SEARS & ZEMANSKY

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΗ ΦΥΣΙΚΗ με Σύγχρονη Φυσική

3η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ

Τόμος Β

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΟΠΤΙΚΗ - ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ

YOUNG ΚΑΙ FREEDMAN

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

ΔΙΑΦΑΝΕΙΕΣ ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ

1. ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗ

ΕΠΙΛΟΓΗ, ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:
Ηλίας Κατσούφης

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΚΟ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ:
Τζένη Πάλμου

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 Επστημών, 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 25.1 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΣΕ ΣΥΡΜΑ

Σύρμα από χαλκό έχει διάμετρο 1,02 mm και διαρρέεται από ρεύμα 1,67 A τροφοδοτώντας λαμπτήρα 200 W. Η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι $8{,}5 \times 10^{28}$ ηλεκτρόνια ανά κυβικό μέτρο. Υπολογίστε (a) την πυκνότητα ρεύματος, και (b) την ταχύτητα ολίσθησης.

ΛΥΣΗ

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ: Αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιεί τις σχέσεις μεταξύ ρεύματος I, πυκνότητας ρεύματος J και ταχύτητας ολίσθησης v_d. Μας δίνεται το I και η διάμετρος d του σύρματος, επομένως χρησιμοποιούμε την Εξ. (25.3) για να βρούμε το J. Χρησιμοποιούμε ξανά την Εξ. (25.3) για να βρούμε το v_d από το J και τη γνωστή συγκέντρωση ηλεκτρονίων n.

ΕΠΙΛΥΣΗ: (a) Το εμβαδόν της διατομής είναι

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(1{,}02 \times 10^{-3}\ \text{m})^2}{4} = 8{,}17 \times 10^{-7}\ \text{m}^2$$

Επομένως, το μέτρο της πυκνότητας ρεύματος είναι

$$J = \frac{I}{A} = \frac{1{,}67\ \text{A}}{8{,}17 \times 10^{-7}\ \text{m}^2} = 2{,}04 \times 10^6\ \text{A/m}^2$$

συνεχίζεται

(b) Από την Εξ. (25.3) βρίσκουμε για την ταχύτητα ολίσθησης το v_d

$$v_d = \frac{J}{n|q|} = \frac{2{,}04 \times 10^6\ \text{A/m}^2}{(8{,}5 \times 10^{28}\ \text{m}^{-3})|-1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C}|}$$
$$= 1{,}5 \times 10^{-4}\ \text{m/s} = 0{,}15\ \text{mm/s}$$

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ: Με αυτήν την ταχύτητα ένα ηλεκτρόνιο θα χρειαζόταν 6700 s (περίπου δύο ώρες) για να διανύσει 1 m κατά μήκος του σύρματος. Οι ταχύτητες της τυχαίας κίνησης των ηλεκτρονίων είναι της τάξης των 10^6 m/s, περίπου 10^{10} φορές την ταχύτητα ολίσθησης. Φανταστείτε τα ηλεκτρόνια να αναπηδούν ξέφρενα, με μεγάλες ταχύτητες προς όλες τις κατευθύνσεις, συμμετέχοντας συγχρόνως σε μια πολύ αργή ολίσθηση σε συγκεκριμένη κατεύθυνση!

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 25.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ, ΔΙΑΦΟΡΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΝΟΣ ΣΥΡΜΑΤΟΣ

Το χάλκινο σύρμα του Παραδ. 25.1 έχει εμβαδόν διατομής $8{,}20 \times 10^{-7}\ \mathrm{m}^2$. Διαρρέεται από ρεύμα 1,67 A. Υπολογίστε (a) το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου στο σύρμα· (b) τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του σύρματος που απέχουν 50,0 m· (c) την αντίσταση τμήματος του αγωγού μήκους 50,0 m.

ΛΥΣΗ

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ: Μας δίνεται το εμβαδόν διατομής A και το ρεύμα I. Στόχος μας είναι το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου E, η διαφορά δυναμικού V και η αντίσταση R. Η πυκνότητα ρεύματος είναι $J = I/A$. Βρίσκουμε το E από την Εξ. (25.5), $E = \rho J$. (Ο Πίνακας 25.1 δίνει την ειδική αντίσταση ρ για τον χαλκό.) Η διαφορά δυναμικού είναι το γινόμενο του E και του μήκους του σύρματος. Για να βρούμε το R μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την Εξ. (25.10) ή την Εξ. (25.11).

