

SEARS & ZEMANSKY

# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΗ ΦΥΣΙΚΗ με Σύγχρονη Φυσική

3Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ

Τόμος Β

## ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΟΠΤΙΚΗ - ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ

YOUNG ΚΑΙ FREEDMAN

ΔΙΑΦΑΝΕΙΕΣ  
ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ  
1. ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗ

ΕΠΙΛΟΓΗ,  
ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ  
ΚΑΙ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:  
Ηλίας Κατσούφης

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΚΟ  
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ:  
Τζένη Πάλμου

Θ.Η. Αλεξόπουλος, ΕΜΠ  
Ι.Α. Αρβανιτίδης, ΑΠΘ  
Α.Α. Αργυρίου, Π. Πατρών  
Ε.Α. Δρης, ΕΜΠ  
Η.Σ. Ζουμπούλης, ΕΜΠ  
Η.Κ. Κατσούφης, ΕΜΠ  
Γ.Α. Κουρούκλης, ΑΠΘ  
Κ.Ε. Παρασκευαΐδης, ΕΜΠ  
Μ.Ν. Πιζάνιας, Π. Πατρών  
Ι.Π. Ρίζος, Π. Ιωαννίνων  
Θ.Ν. Τομαράς, Π. Κρήτης  
Κ. Χριστοδουλίδης, ΕΜΠ

## Απόδοση βιβλίου στην Ελληνική γλώσσα και Επιμέλεια (αλφαβητικά):

Θ.Η. Αλεξόπουλος, Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Ι.Α. Αρβανιτίδης, Αναπλ. Καθηγητής Φυσικής του Τμήματος Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Α.Α. Αργυρίου, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών

Ε.Α. Δρης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Η.Σ. Ζουμπούλης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Η.Κ. Κατσούφης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Γ.Α. Κουρούκλης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής του Τμήματος Χημικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Κ.Ε. Παρασκευαΐδης, τ. Αναπλ. Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Μ.Ν. Πιζάνιας, Ομότιμος Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών

Ι.Π. Ρίζος, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Θ.Ν. Τομαράς, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης

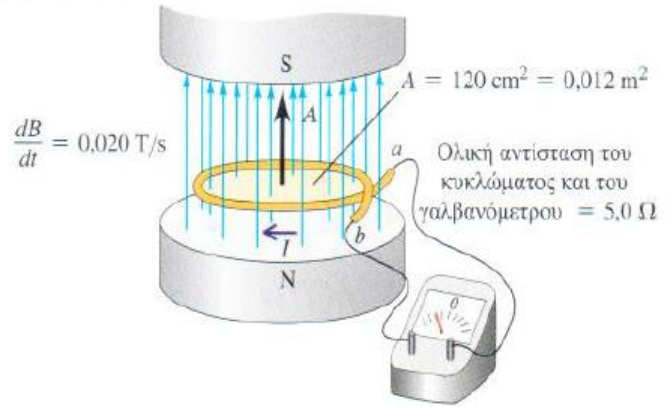
Κ. Χριστοδουλίδης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 29.1 ΗΕΔ ΚΑΙ ΕΠΑΓΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ ΣΕ ΕΝΑΝ ΒΡΟΧΟ**



Το μαγνητικό πεδίο ανάμεσα στους πόλους του ηλεκτρομαγνήτη του Σχ. 29.5 είναι ομογενές σε κάθε χρονική στιγμή, αλλά το μέτρο του αυξάνεται με ρυθμό 0,020 T/s. Η επιφάνεια του αγωγίμου βρόχου μέσα στο πεδίο είναι 120 cm<sup>2</sup> και η ολική αντίσταση του κυκλώματος, συμπεριλαμβανομένου του γαλβανόμετρου, είναι 5,0 Ω. (α) Βρείτε την επαγόμενη ΗΕΔ και το επαγόμενο ρεύμα στο κύκλωμα. (β) Ποια επίδραση θα έχει η αντικατάσταση του αγωγίμου βρόχου από έναν μονωτικό στην επαγόμενη ΗΕΔ και στο επαγόμενο ρεύμα;

**29.5** Ένας ακίνητος αγωγίμος βρόχος μέσα σε ένα αυξανόμενο μαγνητικό πεδίο.



**ΛΥΣΗ**

**ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ:** Η μαγνητική ροή  $\Phi_B$  μέσω του βρόχου μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται το μαγνητικό πεδίο. Έτσι θα υπάρχει μια επαγόμενη ΗΕΔ  $\mathcal{E}$  και ένα επαγόμενο ρεύμα  $I$  στον βρόχο. Υπολογίζουμε τη  $\Phi_B$  χρησιμοποιώντας την Εξ. (29.2) και έπειτα βρίσκουμε την  $\mathcal{E}$  μέσω του νόμου του Faraday. Τέλος, υπολογίζουμε την  $I$  από τη σχέση  $\mathcal{E} = IR$ , όπου  $R$  είναι η ολική αντίσταση του κυκλώματος που συμπεριλαμβάνει τον βρόχο.

**ΕΠΙΛΥΣΗ:** (α) Το διάνυσμα επιφανείας του βρόχου  $A$  είναι κάθετο στο επίπεδο του βρόχου· επιλέγουμε το  $A$  να είναι κατακόρυφο προς τα επάνω. Τότε τα διανύσματα  $A$  και  $B$  είναι παράλληλα και καθώς το  $B$  είναι ομογενές, η μαγνητική ροή που διαπερνά τον βρόχο είναι  $\Phi_B = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = BA \cos\theta = BA$ . Η επιφάνεια  $A = 0,012 \text{ m}^2$  είναι σταθερή, άρα ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής είναι

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_B}{dt} &= \frac{d(BA)}{dt} = \frac{dB}{dt}A = (0,020 \text{ T/s})(0,012 \text{ m}^2) \\ &= 2,4 \times 10^{-4} \text{ V} = 0,24 \text{ mV} \end{aligned}$$

Αυτή, αφήνοντας κατά μέρος το πρόσημο που δεν έχουμε συζητήσει ακόμη, είναι η επαγόμενη ΗΕΔ  $\mathcal{E}$ . Το αντίστοιχο επαγόμενο ρεύμα είναι

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{2,4 \times 10^{-4} \text{ V}}{5,0 \text{ } \Omega} = 4,8 \times 10^{-5} \text{ A} = 0,048 \text{ mA}$$

(β) Με την αντικατάσταση του αγωγίμου από έναν μονωτικό βρόχο κάνουμε την αντίσταση του βρόχου πολύ μεγάλη. Ο νόμος του Faraday, Εξ. (29.3), δεν εμπλέκει την αντίσταση του κυκλώματος με κανέναν τρόπο, έτσι η επαγόμενη ΗΕΔ δεν μεταβάλλεται. Το ρεύμα όμως θα είναι μικρότερο, σύμφωνα με την εξίσωση  $I = \mathcal{E}/R$ . Στην περίπτωση που το πηνίο είναι κατασκευασμένο από έναν τέλειο μονωτή με άπειρη αντίσταση, το επαγόμενο ρεύμα είναι μηδέν. Η κατάσταση αυτή είναι ανάλογη με μια απομονωμένη μπαταρία που οι ακροδέκτες της δεν έχουν συνδεθεί με τίποτα: Υπάρχει μία ΗΕΔ, αλλά δεν υπάρχει ροή ρεύματος.

