεταβολή του εμβαδού του βρόχου στο πεδίο
- Μεταβολή της γωνίας του βρόχου με το πεδίο

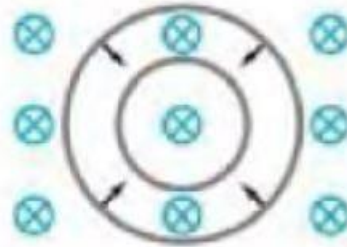


Εξάσκηση στο νόμο του Lenz

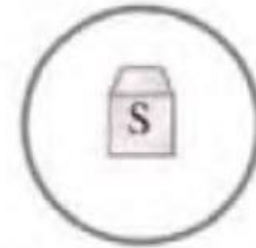
- Κατά ποιά κατεύθυνση επάγεται το ρεύμα στον κυκλικό βρόχο των σχημάτων σε κάθε περίπτωση;



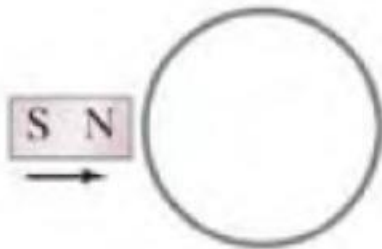
A) Έλξη ενός κυκλικού βρόχου προς τα δεξιά εκτός μαγνητικού πεδίου, που έχει φορά από τη σελίδα προς τον αναγνώστη



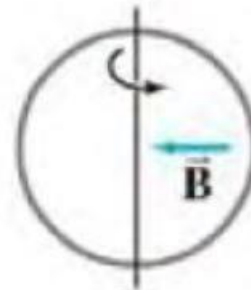
B) Συρρίκνωση βρόχου εντός μαγνητικού πεδίου, με φορά προς τη σελίδα



Γ) Ο S μαγνητικός πόλος κινείται προς το εσωτερικό του βρόχου ανάμεσα στη σελίδα



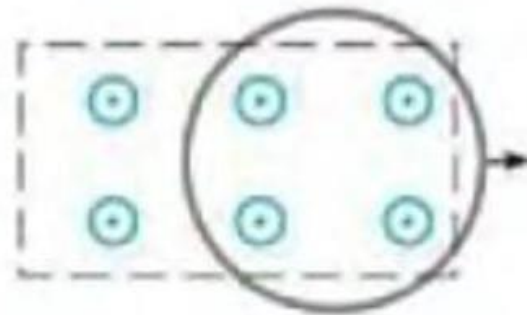
Δ) Ο N μαγνητικός πόλος κινείται προς το βρόχο, στο επίπεδο της σελίδας



Ε) Περιστροφή του βρόχου έλκοντας το αριστερό τμήμα προς το μέρος μας και ωθώντας το δεξί προς τη σελίδα. Το μαγνητικό πεδίο έχει φορά προς τα αριστερά

Εξάσκηση στο νόμο του Lenz

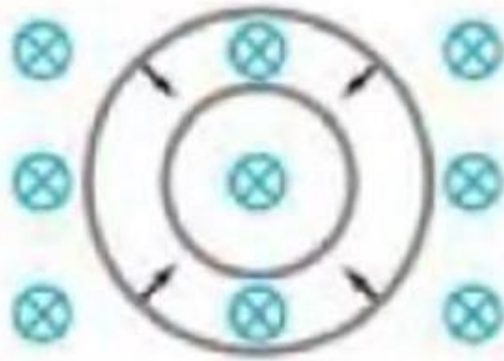
Το μαγνητικό πεδίο έχει φορά από τη σελίδα προς τα έξω και διέρχεται μέσα από το βρόχο. Εάν απομακρύνουμε το βρόχο έξω από το πεδίο, η μαγνητική ροή διαμέσου του βρόχου μειώνεται, οπότε η κατεύθυνση του επαγόμενου ρεύματος θα είναι τέτοια ώστε να τείνει να διατηρήσει σταθερή τη ροή από το βρόχο που μειώνεται: η φορά του ρεύματος, επομένως, θα είναι αντίθετη των δεικτών του ρολογιού, ώστε να παράγει ένα μαγνητικό πεδίο προς τα έξω



