



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΑΝΟΙΚΤΑ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΑ ΜΑΘΗΜΑΤΑ

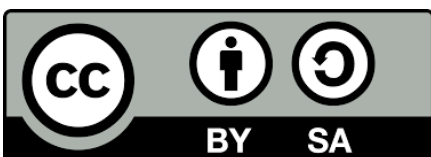


Τίτλος Μαθήματος: Γενική Φυσική (Ηλεκτρομαγνητισμός)

Ενότητα: ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΡΕΥΜΑ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Διδάσκων: Επίκουρος Καθηγητής Δημήτριος Βλάχος

Τμήμα: Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Κεφάλαιο 6

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΡΕΥΜΑ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Σύνοψη

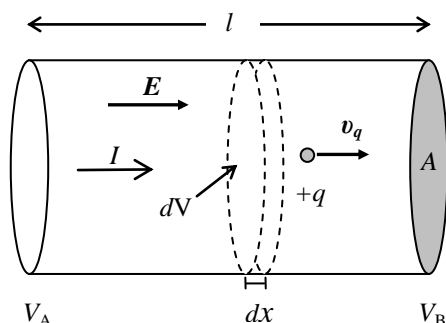
Στο έκτο ετούτο κεφάλαιο ορίζεται και περιγράφεται η ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος και οι συναφείς ποσότητες της πυκνότητας ρεύματος, αγωγιμότητας, αντίστασης και ειδικής αντίστασης. Μελετώνται τα αγωγή υλικά βάσει του νόμου του Ohm καθώς επίσης και το μοντέλο για την επεξήγηση της αγωγιμότητα στα υλικά. Τέλος γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας..

6.1 Ηλεκτρικό ρεύμα και αντίσταση

Είδαμε στο κεφάλαιο 4 ότι όταν υπάρχει διαφορά δυναμικού σε μια κατεύθυνση ή αλλιώς βαθμίδα δυναμικού, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο E . Εάν στα άκρα ενός αγωγού υπάρχει διαφορά δυναμικού και επομένως ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του, τότε στα ελεύθερα ηλεκτρόνια θα ασκηθεί ηλεκτρική δύναμη $F = -eE$, η οποία θα τα επιταχύνει, δηλαδή θα τα κινήσει, προς την αντίθετη κατεύθυνση του E . Οποιαδήποτε κίνηση ηλεκτρικού φορτίου από μια περιοχή του χώρου σε μια άλλη, ονομάζεται **ηλεκτρικό ρεύμα**. Ο ρυθμός διέλευσης



Andre Marie Ampere
(1775-1836)



Σχήμα 6.1 Η συμβατική φορά του ηλεκτρικού ρεύματος όπως καθορίζεται από την κίνηση των θετικών ηλεκτρικών φορτίων (ηλεκτρικών οπών) μέσα σ' έναν αγωγό.

του φορτίου ως προς τον χρόνο καθορίζει την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, I . Δηλαδή ισχύει

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (6.1)$$

Η μονάδα μέτρησης της έντασης του ρεύματος στο SI είναι το Ampere (1A), προς τιμή του Γάλλου φυσικού Andre Marie Ampere (1775-1836), και ορίζεται ως

$1A=C/s$. Η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος ορίζεται συμβατικά να είναι η φορά των θετικών φορτίων μέσα σ' ένα ηλεκτρικό πεδίο E που δημιουργείται μέσα σ' ένα αγωγό από μια διαφορά δυναμικού V_{AB} στα άκρα του αγωγού. Στην πραγματικότητα, τα φορτία που κινούνται είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού και κατευθύνονται από το χαμηλό δυναμικό V_B στο υψηλό V_A . Όπως όμως έχουμε αναφέρει στο εδάφιο 1.3, η μετακίνηση ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου προς μια κατεύθυνση, δημιουργεί αυτόματα κίνηση ηλεκτρικής «οπής» προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή ηλεκτρικού θετικού φορτίου e προς την αντίθετη κατεύθυνση. Πρέπει να τονίσουμε ότι η ηλεκτρική οπή δεν είναι σωματίο. Δηλώνει απλώς την απουσία ηλεκτρονίου στο στερεό σώμα. Στο σχ. 6.1 φαίνεται η κίνηση των θετικών φορτίων (ηλεκτρικών οπών) με φορτίο $q=e$ μέσα σ' ένα κυλινδρικό αγωγό μήκους l και διατομής A . Η κίνηση των φορτίων γίνεται από το άκρο υψηλού δυναμικού V_A σ' αυτό του χαμηλού V_B .