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ:** Μπορούμε να επαληθεύσουμε τη συνέπεια των μονάδων σε αυτόν τον υπολογισμό σημειώνοντας ότι η σχέση της μαγνητικής δύναμης  $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  υποδηλώνει πως οι μονάδες του  $\mathbf{B}$  είναι οι μονάδες της δύναμης διαιρεμένες με μονάδες (φορτίου επί ταχύτητα):  $1 \text{ T} = (1 \text{ N})/(1 \text{ C} \cdot \text{m/s})$ . Τότε, οι μονάδες της μαγνητικής ροής είναι  $(1 \text{ T})(1 \text{ m}^2) = 1 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m/C}$  και του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής  $1 \text{ N} \cdot \text{m/C} = 1 \text{ J/C} = 1 \text{ V}$ . Άρα, η μονάδα του  $d\Phi_B/dt$  είναι το volt, όπως επιβάλλει η Εξ. (29.3). Επίσης, θυμηθείτε ότι η μονάδα της μαγνητικής ροής είναι το weber (Wb):  $1 \text{ T} \cdot \text{m}^2 = 1 \text{ Wb}$ , άρα  $1 \text{ V} = 1 \text{ Wb/s}$ .

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 29.2 ΜΕΤΡΟ ΚΑΙ ΦΟΡΑ ΜΙΑΣ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗΣ ΗΕΔ



Ένα πηνίο που αποτελείται από 500 κυκλικούς συρματινούς βρόχους με ακτίνα 4,00 cm είναι τοποθετημένο ανάμεσα στους πόλους ενός μεγάλου ηλεκτρομαγνήτη. Το μαγνητικό πεδίο είναι σταθερό, με κατεύθυνση που σχηματίζει γωνία  $60^\circ$  με το επίπεδο του πηνίου· το πεδίο ελαττώνεται με ρυθμό 0,200 T/s. Βρείτε το μέτρο και τη φορά της επαγόμενης ΗΕΔ.

### ΛΥΣΗ

**ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ:** Η ζητούμενη μεταβλητή μας είναι η ΗΕΔ που επάγεται από μια μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή η οποία διαπερνά το πηνίο. Η ροή μεταβάλλεται επειδή

**ΠΡΟΣΟΧΗ** Θυμηθείτε πώς ορίζεται η  $\phi$ . Μπορεί να μπήκατε στον πειρασμό να θεωρήσετε ότι στο πρόβλημα αυτό  $\phi = 60^\circ$ . Αν το κάνατε, να έχετε υπόψη ότι  $\phi$  είναι η γωνία μεταξύ των  $A$  και  $B$ , και όχι η γωνία μεταξύ του  $B$  και του επιπέδου του πηνίου. **!**

Από την (Εξ. 29.4), η επαγόμενη ΗΕΔ στο πηνίο των  $N = 500$  σπειρών είναι

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -N \frac{dB}{dt} A \cos \phi \\ &= -500(-0,200 \text{ T/s})\pi(0,0400 \text{ m})^2(\cos 30^\circ) = 0,435 \text{ V} \end{aligned}$$

Το θετικό πρόσημο της λύσης σημαίνει ότι, καθώς δείχνετε με τον δεξιό σας αντίχειρα προς την κατεύθυνση του διανύσματος επιφανείας  $A$  ( $30^\circ$  κάτω από το  $B$  στο Σχ. 29.7), η θετική φορά για την  $\mathcal{E}$  είναι η φορά των λυγισμένων δαχτύλων του δεξιού σας χεριού. Αν παρατηρούσατε το πηνίο από την αριστερή πλευρά του Σχ. 29.7 και βλέπατε προς την κατεύθυνση του  $A$ , τότε η ΗΕΔ θα είχε τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

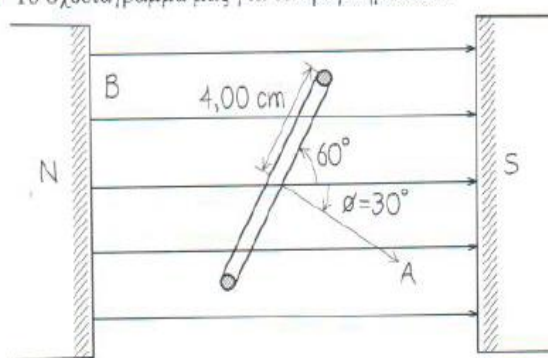
**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ:** Αν τα άκρα του σύρματος συνδεθούν μεταξύ τους, η φορά του ρεύματος στο πηνίο θα έχει την ίδια φορά με την ΗΕΔ

ελαττώνεται το μέτρο του μαγνητικού πεδίου. Επιλέγουμε το διάνυσμα επιφανείας  $A$  να έχει την κατεύθυνση που δείχνει το Σχ. 29.7. Με την επιλογή αυτή, η γεωμετρική διάταξη μοιάζει πολύ με εκείνη του Σχ. 29.6b. Εκείνο το σχήμα θα μας βοηθήσει να καθορίσουμε τη φορά της επαγόμενης ΗΕΔ.

**ΕΠΙΛΥΣΗ:** Το μαγνητικό πεδίο στο πηνίο είναι ομογενές σε όλο τον βρόχο, έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε τη ροή χρησιμοποιώντας την Εξ. (29.2):  $\Phi_B = BA \cos \phi$ , όπου  $\phi = 30^\circ$ . Σε αυτήν την έκφραση, η μόνη ποσότητα που μεταβάλλεται με τον χρόνο είναι το μέτρο  $B$  του πεδίου, άρα  $d\Phi_B/dt = (dB/dt)A \cos \phi$ .

συνεχίζεται

### 29.7 Το σχεδιάγραμμά μας για το πρόβλημα αυτό



– δηλαδή ίδια με τη φορά των δεικτών του ρολογιού κατά την παρατήρηση από την αριστερή πλευρά του πηνίου. Ένα ρεύμα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού αυξάνει τη μαγνητική ροή μέσα από το πηνίο και συνεπώς τείνει να αντιτεθεί στη μείωση της ολικής ροής. Αυτό είναι ένα παράδειγμα του νόμου του Lenz, τον οποίο θα μελετήσουμε στο Εδ. 29.3.



Το Σχ. 29.8a παρουσιάζει μια απλή εκδοχή ενός εναλλάκτη, μιας διάταξης που παράγει ΗΕΔ. Ένας τετραγωνικός βρόχος περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  γύρω από τον άξονα που φαίνεται στο σχήμα. Το μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$  είναι ομογενές και σταθερό. Τη χρονική στιγμή  $t = 0$ , είναι  $\phi = 0$ . Να βρεθεί η επαγόμενη ΗΕΔ.