ΕΠΙΛΥΣΗ: (a) Από τον Πίνακα 25.1, $\rho = 1{,}72 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \mathrm{m}$. Επομένως, από την Εξ. (25.5),

$$E = \rho J = \frac{\rho I}{A} = \frac{(1{,}72 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \mathrm{m})(1{,}67\ \mathrm{A})}{8{,}20 \times 10^{-7}\ \mathrm{m}^2} = 0{,}0350\ \mathrm{V/m}$$

(b) Η διαφορά δυναμικού είναι

$$V = EL = (0{,}0350\ \mathrm{V/m})(50{,}0\ \mathrm{m}) = 1{,}75\ \mathrm{V}$$

(c) Από την Εξ. (25.10) η αντίσταση αυτού του σύρματος των 50,0 m είναι

συνεχίζεται

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{(1{,}72 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \mathrm{m})(50{,}0\ \mathrm{m})}{8{,}20 \times 10^{-7}\ \mathrm{m}^2} = 1{,}05\ \Omega$$

Εναλλακτικά, μπορούμε να βρούμε το R από την Εξ. (25.11):

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1{,}75\ \mathrm{V}}{1{,}67\ \mathrm{A}} = 1{,}05\ \Omega$$

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ: Τονίζουμε ότι η αντίσταση ενός σύρματος *ορίζεται* ως το πηλίκο της τάσης διά του ρεύματος. Αν το σύρμα είναι κατασκευασμένο από μη ωμικό υλικό, τότε το R είναι διαφορετικό για διαφορετικές τιμές του V αλλά πάντοτε δίνεται από $R = V/I$. Επίσης, πάντα ισχύει η σχέση $R = \rho L/A$· αν το υλικό είναι μη ωμικό, το ρ δεν είναι σταθερό αλλά εξαρτάται από το E (ή, ισοδύναμα, από το $V = EL$).

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 25.3 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Ας υποθέσουμε ότι η αντίσταση χάλκινου σύρματος είναι 1,05 Ω στους 20 °C. Βρείτε την αντίσταση στους 0 °C και στους 100 °C.

ΛΥΣΗ

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ: Μας δίνεται η αντίσταση $R_0 = 1{,}05\ \Omega$ στη θερμοκρασία αναφοράς $T_0 = 20\ °\mathrm{C}$. Χρησιμοποιούμε την Εξ. (25.12) για να βρούμε την αντίσταση για $T = 0\ °\mathrm{C}$ και $T = 100\ °\mathrm{C}$ (που είναι οι ζητούμενες μεταβλητές) και τον θερμικό συντελεστή ειδικής αντίστασης από τον Πίνακα 25.2.

ΕΠΙΛΥΣΗ: Από τον Πίνακα 25.2, για χαλκό $\alpha = 0{,}00393\ (°\mathrm{C})^{-1}$. Οπότε από την Εξ. (25.12),

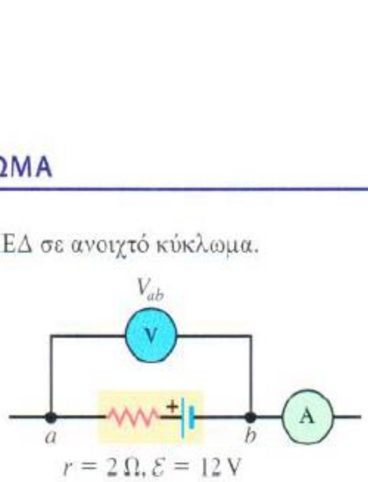
$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$
$$= (1{,}05\ \Omega)\{1 + [0{,}00393\ (°\mathrm{C})^{-1}][0\ °\mathrm{C} - 20\ °\mathrm{C}]\}$$
$$= 0{,}97\ \Omega \text{ σε } T = 0\ °\mathrm{C}$$
$$R = (1{,}05\ \Omega)\{1 + [0{,}00393\ (°\mathrm{C})^{-1}][100\ °\mathrm{C} - 20\ °\mathrm{C}]\}$$
$$= 1{,}38\ \Omega \text{ σε } T = 100\ °\mathrm{C}$$