Εντός του αγωγού μπορεί να ορισθεί η **πυκνότητα του ρεύματος** J , ως

$$J = \frac{I}{A} \quad (6.2)$$

Η εξ. 6.2 μέσω της 6.1 γίνεται

$$J = \frac{dQ}{Adt} \quad (6.3)$$

Αν θεωρήσουμε ένα στοιχειώδες όγκο dV μέσα στον αγωγό του σχήματος 6.1, το φορτίο που αυτός περιέχει είναι

$$dQ = nq dV \quad (6.4)$$

όπου n είναι η πυκνότητα των κινουμένων φορτίων ανά μονάδα όγκου και q το στοιχειώδες φορτίο των φορέων (π.χ. e για ηλεκτρόνια). Η εξ. 6.4 στην 6.3 δίνει

$$J = \frac{nq dV}{Adt} = \frac{nq Adx}{Adt} \Rightarrow J = nqv_q \quad (6.5)$$

όπου θεωρήσαμε $dV=Adx$ τον στοιχειώδες όγκο και $v_q=dx/dt$ την ταχύτητα των φορέων φορτίου. Η πυκνότητα του ρεύματος J είναι διανυσματικό μέγεθος που βάση της εξίσωσης 6.5 έχει την κατεύθυνση της ταχύτητας των φορέων θετικού φορτίου που ονομάζεται **ταχύτητα διολίσθησης**. Η μονάδα της πυκνότητας ρεύματος στο SI είναι το A/m^2 .



George Simon Ohm
(1789-1854)

Η πηγή ενός πεδίου \mathbf{E} και συνεπώς της κίνησης ηλεκτρικών φορτίων μέσα σ' ένα αγωγό είναι η διαφορά δυναμικού σε δυο του άκρα. Εάν η διαφορά δυναμικού είναι σταθερή τότε το ίδιο συμβαίνει και για τα \mathbf{E} και \mathbf{J} . Για πολλά υλικά υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ των δυο αυτών διανυσμάτων. Δηλαδή ισχύει

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (6.6)$$

όπου η σταθερά αναλογίας σ ονομάζεται **αγωγιμότητα** του υλικού. Η εξ. 6.6 ονομάζεται νόμος του Ohm, και τα υλικά για τα οποία ισχύει ονομάζονται **ωμικά υλικά** προς τιμή του Γερμανού φυσικού George Simon Ohm (1789-1854) που τον ανακάλυψε. Δηλαδή ο **νόμος του Ohm** ορίζει ότι η πυκνότητα ρεύματος σε ένα υλικό, είναι γραμμικώς ανάλογη της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που υπάρχει μέσα σ' αυτό.

Θεωρώντας τον αγωγό του σχ. 6.1 μπορούμε από την σχέση 5.4 του προηγούμενου κεφαλαίου να γράψουμε για την διαφορά δυναμικού $V = V_{AB} = V_A - V_B$ στα άκρα του αγωγού

$$V = El \Rightarrow E = \frac{V}{l} \quad (6.7)$$

Η εξ. 6.6 από την 6.7 δίνει

$$J = \sigma \frac{V}{l} \quad (6.8)$$

Όμως από τον ορισμό της πυκνότητας ρεύματος της εξίσωσης 6.2 και την 6.8 παίρνουμε

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{V}{l} \Rightarrow V = \frac{l}{\sigma A} I \quad (6.9)$$

ή

$$V = RI \quad (6.10)$$

όπου

$$R = \frac{l}{\sigma A} \quad (6.11)$$

Το μέγεθος R ονομάζεται **αντίσταση** του αγωγού και όπως δείξαμε για τα ωμικά υλικά ισχύει ο νόμος του Ohm υπό την μορφή

$$R = \frac{V}{I} \quad (6.12)$$

Η εξ. 6.12 είναι μια διαφορετική έκφραση του νόμου του Ohm (εξ. 6.6). Η μονάδα της αντίστασης στο SI είναι το 1 Ohm (Ω), όπου $1 \Omega = \text{V/A}$. Δηλαδή όταν στα άκρα ενός αγωγού εφαρμοσθεί διαφορά δυναμικού 1 V και παράγεται ρεύμα 1 A τότε η αντίσταση του αγωγού είναι 1 Ω .