**ΛΥΣΗ**

**ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ:** Το μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$  και η επιφάνεια του βρόχου  $A$  είναι σταθερά, όμως η ροή που διέρχεται από τον βρόχο μεταβάλλεται καθώς αυτός περιστρέφεται, άρα μεταβάλλεται και η γωνία  $\phi$  ανάμεσα στο  $\mathbf{B}$  και το διάνυσμα επιφάνειας  $\mathbf{A}$  (Σχ. 29.8a). Καθώς η γωνιακή ταχύτητα είναι σταθερή και  $\phi = 0$  για  $t = 0$ , η γωνία συναρτήσεται του χρόνου είναι  $\phi = \omega t$ .

**ΕΠΙΛΥΣΗ:** Το μαγνητικό πεδίο είναι ομογενές σε όλο το πηνίο, άρα η μαγνητική ροή είναι  $\Phi_B = BA \cos \phi = BA \cos \omega t$ . Συνεπώς, σύμφωνα με τον νόμο του Faraday [Εξ. (29.3)], η επαγόμενη ΗΕΔ είναι

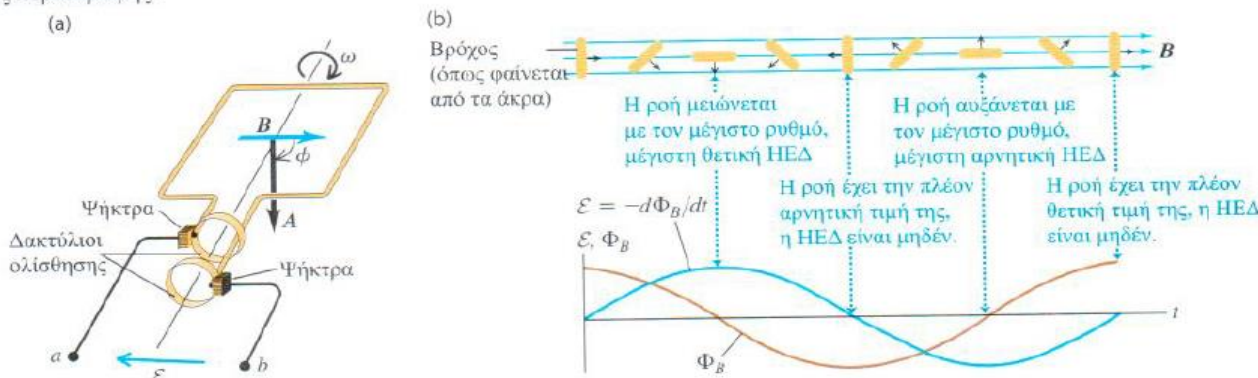
$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(BA \cos \omega t) = \omega BA \sin \omega t$$

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ:** Η επαγόμενη ΗΕΔ,  $\mathcal{E}$ , μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με τον χρόνο (δείτε Σχ. 29.8b). Όταν το επίπεδο του βρόχου είναι κάθετο στο  $\mathbf{B}$  ( $\phi = 0^\circ$  ή  $180^\circ$ ), η  $\Phi_B$  φθάνει στη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της. Τότε ο στιγμιαίος ρυθμός μεταβολής της είναι μηδέν, άρα και η  $\mathcal{E}$  είναι μηδέν. Αντίθετα, η  $\mathcal{E}$  φθάνει στη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της όταν το επίπεδο του βρόχου είναι παράλληλο στο  $\mathbf{B}$  ( $\phi = 90^\circ$  ή  $270^\circ$ ) και η  $\Phi_B$  έχει την πιο γρήγορη μεταβολή της. Παρατηρούμε ότι η επαγόμενη ΗΕΔ δεν εξαρτάται από το σχήμα του βρόχου, αλλά μόνο από το εμβαδόν του.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον εναλλάκτη ως πηγή ΗΕΔ σε εξωτερικό κύκλωμα με τη βοήθεια των δύο δακτύλιων ολίσθησης, οι οποίοι περιστρέφονται με τον βρόχο, όπως δείχνει το Σχ. 29.8a. Οι δακτύλιοι ολισθαίνουν σε σχέση με τις σταθερές επαφές που ονομάζονται ψήκτρα, οι οποίες είναι συνδεδεμένες

συνεχίζεται

**29.8** (a) Σχηματικό διάγραμμα ενός απλού εναλλάκτη. Ένας αγωγίμος βρόχος περιστρέφεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο παράγοντας μια ΗΕΔ. Το κάθε άκρο του βρόχου συνδέεται με το εξωτερικό κύκλωμα μέσω του αντίστοιχου δακτύλιου ολίσθησης. Το σύστημα παρουσιάζεται τη χρονική στιγμή που η γωνία είναι  $\phi = \omega t = 90^\circ$ . (b) Γραφική παράσταση της ροής μέσα από τον βρόχο καθώς και της επαγόμενης ΗΕΔ στα άκρα  $a$  και  $b$ , που συνοδεύονται από τους αντίστοιχους προσανατολισμούς του βρόχου κατά τη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής.



με τα άκρα εξόδου  $a$  και  $b$ . Αφού η επαγόμενη ΗΕΔ μεταβάλλεται ημιτονοειδώς, το ρεύμα που επάγεται στο κύκλωμα είναι ένα εναλλασσόμενο ρεύμα που μεταβάλλεται επίσης ημιτονοειδώς σε μέτρο και φορά. Το πλάτος της ΗΕΔ μπορεί να αυξηθεί αυξάνοντας την ταχύτητα περιστροφής, το μέτρο του πεδίου, ή το εμβαδόν του βρόχου χρησιμοποιώντας  $N$  σπείρες αντί για μία, όπως στην Εξ. (29.4).

Οι εναλλάκτες χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα για να δημιουργήσουν τα ρεύματα του συστήματος ανάφλεξης, των φώτων και του οπτικοακουστικού συστήματος. Η διάταξη είναι λίγο διαφορετική απ' ό,τι στο παράδειγμα αυτό· αντί να υπάρχει ένας περιστρεφόμενος βρόχος σε μαγνητικό πεδίο, ο βρόχος παραμένει ακίνητος και περιστρέφεται ένας ηλεκτρομαγνήτης. (Η περιστροφή επιτυγχάνεται από μια μηχανική σύνδεση μεταξύ του εναλλάκτη και της μηχανής.) Το αποτέλεσμα όμως είναι το ίδιο· η ροή που διαπερνά τον βρόχο μεταβάλλεται ημιτονοειδώς, προκαλώντας μια ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενη ΗΕΔ. Μεγαλύτεροι εναλλάκτες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Σχ. 29.9).

**29.9** Ένας εναλλάκτης για εμπορική χρήση χρησιμοποιεί πολλές σπείρες σύρματος που έχουν περιελιχθεί σε ένα κατασκευασμα το οποίο μοιάζει με βαρέλι και ονομάζεται οπλισμός. Ο οπλισμός και το σύρμα παραμένουν ακίνητα καθώς οι ηλεκτρομαγνήτες περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα (δεν φαίνεται στο σχήμα) που περνάει από το κέντρο του οπλισμού. Η επαγόμενη ΗΕΔ που προκύπτει είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που θα έδινε ένας μονός συμπαγής βρόχος.