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ: Η αντίσταση σε 100 °C είναι μεγαλύτερη από αυτήν σε 0 °C κατά παράγοντα $(1{,}38\ \Omega)/(0{,}97\ \Omega) = 1{,}42$. Η αύξηση της θερμοκρασίας του χάλκινου σύρματος από 0 °C σε 100°C αυξάνει την αντίσταση κατά 42 %. Από την Εξ. (25.11), $V = IR$, αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται 42 % επιπλέον τάση στους 100 °C απ' ό,τι στους 0 °C για να δημιουργηθεί το ίδιο ρεύμα. Οι σχεδιαστές ηλεκτρικών κυκλωμάτων τα οποία πρόκειται να λειτουργούν σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους αυτήν τη σημαντική επίδραση.

ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 25.4 ΠΗΓΗ ΣΕ ΑΝΟΙΧΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

Το **Σχ. 25.16** δείχνει μια πηγή (μια μπαταρία) με ΗΕΔ $\mathcal{E} = 12\ \text{V}$ και εσωτερική αντίσταση $r = 2\ \Omega$. (Για σύγκριση, η εσωτερική αντίσταση μιας μπαταρίας μολύβδου 12 V είναι μόλις μερικά χιλιοστά του ωμ.) Τα σύρματα προς τα αριστερά του a και προς τα δεξιά του αμπερόμετρου A δεν συνδέονται με οτιδήποτε άλλο. Προσδιορίστε τις αντίστοιχες ενδείξεις V_{ab} και I του ιδανικού βολτόμετρου V και του ιδανικού αμπερόμετρου A.

25.16 Πηγή ΗΕΔ σε ανοιχτό κύκλωμα.



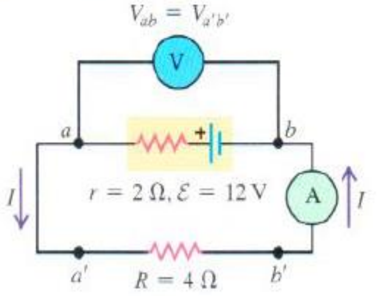
ΛΥΣΗ

Δεν *υπάρχει* ρεύμα στο αμπερόμετρο επειδή δεν υπάρχει κλειστό κύκλωμα. (Το ιδανικό βολτόμετρό μας έχει άπειρη αντίσταση, επομένως ούτε το βολτόμετρο διαρρέεται από ρεύμα.) Το αμπερόμετρο δείχνει $I = 0$. Επειδή δεν διέρχεται ρεύμα μέσα από τη μπαταρία, δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού κατά μήκος της εσωτερικής της αντίστασης. Από την Εξ. (25.15) με $I = 0$, η διαφορά δυναμικού V_{ab} μεταξύ των ακροδεκτών της μπαταρίας ισούται με την ΗΕΔ. Επομένως, το βολτόμετρο δείχνει $V_{ab} = \mathcal{E} = 12\ \text{V}$. Η πολική τάση μιας πραγματικής, μη ιδανικής πηγής ισούται με την ΗΕΔ *μόνον* όταν δεν υπάρχει ρεύμα που να ρέει μέσα από την πηγή, όπως συμβαίνει σε αυτό εδώ το παράδειγμα.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 25.5 ΠΗΓΗ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

Προσθέτουμε έναν αντιστάτη 4 Ω στην μπαταρία του Εννοιολογικού Παραδείγματος 25.4 και έτσι σχηματίζουμε ένα κλειστό κύκλωμα (**Σχ. 25.17**). Ποιες είναι τώρα οι ενδείξεις του βολτόμετρου και του αμπερόμετρου V_{ab} και I;

25.17 Πηγή ΗΕΔ σε κλειστό κύκλωμα.



συνεχίζεται

ΛΥΣΗ

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ: Ζητείται να υπολογίσουμε το ρεύμα I διά του κυκλώματος $aa'b'b$ και τη διαφορά δυναμικού V_{ab}. Πρώτα βρίσκουμε το I από την Εξ. (25.16). Για να βρούμε το V_{ab}, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την Εξ. (25.11) ή την Εξ. (25.15).