A) Έλξη ενός κυκλικού βρόχου προς τα δεξιά εκτός μαγνητικού πεδίου, που έχει φορά από τη σελίδα προς τον αναγνώστη

Εξάσκηση στο νόμο του Lenz

Το εξωτερικό πεδίο κατευθύνεται προς την σελίδα. Η επιφάνεια του πηνίου ελαττώνεται, οπότε η ροή θα μειώνεται. Έτσι το επαγόμενο ρεύμα θα έχει τη φορά των δεικτών του ρολογιού, παράγοντας ένα πεδίο με φορά από τον αναγνώστη προς τη σελίδα, τείνοντας να αντισταθμίσει την ελαττούμενη ροή.



B) Συρρίκνωση βρόχου
εντός μαγνητικού πεδίου,
με φορά προς τη σελίδα

Εξάσκηση στο νόμο του Lenz

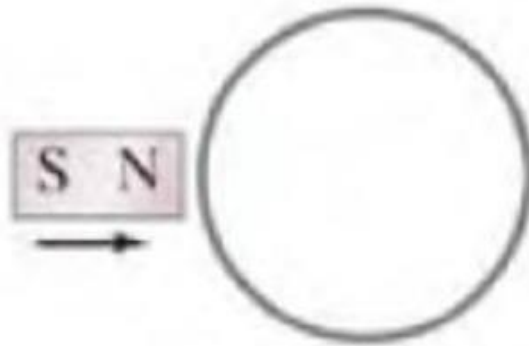
Οι μαγνητικές πεδιακές γραμμές κατευθύνονται προς τον πόλο S του μαγνήτη, οπότε καθώς ο μαγνήτης κινείται προς τα έξω και προς τον βρόχο, το μαγνητικό πεδίο θα έχει φορά προς τη σελίδα και η ένταση του θα αυξάνεται. Το επαγόμενο ρεύμα στο βρόχο θα έχει φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού, έτσι ώστε το πεδίο \mathbf{B} που παράγει να κατευθύνεται εκτός της σελίδας.



Γ) Ο S μαγνητικός πόλος κινείται προς το εσωτερικό του βρόχου κάθετα στη σελίδα

Εξάσκηση στο νόμο του Lenz

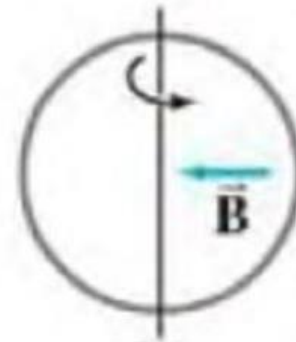
Το πεδίο είναι παράλληλο στο επίπεδο του βρόχου, οπότε από το βρόχο δεν διέρχεται καμία μαγνητική γραμμή και η ροή από το βρόχο είναι μηδενική συνεχώς. Επομένως, η ροή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου δεν μεταβάλλεται με το χρόνο και για αυτό δεν επάγεται ΗΕΔ ή ρεύμα στο βρόχο.



Δ) Ο Ν μαγνητικός πόλος
κινείται προς το βρόχο,
στο επίπεδο της σελίδας

Εξάσκηση στο νόμο του Lenz

Αρχικά δεν διέρχεται καθόλου ροή από το βρόχο. Όταν ο βρόχος αρχίσει να περιστρέφεται, το εξωτερικό πεδίο που διέρχεται από το βρόχο αυξάνεται από τα αριστερά. Για να αντιτεθεί σε αυτή τη μεταβολή της ροής, το πεδίο θα επάγει ένα ρεύμα στο βρόχο με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός πεδίου προς τα δεξιά.



Ε) Περιστροφή του βρόχου έλκοντας το αριστερό τμήμα προς το μέρος μας και ωθώντας το δεξί προς τη σελίδα. Το μαγνητικό πεδίο έχει φορά προς τα αριστερά

Απομάκρυνση πηνίου από μαγνητικό πεδίο

Ένα πηνίο 100 σπειρών τετραγωνικής διατομής με μήκος πλευράς $\ell = 5,0\text{cm}$ και συνολική αντίσταση $100\ \Omega$, είναι τοποθετημένο κάθετα σε ένα μαγνητικό πεδίο έντασης $0,600\ \text{T}$.