Ένα άλλο μέγεθος που εκφράζει την αντίσταση ενός υλικού είναι η **ειδική αντίσταση** ρ που ορίζεται ως το αντίστροφο μέγεθος της αγωγιμότητας

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (6.13)$$

Από τον ορισμό της ρ , η αντίσταση R βάσει της εξίσωσης 6.11 γράφεται

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (6.14)$$

Έτσι λοιπόν η αντίσταση ενός υλικού εξαρτάται όχι μόνο από την ειδική του αντίσταση ρ αλλά και από την γεωμετρία των διαστάσεών του. Κάθε υλικό έχει μια χαρακτηριστική τιμή ειδικής αντίστασης, η οποία εξαρτάται από την φύση του υλικού και από την θερμοκρασία του. Διαφορετικοί αγωγοί ως προς το σχήμα και το μέγεθος αλλά από το ίδιο υλικό, έχουν την ίδια ειδική αντίσταση ρ όμως διαφορετική αντίσταση R .

Παράδειγμα 6.1 Ηλεκτρικό ρεύμα και αντίσταση

Σύρμα αλουμινίου διαμέτρου 0.8 mm διαρρέεται από ρεύμα. Το ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο σύρμα είναι 0.520 V/m. α) Ποιο είναι το ρεύμα που διαρρέει το σύρμα; β) Ποια είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δυο σημείων του σύρματος που απέχουν μεταξύ τους απόσταση 7 m; γ) Ποια είναι η αντίσταση ενός τέτοιου σύρματος; Δίνεται ότι η ειδική αντίσταση του αλουμινίου είναι $\rho = 2.82 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.

Λύση

α) Το ρεύμα που διαρρέει το σύρμα δίδεται ως

$$I = JA \quad (1)$$

όπου

$$A = \pi R^2 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \Rightarrow A = \pi \frac{d^2}{4} \quad (2)$$

και

$$J = \sigma E \Rightarrow J = \frac{E}{\rho} \quad (3)$$

Οι εξ. 2 και 3 στην 1 δίνουν

$$I = \frac{E}{\rho} \pi \frac{d^2}{4} = \frac{0.502 \text{ N/C} \times (0.8 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{4 \times 2.82 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}} \Rightarrow I = 2.95 \text{ A}$$

β) Εφόσον τα σημεία απέχουν απόσταση $l=7 \text{ m}$, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων είναι

$$V = El = 0.502 \text{ N/C} \times 7 \text{ m} \Rightarrow V = 3.51 \text{ V}$$

γ) Το σύρμα είναι μέταλλο, άρα είναι ωμικό υλικό. Επομένως η αντίσταση R του σύρματος είναι

$$R = \frac{V}{I} = \frac{6.24 \text{ V}}{2.95 \text{ A}} \Rightarrow R = 2.11 \Omega$$

Παράδειγμα 6.2 Μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα

Το ρεύμα σε ένα σύρμα μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση $I=A+Bt^2$. Εάν οι σταθερές είναι $A=4.00 \text{ C/s}$ και $B=0.60 \text{ C/s}^3$, τότε α) πόσα coulomb φορτίου διέρχονται από μια διατομή του σύρματος στο χρονικό διάστημα μεταξύ $t=0$ και $t=10 \text{ s}$, και β) ποιο σταθερό ρεύμα θα μπορούσε να μεταφέρει το ίδιο φορτίο στο ίδιο χρονικό διάστημα;

Λύση

α) Το ρεύμα ορίζεται ως

$$I = \frac{dQ}{dt} \Rightarrow dQ = Idt \Rightarrow \int dQ = \int_{t_1}^{t_2} Idt = \int_{t_1}^{t_2} (A + Bt^2) dt = \left(At + B \frac{t^3}{3} \right) \Big|_{t_1}^{t_2} \Rightarrow$$

$$Q = 4.00 \text{ C/s} \times (10 - 0) \text{ s} + 0.60 \text{ C/s}^3 \times \left(\frac{10^3 - 0}{3} \right) \text{ s}^3 = 40.0 \text{ C} + 200 \text{ C} \Rightarrow Q = 240 \text{ C}$$