ΕΠΙΛΥΣΗ: Το ιδανικό αμπερόμετρο έχει μηδενική αντίσταση, επομένως η ολική αντίσταση εξωτερικά της πηγής είναι $R = 4\ \Omega$. Άρα από την Εξ. (25.16), το ρεύμα διά του κυκλώματος $aa'b'b$ είναι

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = \frac{12\ \text{V}}{4\ \Omega + 2\ \Omega} = 2\ \text{A}$$

Τα ιδανικά αγώγιμα σύρματά μας και το ιδανικό αμπερόμετρο έχουν μηδέν αντίσταση, οπότε δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων a και a' ή μεταξύ των σημείων b και b'· επομένως $V_{ab} = V_{a'b'}$. Βρίσκουμε το V_{ab} θεωρώντας τα a και b ως τους ακροδέκτες του αντιστάτη: Άρα από τον νόμο του Ohm, Εξ. (25.11), έχουμε

$$V_{a'b'} = IR = (2\ \text{A})(4\ \Omega) = 8\ \text{V}$$

Εναλλακτικά, μπορούμε να θεωρήσουμε τα a και b σαν τους ακροδέκτες της πηγής. Τότε, από την Εξ. (25.15),

$$V_{ab} = \mathcal{E} - Ir = 12\ \text{V} - (2\ \text{A})(2\ \Omega) = 8\ \text{V}$$

Και με τους δύο τρόπους βλέπουμε ότι η ένδειξη του βολτόμετρου είναι 8 V.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ: Με το να ρέει αυτό το ρεύμα μέσα από την πηγή, η πολική τάση V_{ab} είναι μικρότερη από την ΗΕΔ $\mathcal{E}$. Όσο μικρότερη είναι η εσωτερική αντίσταση r, τόσο μειώνεται η διαφορά μεταξύ των V_{ab} και $\mathcal{E}$.

ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 25.6 ΧΡΗΣΗ ΒΟΛΤΟΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΑΜΠΕΡΟΜΕΤΡΩΝ

Μετακινούμε το βολτόμετρο και το αμπερόμετρο του Παραδ. 25.5 σε διαφορετικές θέσεις στο κύκλωμα. Ποιες είναι οι ενδείξεις του ιδανικού βολτόμετρου και αμπερόμετρου στις περιπτώσεις που φαίνονται στο (a) **Σχ. 25.18a**, και (b) στο Σχ. 25.18b;

ΛΥΣΗ

(a) Τώρα το βολτόμετρο μετρά τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων a' και b'. Όπως στο Παράδ. 25.5, $V_{ab} = V_{a'b'}$, επομένως, η ένδειξη του βολτόμετρου είναι ίδια με αυτήν του Παραδ. 25.5: $V_{a'b'} = 8$ V.

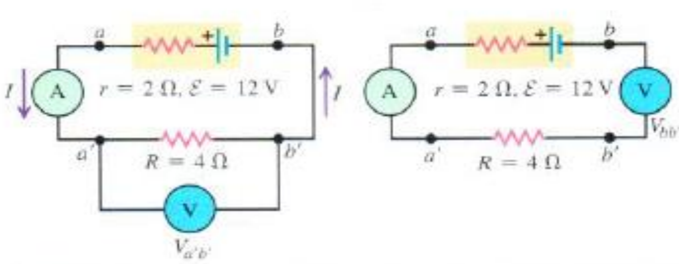
ΠΡΟΣΟΧΗ **Ρεύμα σε έναν απλό βρόχο** Καθώς κινούνται φορτία μέσα σε έναν αντιστάτη, υπάρχει μια ελάττωση στην ηλεκτρική δυναμική ενέργεια, *αλλά δεν υπάρχει μεταβολή στο ρεύμα. Το ρεύμα σε έναν απλό βρόχο είναι ίδιο σε κάθε σημείο:* δεν «καταναλώνεται» καθώς κινείται μέσα στον αντιστάτη. Επομένως, το αμπερόμετρο στο Σχ. 25.17 (στην πλευρά χαμηλού δυναμικού του αντιστάτη των 4 Ω) και το αμπερόμετρο στο Σχ. 25.18b (στην πλευρά υψηλού δυναμικού του αντιστάτη) δείχνουν και τα δύο $I = 2$ A.

(b) Δεν υπάρχει ρεύμα μέσα από το ιδανικό βολτόμετρο διότι έχει άπειρη αντίσταση. Αφού τώρα το βολτόμετρο είναι μέρος του κυκλώματος, δεν υπάρχει καθόλου ρεύμα στο κύκλωμα και το αμπερόμετρο δείχνει $I = 0$.