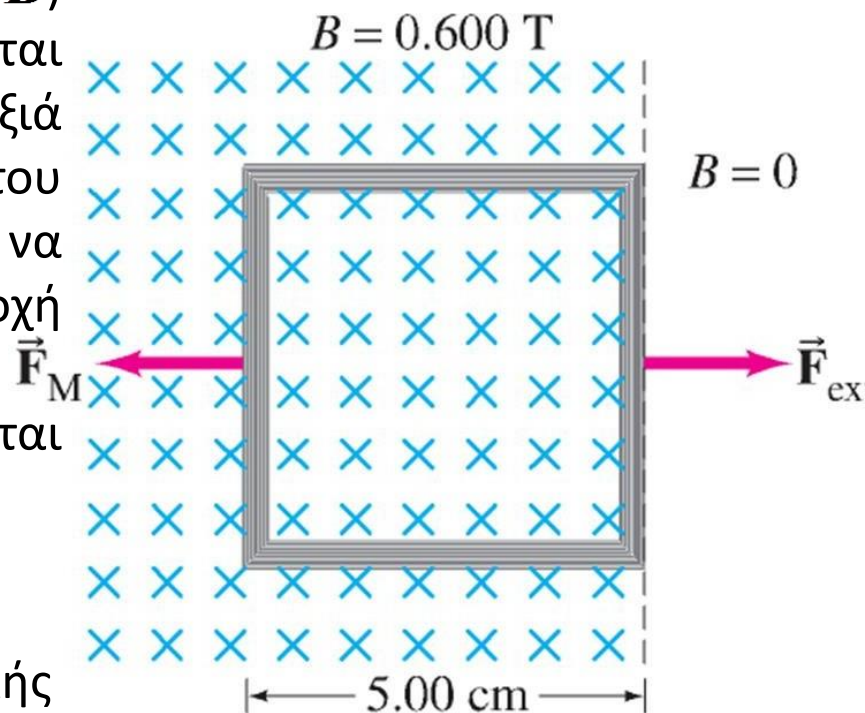
Το πηνίο απομακρύνεται από το πεδίο με σταθερή ταχύτητα (κινούμενο κάθετα στο \mathbf{B}) προς μια περιοχή, όπου το B ελαττώνεται απότομα στο μηδέν. Τη στιγμή $t=0$, η δεξιά πλευρά του πηνίου βρίσκεται οριακά εντός του πεδίου. Εάν απαιτούνται $0,100\ \text{s}$ για να απομακρυνθεί πλήρως το πηνίο στην περιοχή μηδενικού πεδίου να βρεθούν:

A) ο ρυθμός μεταβολής της ροής που διέρχεται από το πηνίο &

B) η ΗΕΔ και το ρεύμα που επάγονται.

Γ) Πόση ενέργεια καταναλώνεται στο πηνίο;

Δ) Ποια είναι η μέση τιμή της εξωτερικής δύναμης F_{ext} που απαιτείται για την απομάκρυνσή του;

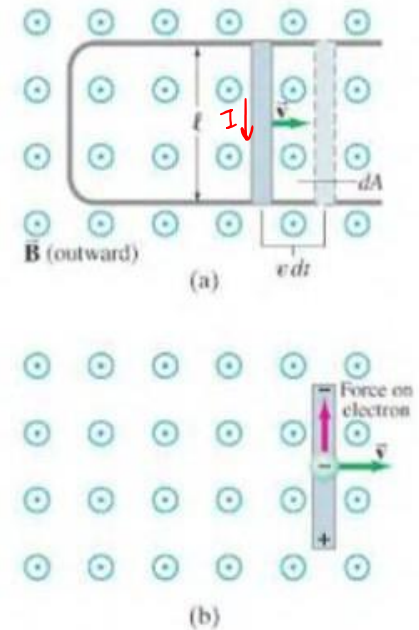


Παράδειγμα

Για να κινηθεί η ράβδος προς τα δεξιά με σταθερή ταχύτητα v , απαιτείται η εφαρμογή εξωτερικής δύναμης στη ράβδο με φορά προς τα δεξιά.