β) Το σταθερό ρεύμα που μεταφέρει αυτό το φορτίο στον ίδιο χρόνο είναι

$$I = \frac{Q}{t} \Rightarrow I = \frac{240 \text{ C}}{10 \text{ s}} \Rightarrow I = 24 \text{ A}$$

Παράδειγμα 6.3 Ηλεκτρικό ρεύμα και ταχύτητα ολίσθησης

Ηλεκτρικός αγωγός σχεδιασμένος για να διαρρέεται από μεγάλα ρεύματα έχει τετραγωνική διατομή με πλευρά $a=2.00 \text{ mm}$ και μήκος $l=12.0 \text{ m}$. Η αντίσταση μεταξύ των άκρων του είναι $R=0.064 \Omega$. α) Πόση είναι η ειδική αντίσταση του υλικού; β) Εάν το μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στον αγωγό είναι $E=1.20 \text{ V/m}$, πόσο είναι το ολικό ρεύμα; γ) Εάν το υλικό έχει $n=8.5 \times 10^{28}$ ελεύθερα ηλεκτρόνια ανά κυβικό μέτρο, υπολογίστε την ταχύτητα ολίσθησης υπό τις συνθήκες του μέρους (β).

Λύση

α) Η αντίσταση του αγωγού δίνεται ως

$$R = \rho \frac{l}{A} \Rightarrow \rho = \frac{RA}{l} \quad (1)$$

Επειδή η διατομή A του αγωγού είναι τετραγωνική ισχύει

$$A = a^2 \quad (2)$$

Η εξ. 2 στην 1 δίνει

$$\rho = \frac{Ra^2}{l} \Rightarrow \rho = \frac{0.064\Omega \times (2 \times 10^{-3}\text{m})^2}{12.0\text{m}} = \frac{0.246\Omega \times 10^{-6}\text{m}^2}{12.0\text{m}} \Rightarrow \rho = 2.05 \times 10^{-8}\Omega\text{m}$$

β) Το ολικό ρεύμα του αγωγού είναι

$$I = JA \quad (3)$$

Όμως ισχύει για τα ωμικά υλικά

$$J = \sigma E \quad (4)$$

Η αγωγιμότητα όμως σ του αγωγού είναι το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης ρ και έτσι η εξ. 4 στην 3 δίνει

$$I = \frac{E}{\rho} A \Rightarrow I = \frac{1.20 \text{Vm}^{-1} \times (2 \times 10^{-3}\text{m})^2}{2.05 \times 10^{-8}\Omega\text{m}} \Rightarrow I = 225\text{A}$$

γ) Το ρεύμα δίνεται ως

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (5)$$

όπου το dQ το φορτίο που περνά από την διατομή A του αγωγού στη μονάδα του χρόνου. Θεωρώντας έναν στοιχειώδη όγκο του αγωγού dV , (βλέπε σχ. 6.1) μπορούμε να γράψουμε

$$dV = Adx \quad (6)$$

Ο όγκος dV , περιέχει N φορτία (ηλεκτρόνια) όπου $N = ndV$, όπου n είναι η πυκνότητα των φορέων φορτίου (πυκνότητα ηλεκτρονίων) και επομένως το συνολικό φορτίο του όγκου dV είναι

$$dQ = Ne = nedVdx \quad (7)$$

Οι εξισώσεις 6 και 7 στην 5 δίνουν

$$I = \frac{neAdx}{dt} \Rightarrow I = neAv \quad (8)$$

όπου $v = dx/dt$ η ταχύτητα των ηλεκτρονίων μέσα στον αγωγό. Τελικά η εξ. 8 μας δίνει

$$v = \frac{I}{neA} \Rightarrow v = \frac{225\text{A}}{8.5 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{C} \times (2.00 \times 10^{-3} \text{m})^2} \Rightarrow v = 4.13 \times 10^{-3} \text{m/s}$$