Το βολτόμετρο μετρά τη διαφορά δυναμικού $V_{bb'}$ μεταξύ των σημείων b και b'. Εφόσον $I = 0$, η διαφορά δυναμικού κατά μήκος του αντιστάτη είναι $V_{a'b'} = IR = 0$ και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων του ιδανικού αμπερόμετρου a και a' είναι επίσης μηδέν. Άρα το $V_{bb'}$ είναι ίσο με την πολική τάση V_{ab} της πηγής. Όπως και στο Εννοιολογικό Παράδειγμα 25.4, δεν υπάρχει ρεύμα, επομένως η πολική τάση ισούται με την ΗΕΔ και η ένδειξη του βολτόμετρου είναι $V_{ab} = \mathcal{E} = 12$ V.

Αυτό το παράδειγμα δείχνει ότι τα αμπερόμετρα και τα βολτόμετρα είναι και αυτά στοιχεία κυκλωμάτων. Η μετακίνηση του βολτόμετρου από τη θέση του Σχ. 25.18a στη θέση του Σχ. 25.18b προκαλεί μεγάλες διαφορές στο ρεύμα και στις διαφορές δυναμικού στο κύκλωμα. Αν θέλετε να μετρήσετε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων χωρίς να διαταράξετε το κύκλωμα, χρησιμοποιήστε ένα βολτόμετρο όπως στα Σχ. 25.17 ή 25.18a και *όχι* όπως στο Σχ. 25.18b.

25.18 Διαφορετικοί τρόποι τοποθέτησης ενός βολτόμετρου και ενός αμπερόμετρου σε ένα κλειστό κύκλωμα.



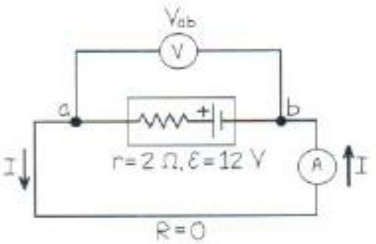
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 25.7 ΠΗΓΗ ΜΕ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ

Στο κύκλωμα του Παραδ. 25.5 αντικαθιστούμε τον αντιστάτη των 4 Ω με αγωγό μηδενικής αντίστασης. Ποιες είναι τώρα οι ενδείξεις των οργάνων;

ΛΥΣΗ

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ: Το **Σχ. 25.19** δείχνει το καινούργιο κύκλωμα. Οι μεταβλητές για τις οποίες ενδιαφερόμαστε είναι ξανά οι I και V_{ab}. Τώρα μεταξύ των σημείων a και b υπάρχει μια διαδρομή με μηδενική αντίσταση, που είναι μέρος του κατώτερου βρόχου, έτσι η διαφορά δυναμικού μεταξύ αυτών των σημείων πρέπει να είναι μηδέν.

25.19 Το σκίτσο μας γι' αυτό το πρόβλημα.



συνεχίζεται

ΕΠΙΛΥΣΗ: Πρέπει να έχουμε $V_{ab} = IR = I(0) = 0$, ανεξάρτητα από το τι είναι το ρεύμα. Επομένως, μπορούμε να βρούμε το ρεύμα I από την Εξ. (25.15):

$$V_{ab} = \mathcal{E} - Ir = 0$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r} = \frac{12\text{ V}}{2\ \Omega} = 6\text{ A}$$

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ: Το ρεύμα σε αυτό το κύκλωμα έχει διαφορετική τιμή απ' ό,τι στο Παράδ. 25.5, παρόλο που χρησιμοποιείται η ίδια μπαταρία· το ρεύμα εξαρτάται και από την εσωτερική αντίσταση r και από την αντίσταση του εξωτερικού κυκλώματος.