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 29.4 ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ II: ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ DC ΚΑΙ ΑΗΕΔ ΣΕ ΕΝΑΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Ο εναλλάκτης του Παράδ. 29.3 παράγει μια ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενη ΗΕΔ και κατά συνέπεια ένα εναλλασσόμενο ρεύμα. Το Σχ. 29.10α δείχνει το πρότυπο μιας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος (dc), η οποία παράγει μια ΗΕΔ που έχει πάντα το ίδιο πρόσημο. Η διάταξη του διαχωρισμένου δακτυλίου, που ονομάζεται *συλλέκτης*, αντιστρέφει τις συνδέσεις με το εξωτερικό κύκλωμα στις γωνιακές θέσεις όπου αντιστρέφεται η ΗΕΔ. Το Σχ. 29.10b δείχνει την ΗΕΔ που προκύπτει. Οι γεννήτριες dc που κυκλοφορούν στο εμπόριο διαθέτουν έναν μεγάλο αριθμό πηνίων και τμήματα συλλεκτών, που εξομαλύνουν τις ανωμαλίες στην ΗΕΔ, με αποτέλεσμα η τάση στα άκρα της πηγής να μην έχει απλώς μία μόνη κατεύθυνση αλλά να είναι και πρακτικά σταθερή. Η διάταξη με ψήκτρες και συλλέκτη είναι ίδια με αυτήν του κινητήρα συνεχούς ρεύματος που αναλύθηκε στο Εδ. 27.8. Η *αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (ΑΗΕΔ)* του κινητήρα είναι απλώς η ΗΕΔ που επάγεται από τη μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή μέσα από το περιστρεφόμενο πηνίο του. Θεωρήστε έναν κινητήρα με τετράγωνο βρόχο, που η κάθε πλευρά του έχει μήκος 10,0 cm, με 500 σπείρες. Αν το μαγνητικό πεδίο έχει μέτρο 0,200 T, για ποια τιμή της ταχύτητας περιστροφής η μέση ΑΗΕΔ του κινητήρα θα ισούται με 112 V;

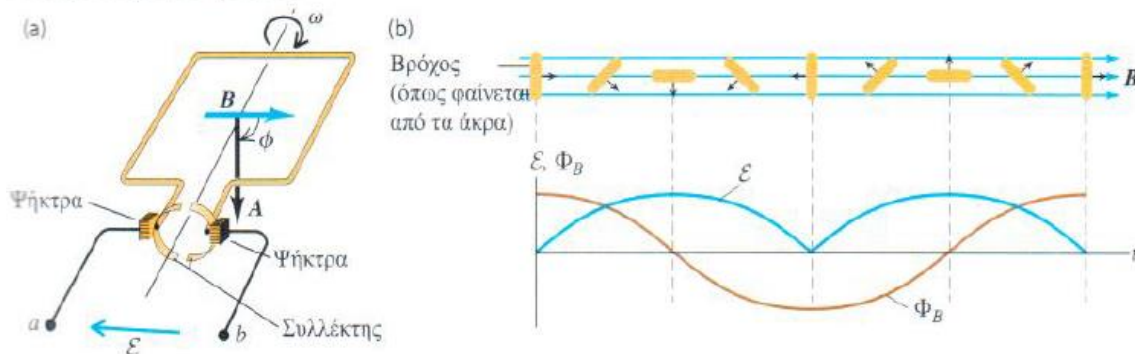
### ΛΥΣΗ

**ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ:** Σε ό,τι αφορά τον περιστρεφόμενο βρόχο, η κατάσταση είναι ίδια όπως στο Παράδ. 29.3, με μόνη διαφορά ότι τώρα έχουμε  $N$  σπείρες σύρματος. Χωρίς τον συλλέκτη, η ΗΕΔ θα εναλλασσόταν μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών και θα είχε μέση τιμή μηδέν (Σχ. 29.8b). Με την τοποθέτηση όμως του συλλέκτη, η ΗΕΔ δεν είναι ποτέ αρνητική και η μέση τιμή της είναι θετική (Σχ. 29.10b). Θα χρησιμοποιήσουμε το αποτέλεσμα που βρήκαμε στο Παράδ. 29.3 για να βρούμε μια έκφραση γι' αυτήν τη μέση τιμή και θα τη λύσουμε για να βρούμε την ταχύτητα περιστροφής  $\omega$ .

**ΕΠΙΛΥΣΗ:** Μία σύγκριση των Σχ. 29.8b και 29.10b δείχνει ότι η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα είναι απλώς  $N$  φορές η απόλυτη τιμή της ΗΕΔ που βρήκαμε για έναν εναλλάκτη στο Παράδ. 29.3, όπως στην Εξ. (29.4):  $|\mathcal{E}| = N\omega BA |\sin \omega t|$ . Για να βρούμε τη μέση ΑΗΕΔ, θα πρέπει να αντικαταστήσουμε το  $|\sin \omega t|$  με τη μέση τιμή του. Αυτήν τη βρίσκουμε ολοκληρώνοντας το  $|\sin \omega t|$  σε ένα χρονικό διάστημα μισού κύκλου, από

*συνεχίζεται*

**29.10** (a) Σχηματικό διάγραμμα γεννήτριας dc που χρησιμοποιεί έναν συλλέκτη διαχωρισμένου δακτυλίου. Τα ημικύκλια του δακτυλίου είναι συνδεδεμένα στον βρόχο και περιστρέφονται μαζί του. (b) Γραφική παράσταση της επαγόμενης ΗΕΔ στα άκρα  $a$  και  $b$ . Συγκρίνετε με το Σχ. 29.8b.



$t = 0$  έως  $t = T/2 = \pi/\omega$ , και διαιρώντας με το αντίστοιχο χρονικό διάστημα  $\pi/\omega$ . Κατά τη διάρκεια αυτού του μισού κύκλου, η συνάρτηση του ημιτόνου είναι θετική, άρα  $|\sin \omega t| = \sin \omega t$ , και βρίσκουμε

$$(|\sin \omega t|)_{\text{av}} = \frac{\int_0^{\pi/\omega} \sin \omega t \, dt}{\pi/\omega} = \frac{2}{\pi}$$

Συνεπώς, η μέση ΑΗΕΔ είναι

$$\mathcal{E}_{\text{av}} = \frac{2N\omega BA}{\pi}$$

Λύνοντας ως προς  $\omega$  βρίσκουμε

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\pi \mathcal{E}_{\text{av}}}{2NBA} \\ &= \frac{\pi(112 \text{ V})}{2(500)(0,200 \text{ T})(0,100 \text{ m})^2} = 176 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

(Θυμηθείτε από το Παράδ. 29.1 ότι  $1 \text{ V} = 1 \text{ Wb/s} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ .)

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ:** Η μέση αντιηλεκτρεγερτική δύναμη είναι ανάλογη της  $\omega$ . Επομένως, όσο πιο αργή είναι η ταχύτητα περιστροφής, τόσο μικρότερη είναι η ΑΗΕΔ και τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να καεί ο κινητήρας, όπως περιγράψαμε στο Παράδ. 27.11 (Εδ. 27.8).