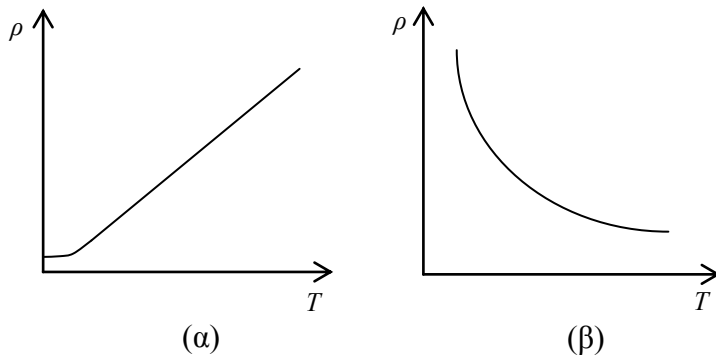
6.2 Μοντέλο αγωγιμότητας

Σύμφωνα με το κλασσικό μοντέλο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, η αντίσταση ενός υλικού συνδέεται με την κίνηση των ελευθέρων ηλεκτρονίων μέσα σ' αυτό. Όταν εφαρμοσθεί κάποια διαφορά δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού αυτόματα δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του αγωγού. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια θα κινηθούν προς την κατεύθυνση του άκρου με το υψηλότερο δυναμικό κερδίζοντας ενέργεια από το πεδίο και αυξάνοντας την κινητική τους ενέργεια. Κατά την διάρκεια της κίνησής τους τα ηλεκτρόνια «συγκρούονται» συνεχώς με τα άτομα του υλικού με αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται η κίνησή τους. Στις συνήθεις θερμοκρασίες αυτές οι συγκρούσεις αποτελούν το κύριο αίτιο της αντίστασης στην κίνηση των φορτίων και συνεπώς του ηλεκτρικού ρεύματος. Αποτέλεσμα των «συγκρούσεων» είναι η μεταφορά ενέργειας από τα ηλεκτρόνια στα άτομα και την ταυτόχρονη μετατροπή μέρους της κινητικής ενέργειας τους σε ταλαντωτική ενέργεια των ατόμων. Όσοι πιο πολλές «συγκρούσεις» συμβαίνουν μεταξύ ηλεκτρονίων-ατόμων τόσο αυξάνεται η ταλαντωτική ενέργεια των ατόμων και επομένως και η θερμοκρασία του αγωγού. Η αντίσταση του αγωγού όμως είναι ανάλογη του αριθμού των συγκρούσεων και κατά συνέπεια της θερμοκρασίας του. Δηλαδή η αντίσταση του αγωγού αυξάνεται με την θερμοκρασία. Τα ηλεκτρόνια παρ' όλες τις συγκρούσεις τελικά κινούνται με μια μέση ταχύτητα, την **ταχύτητα διολίσθησης**.

Όταν στο εσωτερικό του αγωγού δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο, τότε η μέση ταχύτητα των ηλεκτρονίων είναι μηδέν δηλαδή δεν υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτό συμβαίνει διότι τα ηλεκτρόνια κινούνται τυχαία στον αγωγό σε τυχαίες κατευθύνσεις.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο η ειδική αντίσταση ρ ενός υλικού εξαρτάται από την θερμοκρασία του. Συγκεκριμένα για τα περισσότερα ωμικά υλικά, δηλαδή για τα υλικά που ισχύει η εξ. 6.12, η ρ είναι ανάλογη της θερμοκρασίας. Η αναλογία αυτή φαίνεται στο σχ. 6.2α. Για πολύ χαμηλές θερμοκρασίες η αναλογία δεν ισχύει και η ρ τείνει σε μια σταθερή τιμή ρ_0 που σχετίζεται με τα άτομα των προσμίξεων που υπάρχουν σε κάθε υλικό. Αντίθετα για τους ημιαγωγούς όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο, η ρ μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, γεγονός που

φαίνεται γραφικά στο σχ. 6.2β. Στους ημιαγωγούς οι φορείς ηλεκτρικού φορτίου είναι



Σχήμα 6.2 Η ειδική αντίσταση ρ συναρτήσει της θερμοκρασίας T , για α) αγωγούς και β) ημιαγωγούς.

συνήθως άτομα ξένων προσμίξεων.