Αυτή η περίπτωση είναι γνωστή ως *βραχυκύκλωμα*. Η αντίσταση του εξωτερικού κυκλώματος είναι μηδέν, διότι οι ακροδέκτες της μπαταρίας συνδέονται απευθείας μεταξύ τους. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι ίσο με την ΗΕΔ $\mathcal{E}$ διαιρεμένη με την εσωτερική αντίσταση r. *Προσοχή*: Ένα βραχυκύκλωμα μπορεί να είναι επικίνδυνο! Μια μπαταρία αυτοκινήτου ή μια οικιακή γραμμή παροχής ισχύος έχουν πολύ μικρή εσωτερική αντίσταση (πολύ μικρότερη από αυτήν που αναφέρθηκε στα παραδείγματα) και το ρεύμα βραχυκυκλώματος μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να τήξει ένα μικρό σύρμα ή να προκαλέσει την έκρηξη μιας μπαταρίας.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 25.8 ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΔΟΥ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Για το κύκλωμα που αναλύσαμε στο Παράδ. 25.5, βρείτε τον ρυθμό μετατροπής ενέργειας (χημική σε ηλεκτρική) και τον ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας στην εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας, τον ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας στον αντιστάτη των 4 Ω και την καθαρή (ολική) ισχύ εξόδου της μπαταρίας.

ΛΥΣΗ

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ: Το **Σχ. 25.24** δείχνει το κύκλωμα, δίνει τις τιμές για τις ποσότητες που είναι γνωστές από το Παράδ. 25.5 και υποδεικνύει πώς να βρούμε τις ζητούμενες ποσότητες. Χρησιμοποιούμε την Εξ. (25.19) για να βρούμε την καθαρή ισχύ εξόδου της μπαταρίας, τον ρυθμό μετατροπής ενέργειας από χημική σε ηλεκτρική και τον ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας στην εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας. Χρησιμοποιούμε την Εξ. (25.18) για να βρούμε την ισχύ που παρέχεται (και καταναλώνεται) στον αντιστάτη των 4 Ω.

ΕΠΙΛΥΣΗ: Από τον πρώτο όρο στην Εξ. (25.19), ο ρυθμός μετατροπής ενέργειας στην μπαταρία είναι

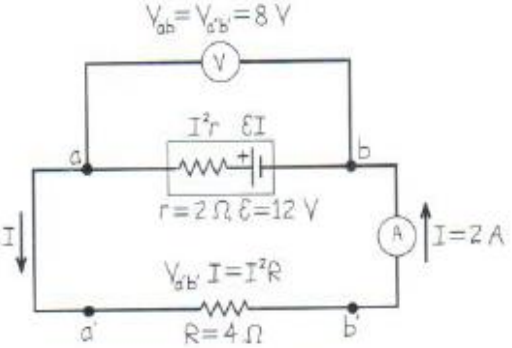
$$\mathcal{E}I = (12\ \text{V})(2\ \text{A}) = 24\ \text{W}$$

Από τον δεύτερο όρο στην Εξ. (25.19), ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας στην εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας είναι

$$I^2r = (2\ \text{A})^2(2\ \Omega) = 8\ \text{W}$$

Η *καθαρή* ηλεκτρική ισχύς εξόδου της μπαταρίας είναι η διαφορά μεταξύ αυτών, δηλαδή: $\mathcal{E}I - I^2r = 16$ W. Από την Εξ. (25.18), η

25.24 Το σκαρίφημά μας γι' αυτό το πρόβλημα.



ηλεκτρική ισχύς εισόδου στον αντιστάτη των 4 Ω, που ισούται με τον ρυθμό κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτόν, είναι

$$V_{a'b'}I = (8\ \text{V})(2\ \text{A}) = 16\ \text{W} \quad \text{και}$$
$$I^2R = (2\ \text{A})^2(4\ \Omega) = 16\ \text{W}$$

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ: Ο ρυθμός $V_{a'b'}I$ με τον οποίο παρέχεται ενέργεια στον αντιστάτη των 4 Ω ισούται με τον ρυθμό I^2R με τον οποίο καταναλώνεται εκεί ενέργεια. Αυτό ισούται επίσης με την καθαρή ισχύ εξόδου της μπαταρίας: $P = V_{ab}I = (8\ \text{V})(2\ \text{A}) = 16$ W. Συνοπτικά, ο ρυθμός με τον οποίο η πηγή ΗΕΔ παρέχει ενέργεια είναι $\mathcal{E}I = 24$ W, από τον οποίο $I^2r = 8$ W καταναλίσκεται στον εσωτερικό αντιστάτη της μπαταρίας και $I^2R = 16$ W καταναλίσκεται στον εξωτερικό αντιστάτη.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 25.9 ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Υποθέστε ότι αντικαθιστούμε τον εξωτερικό αντιστάτη των 4 Ω στο Σχ. 25.24 με έναν αντιστάτη 8 Ω. Πώς επηρεάζει αυτό την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ σε αυτόν τον αντιστάτη;

ΛΥΣΗ

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ: Στόχος μας είναι η ισχύς που καταναλίσκεται στον αντιστάτη με τον οποίο συνδέεται η πηγή. Η περίπτωση αυτή είναι ίδια με αυτήν του Παραδ. 25.8, αλλά με μεγαλύτερη εξωτερική αντίσταση R.