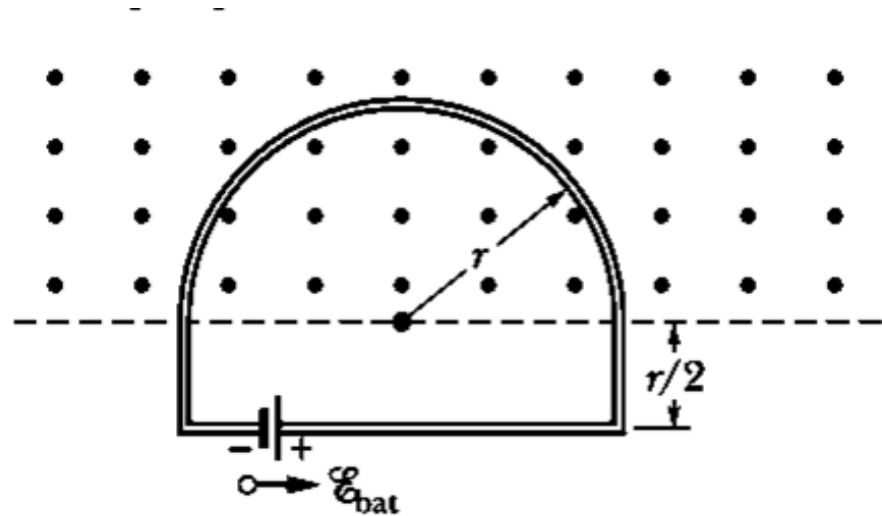
α) περιγράψτε και προσδιορίστε το μέτρο της απαιτούμενης δύναμης.

β) πόση είναι η εξωτερική ισχύς που προσδίδεται από την εξωτερική δύναμη για την μετακίνηση της ράβδου?