Το Σχ. 29.11 δείχνει έναν αγωγό με σχήμα U μέσα σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$  κάθετο στο επίπεδο του σχήματος και με κατεύθυνση προς το εσωτερικό της σελίδας. Τοποθετούμε μια μεταλλική ράβδο (η «ολισθαίνουσα ράβδος») με μήκος  $L$  κάθετα στους δύο βραχίονες του αγωγού, ώστε να σχηματίζεται ένα κύκλωμα, και την κινούμε προς τα δεξιά με σταθερή ταχύτητα  $v$ . Αυτό επάγει μια ΗΕΔ και ένα ρεύμα, και για τον λόγο αυτό η διάταξη ονομάζεται *γεννήτρια ολισθαίνουσας ράβδου*. Βρείτε το μέτρο και τη φορά της επαγόμενης ΗΕΔ που θα προκύψει.

## ΛΥΣΗ

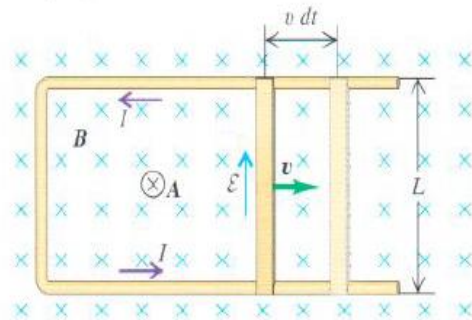
**ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ:** Η μαγνητική ροή μεταβάλλεται επειδή η επιφάνεια του βρόχου –οριοθετημένη στα δεξιά από την κινούμενη ράβδο– αυξάνεται. Η ζητούμενη μεταβλητή μας είναι η ΗΕΔ  $\mathcal{E}$  που επάγεται σε αυτόν τον διαστελλόμενο βρόχο. Το μαγνητικό πεδίο είναι ομογενές σε όλη την επιφάνεια του βρόχου, άρα μπορούμε να υπολογίσουμε τη μαγνητική ροή από τη σχέση  $\Phi_B = BA \cos\phi$ . Επιλέγουμε το διάνυσμα επιφάνειας  $\mathbf{A}$  να κατευθύνεται κάθετα προς το επίπεδο της εικόνας και προς τα μέσα, στην ίδια κατεύθυνση με το  $\mathbf{B}$ . Με αυτήν την επιλογή, μία θετική ΗΕΔ θα έχει φορά στον βρόχο ίδια με εκείνη των δεικτών του ρολογιού. (Μπορείτε να το ελέγξετε αυτό με τον κανόνα της δεξιάς χειρός: Με το δεξί σας χέρι δείξτε με τον αντίχειρα προς τη σελίδα και λυγίστε τα δάχτυλά σας όπως στο Σχ. 29.6.)

**ΕΠΙΛΥΣΗ:** Καθώς το  $\mathbf{B}$  και το  $\mathbf{A}$  έχουν την ίδια κατεύθυνση, η γωνία  $\phi = 0$  και  $\Phi_B = BA$ . Το μέτρο του μαγνητικού πεδίου,  $B$ , είναι σταθερό, άρα η επαγόμενη ΗΕΔ είναι

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

Για να υπολογίσετε το  $dA/dt$ , σημειώστε ότι σε χρονικό διάστημα  $dt$  η ολισθαίνουσα ράβδος διανύει απόσταση  $v dt$  (Σχ. 29.11) και

29.11 Μια γεννήτρια ολισθαίνουσας ράβδου. Αμφότερα το μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$  και το διάνυσμα επιφάνειας  $\mathbf{A}$  κατευθύνονται προς το εσωτερικό της σελίδας. Η αύξηση της μαγνητικής ροής (που προκαλείται από την αύξηση της επιφάνειας) επάγει την ΗΕΔ και το ρεύμα.



η επιφάνεια του βρόχου αυξάνεται κατά  $dA = Lv dt$ . Έτσι, η επαγόμενη ΗΕΔ είναι

$$\mathcal{E} = -B \frac{Lv dt}{dt} = -BLv$$

Το αρνητικό πρόσημο υποδεικνύει ότι η ΗΕΔ έχει κατά μήκος του βρόχου φορά αντίθετη από τους δείκτες του ρολογιού. Το επαγόμενο ρεύμα έχει επίσης φορά αντίθετη από τους δείκτες του ρολογιού, όπως φαίνεται στο σχήμα.

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ:** Η ΗΕΔ μιας γεννήτριας ολισθαίνουσας ράβδου είναι σταθερή αν η ταχύτητα  $v$  της ράβδου παραμένει σταθερή. Συνεπώς, μια τέτοια διάταξη δρα ως γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Δεν είναι και πολύ πρακτική συσκευή, διότι η ράβδος κάποια στιγμή θα κινηθεί πέρα από τα όρια του αγωγού με σχήμα U και θα χάσει την επαφή, με αποτέλεσμα τη διακοπή του ρεύματος.

Στη γεννήτρια ολισθαίνουσας ράβδου του Παραδ. 29.5 καταναλώνεται ενέργεια στο κύκλωμα λόγω της αντίστασής του. Θεωρήστε ότι η αντίσταση του κυκλώματος (που απαρτίζεται από τη ράβδο που ολισθαίνει και από τον αγωγό με σχήμα U που συνδέει τα άκρα της ράβδου) σε κάποιο σημείο της κίνησης είναι  $R$ . Βρείτε τον ρυθμό με τον οποίο καταναλώνεται ενέργεια στο κύκλωμα και τον ρυθμό με τον οποίο πρέπει να προσφέρεται έργο ώστε η ράβδος να μετακινείται μέσα στο μαγνητικό πεδίο.

Από το Παράδ. 29.5. Πάνω στη ράβδο ασκείται μια μαγνητική δύναμη  $F = IL \times B$ , όπου το διάνυσμα  $L$  βρίσκεται κατά μήκος της ράβδου με κατεύθυνση τη φορά του ρεύματος. Το Σχ. 29.12 δείχνει ότι αυτή η δύναμη έχει αντίθετη φορά από την ταχύτητα της ράβδου  $v$ : για να διατηρηθεί η κίνηση, όποιος ωθεί τη ράβδο θα πρέπει να ασκεί μία δύναμη ίσου μέτρου και προς την κατεύθυνση της  $v$ . Η δύναμη αυτή παράγει έργο με ρυθμό  $P_{\text{ασκούμενη}} = Fv$ .

**ΕΠΙΛΥΣΗ:** Θα υπολογίσουμε πρώτα την  $P_{\text{καταναλόμενη}}$ . Από το Παράδ. 29.5,  $\mathcal{E} = -BLv$ , άρα το ρεύμα στη ράβδο είναι  $I = |\mathcal{E}|/R = BLv/R$ . Επομένως,

$$P_{\text{καταναλόμενη}} = I^2 R = \left(\frac{BLv}{R}\right)^2 R = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

Για να υπολογίσουμε την  $P_{\text{ασκούμενη}}$ , υπολογίζουμε πρώτα το μέτρο της  $F = IL \times B$ . Καθώς τα  $L$  και  $B$  είναι κάθετα, το μέτρο της δύναμης είναι

$$F = ILB = \frac{BLv}{R} LB = \frac{B^2 L^2 v}{R}$$

Η ασκούμενη δύναμη θα έχει ίσο μέτρο και θα παράγει έργο με ρυθμό

$$P_{\text{προσφερόμενη}} = Fv = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

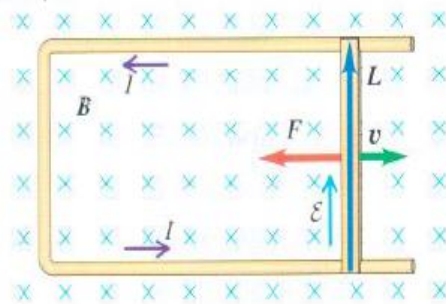
**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ:** Ο ρυθμός με τον οποίο προσφέρεται έργο είναι ακριβώς ίσος με τον ρυθμό με τον οποίο καταναλώνεται ενέργεια στην αντίσταση.