ΕΠΙΛΥΣΗ: Σύμφωνα με την Εξ. (25.18), η καταναλισκόμενη ισχύς στον αντιστάτη είναι $P = I^2R$. Κάνοντας την αντίσταση R διπλάσια από αυτή στο Παραδ. 25.8, μπορεί να βγάλετε το συμπέρασμα πως αυτό θα έκανε την ισχύ διπλάσια, δηλαδή $2(16\ \text{W}) = 32$ W. Αν αντί γι' αυτό χρησιμοποιήσετε τη σχέση $P = V_{ab}^2/R$, αυτό θα σας οδηγούσε στο συμπέρασμα ότι η ισχύς είναι ίση με το μισό από αυτήν του προηγούμενου παραδείγματος, δηλαδή $(16\ \text{W})/2 = 8$ W. Ποια απάντηση είναι η σωστή;

Στην πραγματικότητα και οι *δύο* απαντήσεις είναι *εσφαλμένες*. Η πρώτη είναι λάθος επειδή αλλαγή της αντίστασης R προκαλεί επίσης μεταβολή του ρεύματος στο κύκλωμα (θυμηθείτε ότι μια πηγή ΗΕΔ *δεν* προκαλεί το ίδιο ρεύμα σε όλες τις περιπτώσεις). Η δεύτερη απάντηση είναι επίσης λάθος επειδή η διαφορά δυναμικού V_{ab} στα άκρα του αντιστάτη μεταβάλλεται όταν αλλάζει το ρεύμα. Για να βρούμε τη σωστή απάντηση, χρησιμοποιούμε πρώτα τη μεθοδολογία του Παραδ. 25.5 για να υπολογίσουμε το ρεύμα:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = \frac{12\ \text{V}}{8\ \Omega + 2\ \Omega} = 1{,}2\ \text{A}$$

Η μεγαλύτερη αντίσταση προκαλεί μείωση του ρεύματος. Η διαφορά δυναμικού στα άκρα του αντιστάτη είναι

$$V_{ab} = IR = (1{,}2\ \text{A})(8\ \Omega) = 9{,}6\ \text{V}$$

συνεχίζεται

η οποία είναι μεγαλύτερη από αυτή με τον αντιστάτη των 4 Ω. Μπορούμε στη συνέχεια να βρούμε την καταναλισκόμενη ισχύ στον αντιστάτη με δύο τρόπους:

$$P = I^2R = (1{,}2\ \text{A})^2(8\ \Omega) = 12\ \text{W} \quad \text{ή}$$

$$P = \frac{V_{ab}^2}{R} = \frac{(9{,}6\ \text{V})^2}{8\ \Omega} = 12\ \text{W}$$

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ: Αύξηση της αντίστασης R προκαλεί *μείωση* στην ισχύ εισόδου στον αντιστάτη. Στη σχέση $P = I^2R$ η μείωση του ρεύματος είναι περισσότερο σημαντική από την αύξηση της αντίστασης· στη σχέση $P = V_{ab}^2/R$ η αύξηση της αντίστασης είναι περισσότερο σημαντική από την αύξηση της τάσης V_{ab}. Η ίδια αυτή αρχή ισχύει και στους κοινούς λαμπτήρες πυρακτώσεως· ένας λαμπτήρας 50 W έχει μεγαλύτερη αντίσταση από έναν λαμπτήρα 100 W.

Μπορείτε να δείξετε ότι η αντικατάσταση του αντιστάτη 4 Ω με αντιστάτη 8 Ω μειώνει και τον ρυθμό μετατροπής ενέργειας (χημική σε ηλεκτρική) στην μπαταρία και τον ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας στην εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας;

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 25.10 ΙΣΧΥΣ ΣΕ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ

Για την περίπτωση βραχυκυκλώματος του Παραδ. 25.7, βρείτε τους ρυθμούς μετατροπής ενέργειας και κατανάλωσης ενέργειας στην μπαταρία και την καθαρή ισχύ εξόδου της μπαταρίας.