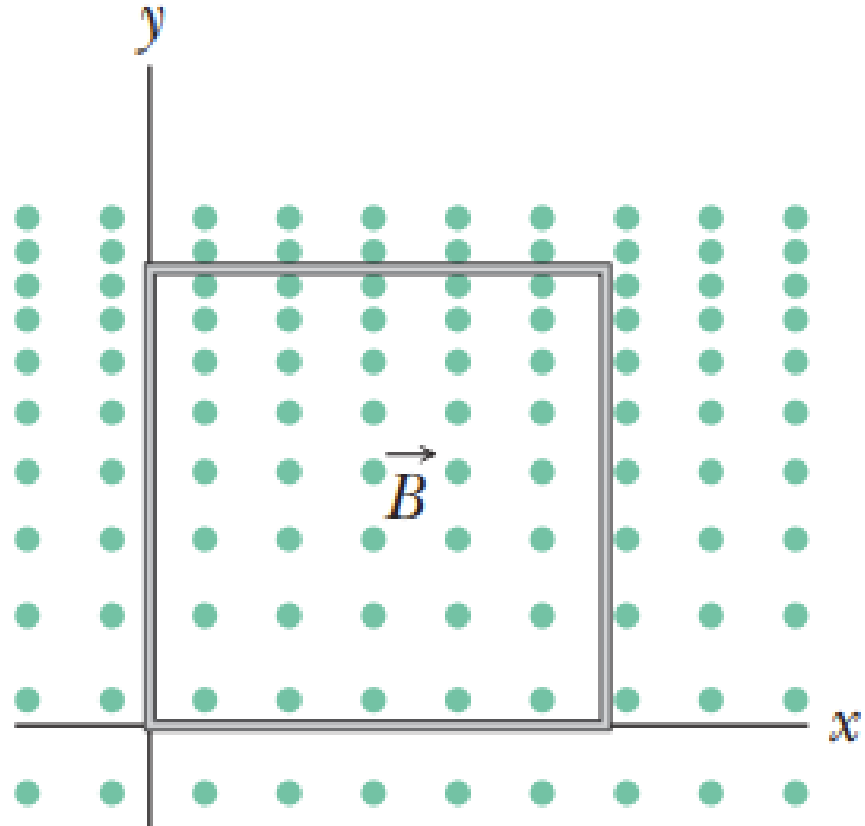
Παράδειγμα

- Αγώγιμος βρόχος αποτελείται από 3 ευθύγραμμα τμήματα κι ένα ημικυκλικό.
- Το ημικύκλιο με ακτίνα $r = 0.2\text{m}$ βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με κατεύθυνση προς το εσωτερικό της σελίδας. Το μέτρο του μαγνητικού πεδίου δίνεται από τη σχέση $B = 4t^2 + 2t + 3$. Ο βρόχος συνδέεται με μια μπαταρία με ΗΕΔ 2.0 V και αμελητέα εσωτερική αντίσταση. Η αντίσταση του βρόχου είναι $2.0\ \Omega$.
- Να υπολογιστεί το μέτρο της επαγόμενης ΗΕΔ στον βρόχο από το πεδίο τη στιγμή $t = 10\text{ s}$. Ποια θα είναι η κατεύθυνση της;



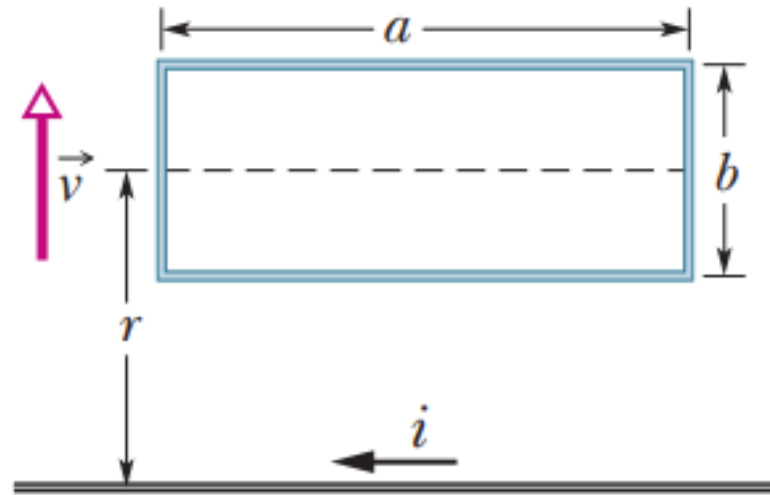
Παράδειγμα

- Ένας τετραγωνικός συρμάτινος βρόχος με πλευρά μήκους 2.0 cm βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο με κατεύθυνση προς τα έξω και μέτρο που δίνεται από τη σχέση $B = 4t^2 \gamma$ Tesla (το t είναι σε sec και το γ σε m).
- Τη χρονική στιγμή $t = 2.5$ sec να υπολογιστεί το μέτρο της επαγόμενης ΗΕΔ στον βρόχο από το πεδίο. Ποια θα είναι η κατεύθυνση της?