ΛΥΣΗ

**ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ:** Οι ζητούμενες μεταβλητές μας είναι οι *ρυθμοί* με τους οποίους καταναλώνεται ενέργεια και προσφέρεται έργο. Ενέργεια καταναλώνεται στο κύκλωμα με ρυθμό  $P_{\text{καταναλόμενη}} = I^2 R$ . Το ρεύμα  $I$  στο κύκλωμα ισούται με  $\mathcal{E}/R$ . Βρήκαμε μια έκφραση για την επαγόμενη ΗΕΔ  $\mathcal{E}$  στο κύκλωμα

*συνεχίζεται*

**29.12** Η μαγνητική δύναμη  $F = IL \times B$  που ασκείται στη ράβδο λόγω του επαγόμενου ρεύματος κατευθύνεται προς τα αριστερά, αντίθετα με τη  $v$ .



**ΠΡΟΣΟΧΗ** Δεν μπορείτε να παραβιάσετε την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Θα μπορούσατε να σκεφτείτε ότι η αντιστροφή της κατεύθυνσης του  $B$  ή της  $v$  θα επέτρεπε τη μαγνητική δύναμη  $F = IL \times B$  να έχει την ίδια κατεύθυνση με τη  $v$ . Αυτό θα ήταν ωραίο κόλπο. Με το που θα άρχιζε να κινείται η ράβδος, η μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή θα προκαλούσε εξ επαγωγής μία ΗΕΔ και ένα ρεύμα, ενώ η μαγνητική δύναμη στη ράβδο θα την έκανε να κινείται ακόμη ταχύτερα, αυξάνοντας την ΗΕΔ και το ρεύμα έως ότου η ράβδος να κινείται με ιλιγγιώδη ταχύτητα και να παράγει ηλεκτρική ισχύ με εκπληκτικό ρυθμό. Αυτό φαίνεται πολύ καλό για να είναι αληθινό, ενώ δείχνει να παραβιάζεται η αρχή διατήρησης της ενέργειας. Εντούτοις, η αντιστροφή του  $B$  αντιστρέφει επίσης και το πρόσημο της επαγόμενης ΗΕΔ και του ρεύματος, και κατά συνέπεια την κατεύθυνση του  $L$ , άρα η μαγνητική δύναμη εξακολουθεί να αντιτίθεται στην κίνηση της ράβδου: μια παρόμοια κατάσταση επικρατεί αν αντιστρέψουμε τη  $v$ . |

## ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 29.7

## ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ LENZ ΚΑΙ ΓΕΝΗΤΡΙΑ ΟΛΙΣΘΑΙΝΟΥΣΑΣ ΡΑΒΔΟΥ

Στο Σχ. 29.11 το ρεύμα που επάγεται στον βρόχο δημιουργεί ένα πρόσθετο μαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια που περικλείεται από τον βρόχο. Η φορά του επαγόμενου ρεύματος είναι αντίθετη από τη φορά των δεικτών του ρολογιού, άρα σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στο Εδ. 28.5, η κατεύθυνση του πρόσθετου

μαγνητικού πεδίου που επάγει αυτό το ρεύμα είναι κάθετη στο επίπεδο του σχήματος και προς τα έξω. Η κατεύθυνση αυτή είναι αντίθετη της κατεύθυνσης του αρχικού μαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα να τείνει να εξουδετερώσει την επίδραση αυτού του πεδίου. Αυτό ακριβώς προβλέπει ο νόμος του Lenz.

## ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 29.8

## ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ LENZ ΚΑΙ ΦΟΡΑ ΤΟΥ ΕΠΑΓΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

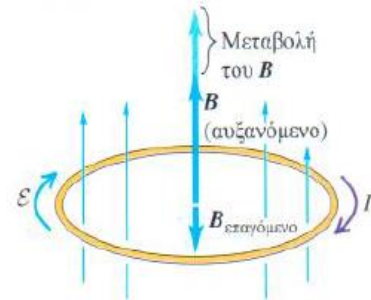
Στο Σχ. 29.13 υπάρχει ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο  $B$  στον βρόχο. Το μέτρο του πεδίου αυξάνεται, συνεπώς υπάρχει μια επαγόμενη ΗΕΔ. Χρησιμοποιήστε τον νόμο του Lenz για να προσδιορίσετε τη φορά του επαγόμενου ρεύματος.

### ΛΥΣΗ

Η περίπτωση αυτή είναι η ίδια με εκείνη του Παραδ. 29.1 (Εδ. 29.2). Σύμφωνα με τον νόμο του Lenz, το επαγόμενο ρεύμα θα πρέπει να δημιουργήσει ένα μαγνητικό πεδίο  $B_{\text{επαγόμενο}}$  μέσα στον βρόχο με κατεύθυνση προς τα κάτω, ώστε να αντιτίθεται στη μεταβολή της ροής. Εφαρμόζοντας τον κανόνα της δεξιάς χειρός που περιγράψαμε στο Εδ. 28.5 για την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που επάγεται από τον κυκλικό βρόχο, το  $B_{\text{επαγόμενο}}$  θα έχει την επιθυμητή κατεύθυνση αν το επαγόμενο ρεύμα έχει τη φορά που δείχνει το Σχ. 29.13.

Το Σχ. 29.14 παρουσιάζει μερικές εφαρμογές του νόμου του Lenz για την παρόμοια περίπτωση μαγνήτη που κινείται κοντά σε αγώγιμο βρόχο. Σε κάθε περίπτωση, το επαγόμενο ρεύμα

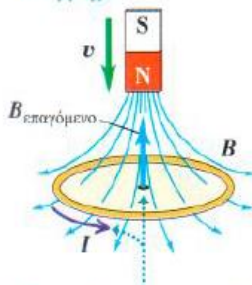
29.13 Το επαγόμενο ρεύμα εξαιτίας της μεταβολής του  $B$  έχει τη φορά των δεικτών του ρολογιού όταν παρατηρούμε τον βρόχο από πάνω. Το πρόσθετο πεδίο  $B_{\text{επαγόμενο}}$ , που αυτό δημιουργεί, έχει κατεύθυνση προς τα κάτω, ώστε να αντιτίθεται στη μεταβολή του πεδίου  $B$  που έχει κατεύθυνση προς τα πάνω.



παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, με κατεύθυνση που αντιτίθεται στη μεταβολή της ροής μέσα στον βρόχο λόγω της κίνησης του μαγνήτη.