Υπάρχουν υλικά για τα οποία κάτω από μια θερμοκρασία η οποία ονομάζεται κρίσιμη θερμοκρασία, T_c , η αντίσταση σχεδόν μηδενίζεται. Τα υλικά

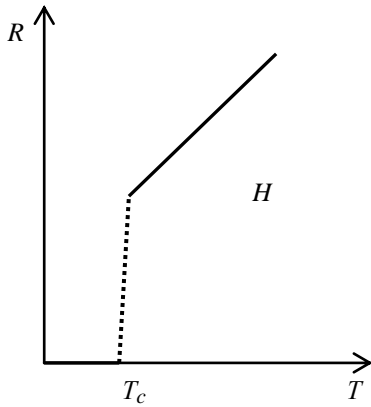
αυτά ονομάζονται **υπεραγωγοί** και είναι συνήθως μέταλλα ή σύνθετα υλικά αποτελούμενα από διάφορα στοιχεία σε συγκεκριμένες στοιχειομετρικές αναλογίες. Το φαινόμενο της μηδενικής αντίστασης έχει σαν αποτέλεσμα την διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου του υλικού ακόμη και απουσίας ηλεκτρικού πεδίου, και ονομάζεται **υπεραγωγιμότητα**. Η υπεραγωγιμότητα ανακαλύφθηκε το 1911 από τον Ολλανδό φυσικό Heike Kamerlingh Onnes καθώς μελετούσε τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υδραργύρου. Γι' αυτήν την ανακάλυψη ο Onnes τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ στη Φυσική το 1913. Ο υδράργυρος μετατρέπεται σε υπεραγωγό σε θερμοκρασία μικρότερη των $T_c=4.2$ K. Η αντίσταση R του υδραργύρου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας φαίνεται στο σχ. 6.3.



*Heike Kamerlingh Onnes
(1853–1926)*

Είναι αυτονόητο ότι η υπεραγωγιμότητα μπορεί να δώσει πηγές ανεξάντλητης ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά μόνο σε χαμηλές θερμοκρασίες, γεγονός που προς το παρόν περιορίζει τις τεράστιας σημασίας τεχνολογικές εφαρμογές της. Γι' αυτό το λόγο τις τελευταίες δεκαετίες γίνεται τεράστια ερευνητική προσπάθεια για την κατασκευή υλικών με όσο το δυνατόν υψηλότερη T_c . Πράγματι μέχρι σήμερα η ανώτερη T_c που έχει επιτευχθεί είναι περίπου 125 K για οξειδία κραμάτων θαλαίου, βαρίου, χαλκού και ασβεστίου. Είμαστε όμως αρκετά μακριά από την θερμοκρασία δωματίου όπου χρειαζόμαστε την ενέργεια για καθημερινή και ευρεία εφαρμογή.