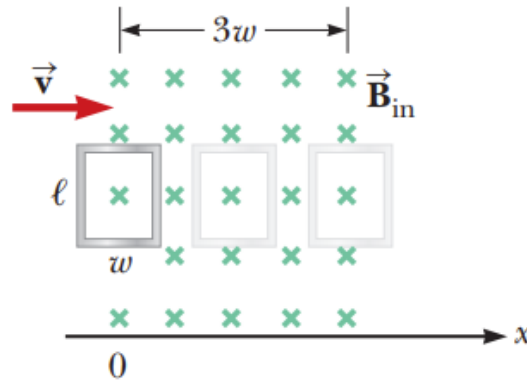


Παράδειγμα

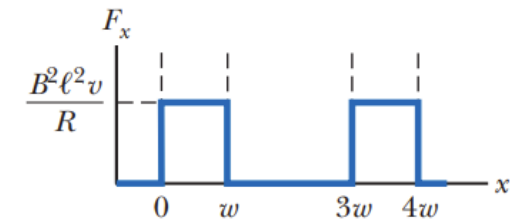
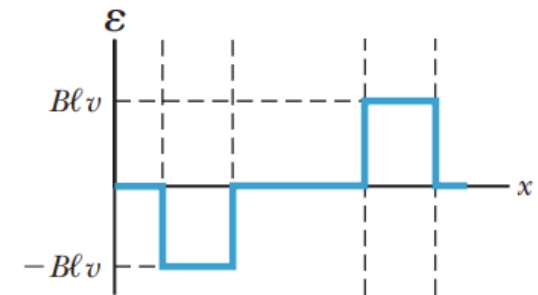
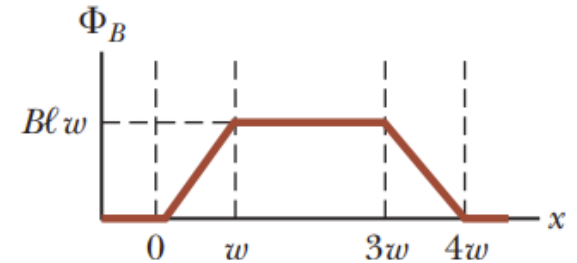
- Ένας ορθογώνιος συρμάτινος βρόχος με διαστάσεις $a = 2.2 \text{ cm}$ και $b = 0.80 \text{ cm}$ βρίσκεται κοντά σε μεγάλο ευθύγραμμο αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα $I = 4.7 \text{ A}$. Στη συνέχεια ο βρόχος απομακρύνεται από τον αγωγό με σταθερή ταχύτητα $v = 3.2 \text{ mm/s}$. Η αντίσταση του αγωγού είναι $R = 0.4 \text{ m}\Omega$.
- Να υπολογιστεί το μέγεθος της μαγνητικής ροής διαμέσου του βρόχου και το επαγόμενο ρεύμα όταν το κέντρο του βρόχου βρίσκεται σε απόσταση $r = 1.5b$.



Παράδειγμα

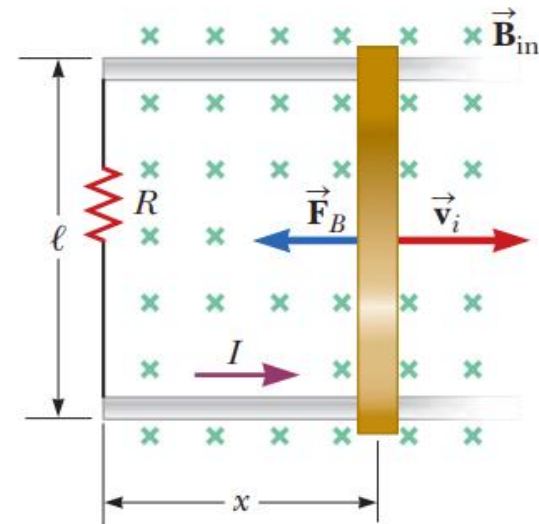


- Ένας τετραγωνικός βρόχος με διαστάσεις l και w και αντίσταση R κινείται με σταθερή ταχύτητα v προς τα δεξιά. Ο βρόχος διέρχεται από ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο B (προς τη σελίδα) και για απόσταση $3w$ προς τον άξονα των x .
- Να σχολιαστεί η μαγνητική ροή σε διάφορες θέσεις καθώς ο βρόχος περνάει μέσα από το μαγνητικό πεδίο.
- Να σχολιαστεί η επαγόμενη ΗΕΔ σε διάφορες θέσεις καθώς ο βρόχος περνάει μέσα από το μαγνητικό πεδίο.
- Να σχολιαστεί η δύναμη F_x που πρέπει να εφαρμοστεί για να αντισταθεί στην F_B και να κρατήσει τη v σταθερή.



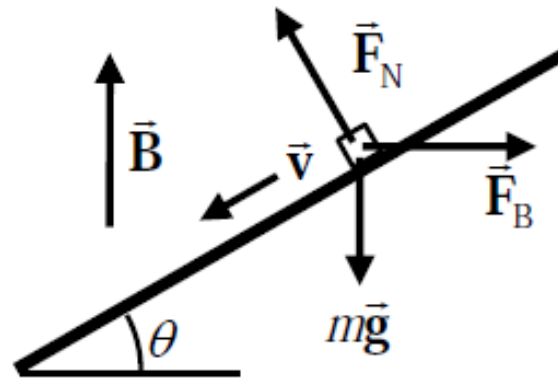
Παράδειγμα

- Αγωγίμη ράβδος κινείται πάνω σε δυο παράλληλους αγωγούς (χωρίς τριβή) σε σταθερό μαγνητικό πεδίο. Η ράβδος έχει μάζα m και μήκος l . Σε χρόνο $t=0$ η ράβδος αναγκάζεται να κινηθεί με αρχική ταχύτητα v προς τα δεξιά.
- Να βρεθεί η ταχύτητα της ράβδου συναρτήσει του χρόνου.