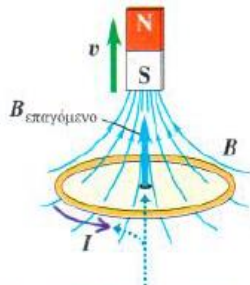
29.14 Φορές των επαγόμενων ρευμάτων καθώς ένας ραβδόμορφος μαγνήτης κινείται κατά μήκος του άξονα ενός αγώγιμου βρόχου. Αν ο μαγνήτης είναι ακίνητος, δεν υπάρχει επαγόμενο ρεύμα.

(α) Η κίνηση του μαγνήτη προκαλεί αυξανόμενη ροή προς τα κάτω μέσα από τον βρόχο.

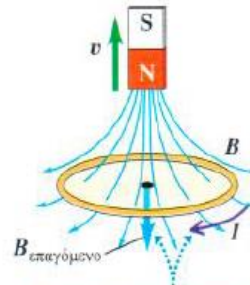


Το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο έχει κατεύθυνση προς τα πάνω ώστε να αντιτίθεται στη μεταβολή της ροής. Για να δημιουργήσει αυτό το επαγόμενο πεδίο, το επαγόμενο ρεύμα πρέπει να έχει φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού όταν παρατηρούμε τον βρόχο από πάνω.

(β) Η κίνηση του μαγνήτη προκαλεί μειούμενη ροή προς τα πάνω μέσα από τον βρόχο.

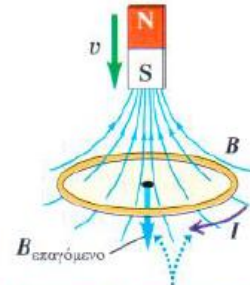


(γ) Η κίνηση του μαγνήτη προκαλεί μειούμενη ροή προς τα κάτω μέσα από τον βρόχο.



Το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο έχει κατεύθυνση προς τα κάτω ώστε να αντιτίθεται στη μεταβολή της ροής. Για να δημιουργήσει αυτό το επαγόμενο πεδίο, το επαγόμενο ρεύμα πρέπει να έχει τη φορά των δεικτών του ρολογιού όταν παρατηρούμε τον βρόχο από πάνω.

(δ) Η κίνηση του μαγνήτη προκαλεί αυξανόμενη ροή προς τα πάνω μέσα από τον βρόχο.





Έστω ότι το μήκος  $L$  της κινούμενης ράβδου στο Σχ. 29.15b είναι 0,10 m, η ταχύτητα  $v$  είναι 2,5 m/s, η ολική αντίσταση του βρόχου 0,030 Ω και το  $B$  είναι 0,60 T. Βρείτε την ΗΕΔ λόγω κίνησης, το επαγόμενο ρεύμα και τη δύναμη που ασκείται στη ράβδο.

**ΛΥΣΗ**

**ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ:** Θα υπολογίσουμε την ΗΕΔ λόγω κίνησης  $\mathcal{E}$  από την Εξ. (29.6) και το ρεύμα από τις τιμές της  $\mathcal{E}$  και της αντίστασης  $R$ . Η δύναμη πάνω στη ράβδο είναι μια *μαγνητική δύναμη* που ασκείται από το  $B$  στο ρεύμα της ράβδου· θα υπολογίσουμε αυτήν τη δύναμη χρησιμοποιώντας τη σχέση  $F = IL \times B$ .

**ΕΠΙΛΥΣΗ:** Από την Εξ. (29.6) η ΗΕΔ λόγω κίνησης είναι

$$\mathcal{E} = vBL = (2,5 \text{ m/s})(0,60 \text{ T})(0,10 \text{ m}) = 0,15 \text{ V}$$

Το επαγόμενο ρεύμα στον βρόχο είναι

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{0,15 \text{ V}}{0,030 \Omega} = 5,0 \text{ A}$$

Στην έκφραση για τη μαγνητική δύναμη,  $F = IL \times B$ , το διάνυσμα  $L$  δείχνει προς την ίδια κατεύθυνση με το επαγόμενο ρεύμα στη ράβδο (από το  $b$  προς το  $a$  στο Σχ. 29.15). Ο κανόνας της δεξιάς χειρός για τα διανυσματικά γινόμενα δείχνει ότι αυτή η δύναμη έχει κατεύθυνση *αντίθετη* της κίνησης της ράβδου. Δεδομένου ότι τα  $L$  και  $B$  είναι κάθετα, η δύναμη έχει μέτρο

$$F = ILB = (5,0 \text{ A})(0,10 \text{ m})(0,60 \text{ T}) = 0,30 \text{ N}$$

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ:** Μπορούμε να ελέγξουμε την απάντησή μας για την κατεύθυνση της  $F$  χρησιμοποιώντας τον νόμο του Lenz. Αν θεωρήσουμε ότι το διάνυσμα επιφάνειας  $A$  κατευθύνεται κάθετα στο επίπεδο του βρόχου και προς τα μέσα, τότε η μαγνητική ροή είναι θετική και αυξάνεται καθώς η ράβδος κινείται προς τα δεξιά, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η επιφάνεια του βρόχου. Ο νόμος του Lenz μάς λέει ότι εμφανίζεται μια δύναμη που αντιτίθεται στην αύξηση της ροής. Άρα, η δύναμη που ασκείται στη ράβδο έχει κατεύθυνση προς τα αριστερά, αντίθετη στην κίνησή της.

Το Σχ. 29.17 δείχνει έναν αγωγίμο δίσκο με ακτίνα  $R$  που βρίσκεται στο επίπεδο  $xy$  και περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  γύρω από τον άξονα  $z$ . Ο δίσκος είναι τοποθετημένος σε ένα ομογενές, σταθερό πεδίο  $B$  παράλληλο στον άξονα  $z$ . Βρείτε την επαγόμενη ΗΕΔ μεταξύ του κέντρου και της περιφέρειας του δίσκου.