6.3 Ρεύματα στους έμβιους οργανισμούς*

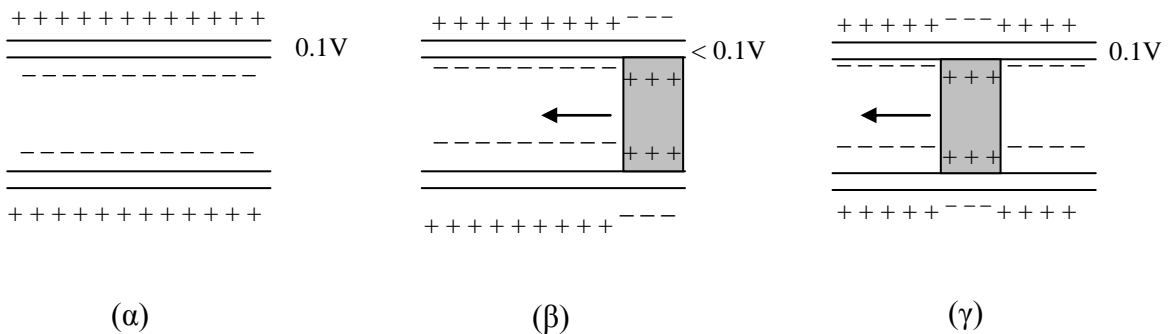


Σχήμα 6.3 Η αντίσταση του υδραργύρου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Οι ηλεκτρικές διαφορές δυναμικού και ρευμάτων παίζουν ζωτικό ρόλο στα νευρικά συστήματα των έμβιων οργανισμών. Συγκεκριμένα οι νευρικοί παλμοί διαδίδονται με ηλεκτρικές διαδικασίες όπως είναι οι ηλεκτρικοί παλμοί. Ένας νευρικός ιστός περιλαμβάνει μια πολωμένη κυτταρική μεμβράνη ανάμεσα σε δυο αγώγιμα υγρά τα οποία ονομάζονται ηλεκτρολύτες. Τα δυο υγρά βρίσκονται σε μια διαφορά δυναμικού περίπου 0.1 V. Όταν υπάρξει μια εξωτερική διέγερση στον

νευρικό ιστό η μεμβράνη γίνεται λεπτότερη με αποτέλεσμα να είναι πιο διαπερατή για τα ιόντα των ηλεκτρολυτών και επομένως η τοπική διαφορά δυναμικού να μειώνεται. Αυτή η πτώση τάσης διαδίδεται κατά μήκος του νευρικού ιστού σαν ηλεκτρικός παλμός. Ο νευρικός ιστός παίρνει την αρχική διαφορά δυναμικού όταν ο ηλεκτρικός παλμός τον διαπεράσει πλήρως. Στο σχ. 6.4 φαίνεται η μετάδοση του νευρικού παλμού διαμέσου ενός νευρικού ιστού.

Η μεγάλη ευαισθησία του ανθρώπινου σώματος σε ηλεκτρικά ρεύματα οφείλεται στην ηλεκτρική φύση της μετάδοσης νευρικών παλμών. Ρεύμα 0.1A είναι ικανό να επιφέρει δυσλειτουργία ζωτικών οργάνων όπως η καρδιά και τελικά τον θάνατο. Η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος μπορεί να ποικίλει αρκετά από 500 kΩ για ξηρό δέρμα έως 1000 Ω για υγρό. Αν η αντίσταση είναι $R=1000 \Omega$, για ένα ρεύμα έντασης 0.1A



Σχήμα 6.4 α) Η κυτταρική μεμβράνη γύρω από ένα νευρικό ιστό με μια διαφορά δυναμικού 0.1V. β) Μια εξωτερική διέγερση μπορεί να αποπολώσει τοπικά την κυτταρική μεμβράνη ελαττώνοντας αυτή τη διαφορά δυναμικού. γ) Η νέα διαφορά δυναμικού παράγει έναν ηλεκτρικό παλμό που διαδίδεται κατά μήκος του ιστού ενώ το αρχικό σημείο της διέγερσης επανέρχεται η αρχική διαφορά δυναμικού.

απαιτείται διαφορά δυναμικού $\Delta V=100 \text{ V}$. Ακόμη και μικρότερα ρεύματα της τάξης 0.01A είναι δυνατόν να προκαλέσουν ισχυρές συσπάσεις στο χέρι ή στο πόδι αν διελύσουν μέσα από αυτά. Ρεύματα παρόμοιας έντασης στο στήθος είναι δυνατόν να προκαλέσουν κοιλιακή μαρμαρυγή μια άτακτη σύσπαση των καρδιακών μυών με αποτέλεσμα την ελάττωση παροχής του αίματος. Κατά περίεργο τρόπο ρεύματα πολύ μεγαλύτερης έντασης δεν επιφέρουν μαρμαρυγή αλλά σταμάτημα της καρδιάς με μεγάλη πιθανότητα να ξαναρχίσει η λειτουργία της όταν απομακρυνθεί το ρεύμα (ηλεκτροσόκ). Επίσης ρεύμα έντασης 0.02A μέσω του ανθρώπινου σώματος και ρευματοφόρου αγωγού μπορεί να προκαλέσει ηλεκτροπληξία δηλαδή ανικανότητα του ατόμου να απαγκιστρωθεί από τον αγωγό. Το ηλεκτρικό ρεύμα έχει και ευεργητικές επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό. Συγκεκριμένα τα εναλλασσόμενα ρεύματα μεγάλης συχνότητας τάξεως 10^6 Hz μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσω διαθερμιών για την θεραπεία αρθρίτιδας, ιγμορίτιδας και τοπική καταστροφή όγκων ή την κοπή ιστών σε χειρουργικές επεμβάσεις. Επιπλέον πολύ διαδεδομένα είναι στην ιατρική τα ηλεκτροκαρδιογραφήματα και τα εγκεφαλογραφήματα όπου με την χρήση ηλεκτροδίων μελετούνται οι διαφορές δυναμικού στην καρδιά και τον εγκέφαλο αντίστοιχα. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να διαγνωσθούν δυσλειτουργίες αυτών των οργάνων όπως είναι τα καρδιακά προβλήματα, η επιληψία, η ύπαρξη εγκεφαλικών όγκων και άλλων ανωμαλιών.