ΛΥΣΗ

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ: Οι ζητούμενες μεταβλητές μας είναι ξανά οι ισχείς εισόδου και εξόδου που σχετίζονται με την μπαταρία. Το **Σχ. 25.25** δείχνει το κύκλωμα. Η περίπτωση αυτή είναι η ίδια με του Παραδ. 25.8, όμως η εξωτερική αντίσταση R είναι μηδέν.

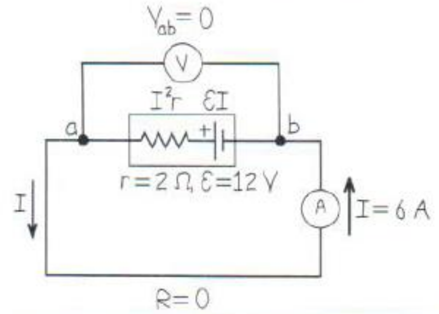
ΕΠΙΛΥΣΗ: Βρήκαμε στο Παράδ. 25.7 ότι το ρεύμα στην περίπτωση αυτή είναι $I = 6$ A. Επομένως, από την Εξ. (25.19), ο ρυθμός μετατροπής ενέργειας (χημική σε ηλεκτρική) στην μπαταρία είναι

$$\mathcal{E}I = (12\ \text{V})(6\ \text{A}) = 72\ \text{W}$$

Ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας στην μπαταρία είναι

$$I^2r = (6\ \text{A})^2(2\ \Omega) = 72\ \text{W}$$

25.25 Το σκαρίφημά μας γι' αυτό το πρόβλημα.



Η καθαρή ισχύς εξόδου της πηγής είναι $\mathcal{E}I - I^2r = 0$. Βρίσκουμε αυτό το ίδιο αποτέλεσμα από την έκφραση $P = V_{ab}I$, διότι η πολική τάση V_{ab} της πηγής είναι μηδέν.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ: Με ιδανικά σύρματα και ένα ιδανικό αμπερόμετρο, ώστε $R = 0$, *όλη* η ενέργεια από την πηγή που μετατράπηκε από χημική σε ηλεκτρική καταναλώθηκε μέσα στην πηγή. Αυτός είναι ο λόγος που μια βραχυκυκλωμένη (εξωτερικά) πηγή καταστρέφεται γρήγορα και μπορεί να εκραγεί.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 25.11 ΜΕΣΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΣΤΟΝ ΧΑΛΚΟ

Υπολογίστε τον μέσο χρόνο ελεύθερης διαδρομής μεταξύ συγκρούσεων στον χαλκό σε θερμοκρασία δωματίου.

ΛΥΣΗ

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ: Μπορούμε να βρούμε μια έκφραση για τον μέσο ελεύθερο χρόνο τ συναρτήσει των n, ρ, e και m με αναδιάταξη της Εξ. (25.24). Από το Παράδ. 25.1 και τον Πίνακα 25.1, για τον χαλκό $n = 8{,}5 \times 10^{28}\ \text{m}^{-3}$ και $\rho = 1{,}72 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$. Επίσης, $e = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C και $\text{m} = 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg για ηλεκτρόνια.

ΕΠΙΛΥΣΗ: Από την Εξ. (25.24) παίρνουμε

$$\tau = \frac{m}{ne^2\rho}$$

$$= \frac{9{,}11 \times 10^{-31}\ \text{kg}}{(8{,}5 \times 10^{28}\ \text{m}^{-3})(1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C})^2(1{,}72 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m})}$$

$$= 2{,}4 \times 10^{-14}\ \text{s}$$

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ: Ο μέσος χρόνος ελεύθερης διαδρομής είναι ο μέσος χρόνος μεταξύ συγκρούσεων για ένα ηλεκτρόνιο. Παίρνοντας το αντίστροφό του, βρίσκουμε ότι το κάθε ηλεκτρόνιο κατά μέσο όρο συμμετέχει σε $1/\tau = 4{,}2 \times 10^{13}$ συγκρούσεις ανά δευτερόλεπτο!