**ΛΥΣΗ**

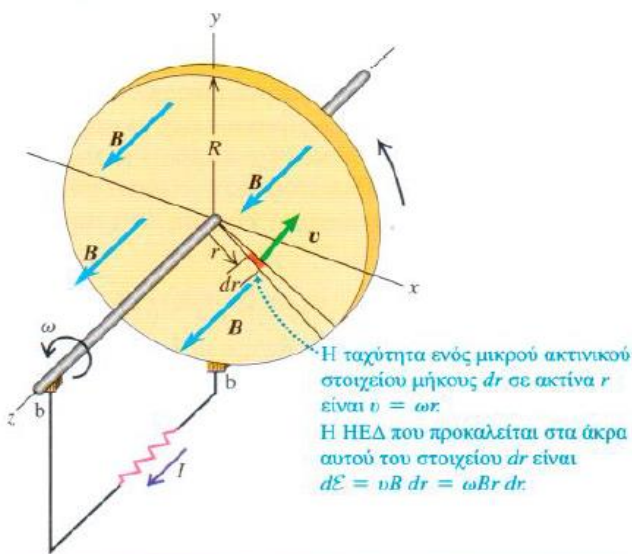
**ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ:** Αναπτύσσεται μια ΗΕΔ λόγω κίνησης, επειδή ο αγωγίμος δίσκος κινείται σε σχέση με το πεδίο  $B$ . Αυτό που περιπλέκει την κατάσταση είναι ότι διαφορετικά μέρη του δίσκου κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες  $v$ , αναλόγως από την απόστασή τους από τον άξονα περιστροφής. Θα χειριστούμε αυτό το πρόβλημα θεωρώντας μικρά τμήματα του δίσκου και ολοκληρώνοντας τις συνεισφορές τους ώστε να προσδιορίσουμε τη ζητούμενη μεταβλητή μας, την ΗΕΔ μεταξύ του κέντρου και της περιφέρειας του δίσκου. Θεωρήστε το μικρό τμήμα του δίσκου που είναι χρωματισμένο ερυθρό στο Σχ. 29.17 και σημειώνεται από το διάνυσμα της ταχύτητάς του  $v$ . Η μαγνητική δύναμη ανά μονάδα φορτίου στο στοιχείο αυτό είναι  $v \times B$ , που έχει κατεύθυνση ακτινικά από το κέντρο του δίσκου προς τα έξω. Έτσι, η επαγόμενη ΗΕΔ τείνει να δημιουργήσει ένα ακτινικό ρεύμα προς τα έξω, κάτι που υποδηλώνει ότι η κινούμενη αγωγή διαδρομή που πρέπει να έχουμε υπόψη εδώ είναι μια ευθεία γραμμή από το κέντρο προς την περιφέρεια. Μπορούμε να βρούμε την ΗΕΔ από κάθε μικρό στοιχείο του δίσκου κατά μήκος αυτής της γραμμής χρησιμοποιώντας την έκφραση  $d\mathcal{E} = (v \times B) \cdot dl$  και μετά να ολοκληρώσουμε για να βρούμε την ολική ΗΕΔ.

ΗΕΔ είναι το ολοκλήρωμα της  $d\mathcal{E}$  από το κέντρο ( $r = 0$ ) έως την περιφέρεια ( $r = R$ ):

$$\mathcal{E} = \int_0^R \omega Br dr = \frac{1}{2} \omega BR^2$$

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ:** Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτήν τη συσκευή ως πηγή ΗΕΔ σε ένα κύκλωμα αν το συμπληρώσουμε με δύο επαφές (σημειώνονται με  $b$  στο σχήμα) που συνδέουν τον

29.17 Ένας αγωγίμος δίσκος με ακτίνα  $R$  περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο  $B$ . Η ΗΕΔ επάγεται κατά μήκος ακτινικών γραμμών του δίσκου και εφαρμόζεται σε εξωτερικό κύκλωμα με δύο ολισθαίνουσες επαφές που σημειώνονται με  $b$ .



**ΕΠΙΛΥΣΗ:** Το διάνυσμα μήκους  $dl$  (με μήκος  $dr$ ), που αντιστοιχεί στο στοιχείο αυτό, έχει ακτινική κατεύθυνση προς τα έξω, την ίδια κατεύθυνση με το  $v \times B$ . Τα διανύσματα  $v$  και  $B$  είναι κάθετα μεταξύ τους και το μέτρο του  $v$  είναι  $\omega r$ . Συνεπώς, η ολική

*συνεχίζεται*

δίσκο με τον άξονα όπως δείχνει το σχήμα. Ένας τέτοιος δίσκος ονομάζεται *δυναμό του δίσκου Faraday* ή *ομοπολική γεννήτρια*. Σε αντίθεση με τον εναλλάκτη στο Παράδ. 29.3, το δυναμό του δίσκου Faraday είναι μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος· παράγει μία ΗΕΔ που είναι σταθερή στον χρόνο. Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε τον νόμο του Lenz για να δείξετε ότι για τη φορά περιστροφής του Σχ. 29.17 το ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα θα πρέπει να έχει την κατεύθυνση που φαίνεται;



Θεωρήστε ότι το μακρύ σωληνοειδές πηνίο στο Σχ. 29.18a έχει 500 σπείρες ανά μέτρο και επιφάνεια διατομής  $4,0 \text{ cm}^2$ . Το ρεύμα στους οπλισμούς του αυξάνεται με ρυθμό  $100 \text{ A/s}$ . (a) Βρείτε το μέτρο της επαγόμενης ΗΕΔ στον συρμάτινο δακτύλιο έξω από το σωληνοειδές. (b) Βρείτε το μέτρο του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον βρόχο αν η ακτίνα του είναι  $2,0 \text{ cm}$ .

## ΛΥΣΗ

**ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ:** Όπως στο Σχ. 29.18b, το αυξανόμενο μαγνητικό πεδίο μέσα στο σωληνοειδές προκαλεί μεταβολή στη μαγνητική ροή μέσα από τον συρμάτινο βρόχο και έτσι επάγει ένα ηλεκτρικό πεδίο  $E$  κατά μήκος του βρόχου. Οι ζητούμενες μεταβλητές εδώ είναι η επαγόμενη ΗΕΔ  $\mathcal{E}$  και το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου  $E$ . Χρησιμοποιούμε την Εξ. (29.8) για να καθορίσουμε την ΗΕΔ. Ο βρόχος και το σωληνοειδές έχουν κοινό κεντρικό άξονα. Έτσι, λόγω συμμετρίας, το ηλεκτρικό πεδίο είναι εφαπτομενικό στον βρόχο και έχει το ίδιο μέτρο  $E$  σε κάθε σημείο της περιφέρειας του βρόχου. Επομένως, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την Εξ. (29.9) για να βρούμε το  $E$ .

**ΕΠΙΛΥΣΗ:** (a) Από την Εξ. (29.8), η επαγόμενη ΗΕΔ είναι

$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\mu_0 n A \frac{dI}{dt} \\ &= -(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A} \cdot \text{m})(500 \text{ turns/m}) \\ &\quad \times (4,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(100 \text{ A/s}) \\ &= -25 \times 10^{-6} \text{ Wb/s} = -25 \times 10^{-6} \text{ V} = -25 \mu\text{V}\end{aligned}$$

(b) Λόγω συμμετρίας, το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα  $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$  έχει απόλυτη τιμή  $2\pi rE$ , ανεξάρτητα από τη φορά ολοκλήρωσης γύρω από τον βρόχο. Αυτό ισούται με την απόλυτη τιμή της ΗΕΔ, άρα

$$E = \frac{|\mathcal{E}|}{2\pi r} = \frac{25 \times 10^{-6} \text{ V}}{2\pi(2,0 \times 10^{-2} \text{ m})} = 2,0 \times 10^{-4} \text{ V/m}$$

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ:** Στο Σχ. 29.18b η μαγνητική ροή προς τα μέσα στο επίπεδο του σχήματος αυξάνεται. Σύμφωνα με τον κανόνα της δεξιάς χειρός για επαγόμενη ΗΕΔ (Σχ. 29.6), μία θετική ΗΕΔ θα είχε φορά γύρω από τον βρόχο σύμφωνα με τους δείκτες του ρολογιού· το αρνητικό πρόσημο της  $\mathcal{E}$  δείχνει ότι η ΗΕΔ έχει φορά αντίθετη από τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Μπορείτε να το δείξετε αυτό χρησιμοποιώντας τον νόμο του Lenz;