Πάνω απ' όλα πρέπει να θυμόμαστε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να προκαλέσει τον θάνατο ακόμα και με μικρές τάσεις γι' αυτό θα πρέπει να χειριζόμαστε με προσοχή όλες τις ηλεκτρικές συσκευές.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Π6.1 Η διαφορά δυναμικού μεταξύ δυο σημείων σε ένα σύρμα που απέχουν 8.00 m είναι 7.20 V , όταν η πυκνότητα ρεύματος είναι $3.40 \times 10^7 \text{ A/m}^2$. Ποια είναι α) η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο σύρμα και β) η ειδική αντίσταση του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το σύρμα. *Απάντηση:* α) 0.9 V/m και β) $2.64 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$.

Π6.2 Το φορτίο (σε coulomb) που διέρχεται από μια επιφάνεια εμβαδού 2.00 cm^2 μεταβάλλεται με τον χρόνο σύμφωνα με την εξίσωση $q=4t^3+5t+6$, όπου t σε δευτερόλεπτα. Να ευρεθεί α) η ένταση και β) η πυκνότητα του ρεύματος την χρονική στιγμή $t=1 \text{ s}$. *Απάντηση:* α) 17 A και β) $8.5 \times 10^4 \text{ A/m}^2$.

Π6.3 Ένας κυλινδρικός αγωγός μήκους L και διατομής A βρίσκεται με διαφορά δυναμικού ΔV μεταξύ των άκρων του. Ξεκινώντας από τη σχέση $J=\sigma E$, όπου E το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του αγωγού, J η πυκνότητα ρεύματος, και σ η αγωγιμότητα του αγωγού, υπολογίστε την αντίσταση του αγωγού R σαν συνάρτηση της ειδικής αντίστασης ρ και των παραπάνω γεωμετρικών του στοιχείων.

Π6.4 Θεωρείστε μια αντίσταση μήκους L , σταθερού εμβαδού διατομής A και ειδικής αντίστασης ρ , η οποία διαρρέεται από σταθερή πυκνότητα ρεύματος J . Υπολογίστε την ηλεκτρική ισχύ που καταναλίσκεται ανά μονάδα του όγκου, p . Εκφράστε το αποτέλεσμα σας συναρτήσει α) των E και J , β) των J και ρ και γ) των E και ρ .

Π6.5 Πόσος χρόνος χρειάζεται για να μεταφερθούν τα ηλεκτρόνια από την μπαταρία ενός αυτοκινήτου στη μίζα; Υποθέστε ότι το ρεύμα είναι 110 A και ότι τα ηλεκτρόνια κινούνται μέσα από ένα χάλκινο σύρμα διατομής 30 mm^2 και μήκους 90 cm . Δίνεται η πυκνότητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων του χαλκού $n=8.49 \times 10^{28}$ και το φορτίο του ηλεκτρονίου $e=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. *Απάντηση:* 55.6 min .

**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων**

Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



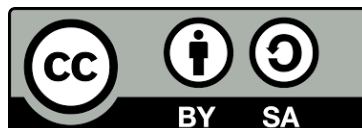
Σημειώματα

Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Διδάσκων: Επίκουρος Καθηγητής Δημήτριος Βλάχος.
«Γενική Φυσική (Ηλεκτρομαγνητισμός). ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΡΕΥΜΑ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ». Έκδοση: 1.0.
Ιωάννινα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<http://ecourse.uoi.gr/course/view.php?id=1211>.

Σημείωμα Αδειοδότησης

- Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Παρόμοια Διανομή, Διεθνής Έκδοση 4.0 [1] ή μεταγενέστερη.



[1] <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.