Παράδειγμα

Δύο αγωγοί με αμελητέα αντίσταση, σε απόσταση 32cm, ηρεμούν σε κεκλιμένο επίπεδο 6° . Ενώνονται στο κατώτερο σημείο του επιπέδου με μια αντίσταση 0.6Ω . Στα άκρα των αγωγών στην κορυφή του επιπέδου τοποθετείται χάλκινη ράβδος μάζας 0.040kg με αμελητέα αντίσταση. Η διάταξη εισέρχεται σε κατακόρυφο ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο 0.55T . Ποια είναι η τελική σταθερή ταχύτητα της ράβδου καθώς ολισθαίνει χωρίς τριβές πάνω στους αγωγούς?



Ηλεκτρικό πεδίο από μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή

- Αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα -> ηλεκτρικό πεδίο
- Μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή -> ρεύμα στον αγωγό-> ηλεκτρικό πεδίο

- Σχέση E και V (ανάμεσα σε δυο σημεία)

$$V_{ab} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$$

- ΗΕΔ που επάγεται σε κύκλωμα

$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$$

- Γενική μορφή του νόμου του Faraday

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

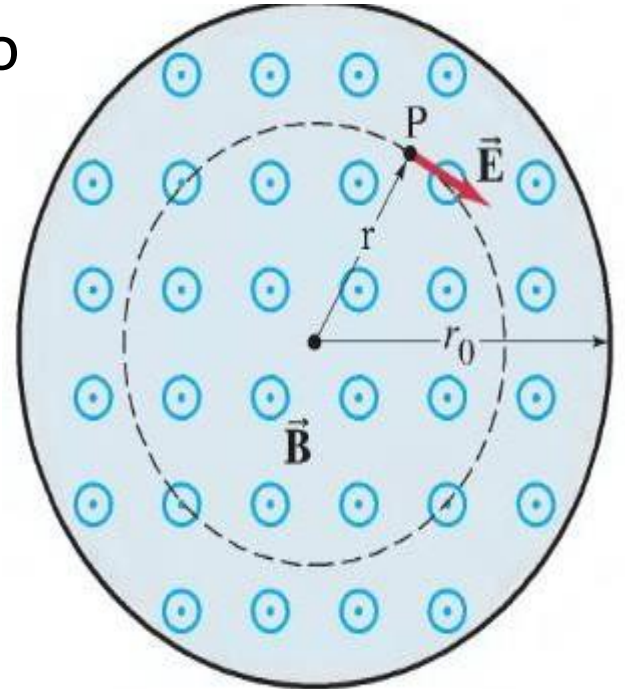
Παράδειγμα

Το μαγνητικό πεδίο \vec{B} μεταξύ των πόλων, κυκλικής επιφάνειας ακτίνας r_0 , ενός ηλεκτρομαγνήτη, είναι σχεδόν ομοιόμορφο σε οποιοδήποτε σημείο.

Το \vec{B} μεταβάλλεται στο χρόνο με σταθερό ρυθμό dB/dt σε κάθε σημείο.

Πέρα από την κυκλική περιοχή ($r > r_0$), υποθέτουμε ότι $\vec{B} = 0$ για κάθε χρονική στιγμή.

Προσδιορίστε το ηλεκτρικό πεδίο \vec{E} που οφείλεται στο μεταβαλλόμενο \vec{B} σε οποιοδήποτε σημείο P σε απόσταση r από το κέντρο της κυκλικής περιοχής.



- Διαφορά μεταξύ ηλεκτροστατικού πεδίου από μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία και από ακίνητα ηλεκτρικά φορτία
- Ηλεκτροστατική

$$V_{ba} = V_b - V_a = - \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$$

- Ολοκλήρωση κατά μήκος κλειστού βρόχου

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = 0$$

- Η ηλεκτροστατική δύναμη είναι συντηρητική
- Σε μη ηλεκτροστατική περίπτωση

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad \text{Μη συντηρητική}$$