

Ηλεκτρικό ρεύμα

Το **ηλεκτρικό ρεύμα** είναι ο ρυθμός με τον οποίο διέρχεται ηλεκτρικό φορτίο από μια περιοχή του χώρου. Η μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού ρεύματος στο σύστημα SI είναι το **ampere** (A). $1 \text{ A} = 1 \text{ C} / \text{s}$

Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι διανυσματικό μέγεθος και συμβολίζεται με \vec{I} .

Τα φορτισμένα σωματίδια που διέρχονται από μία επιφάνεια μπορεί να είναι μόνο θετικά, μόνον αρνητικά, ή και τα δύο. Κατά σύμβαση, αποδίδουμε στο ρεύμα την κατεύθυνση της ροής των θετικών φορτίων.

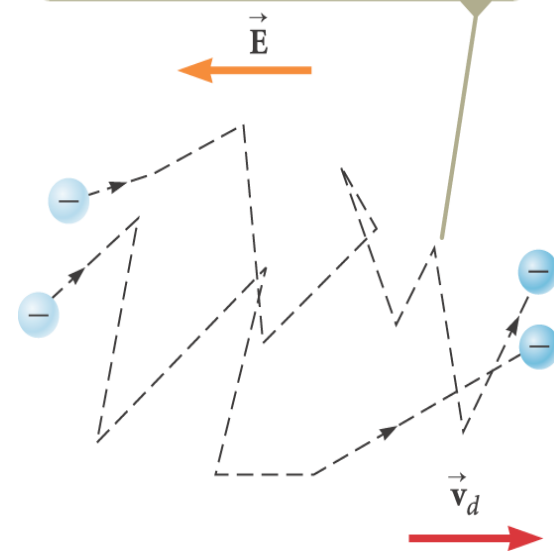
Στους συνηθισμένους μεταλλικούς αγωγούς, η κατεύθυνση του ρεύματος είναι αντίθετη της κατεύθυνσης της ροής των ηλεκτρονίων.

Κίνηση των φορέων φορτίου σε αγωγό

Όταν στα άκρα ενός αγωγού εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού, τότε δημιουργείται σ' αυτόν ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο ασκεί μια ηλεκτρική δύναμη στα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας που υπάρχουν στο σύρμα. Οι δυνάμεις αυτές αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια να κινηθούν και να δημιουργήσουν ρεύμα στο σύρμα. Η κίνηση των ηλεκτρονίων δεν είναι πλέον τυχαία. Παρά τις συγκρούσεις που συμβαίνουν, οι φορείς φορτίου κινούνται αργά κατά μήκος του αγωγού με ταχύτητα ολίσθησης: \vec{v}_d .

- Η κατεύθυνση της συνισταμένης κίνησης των ηλεκτρονίων είναι αντίθετη από την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου.
- Τα ηλεκτρόνια υπάρχουν ήδη στο σύρμα.
- Η κίνηση των ηλεκτρονίων οφείλεται στο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί η μπαταρία. Η μπαταρία δεν παρέχει ηλεκτρόνια, απλά δημιουργεί το ηλεκτρικό πεδίο.

Το πεδίο αλλάζει την τυχαία κίνηση των φορέων φορτίου, οπότε η ταχύτητα ολίσθησής τους είναι αντίθετη της κατεύθυνσης του ηλεκτρικού πεδίου.



Ταχύτητα ολίσθησης – Παράδειγμα

Θεωρούμε ένα χάλκινο σύρμα – κάθε άτομο χαλκού συνεισφέρει ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο στο σύρμα. Η ταχύτητα ολίσθησης των ηλεκτρονίων σε ένα χάλκινο σύρμα διαμέτρου 0.205 cm, το οποίο φέρει ρεύμα 10 A είναι: 2.23×10^{-4} m/s (~0.8 m/hr).

Αυτή είναι η συνηθισμένη τάξη μεγέθους της ταχύτητας ολίσθησης. Ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να χρειαστεί ώρες για να διατρέξει ολόκληρο το κύκλωμα.

- Τα φορτία ακολουθούν την ίδια «περιστροφική» ροή σε όλα τα σημεία του κυκλώματος.
- Κάθε ηλεκτρόνιο κινείται στο κύκλωμα με την ταχύτητα ολίσθησης.
- **Το ρεύμα είναι το ίδιο σε κάθε σημείο το κυκλώματος.**

Σε κανένα σημείο του κυκλώματος δεν “παράγεται” ή «καταναλώνεται» ρεύμα.

Πυκνότητα ρεύματος

\vec{J} είναι η **πυκνότητα του ρεύματος** σε έναν αγωγό. Ορίζεται ως το ρεύμα ανά μονάδα επιφάνειας: $\vec{J} \equiv \vec{I} / A$ (A είναι το εμβαδόν επιφάνειας διατομής κάθετης στη διεύθυνση του ρεύματος).

Η μονάδες μέτρησης της πυκνότητας ρεύματος, στο σύστημα SI, είναι τα A/m^2 .

Η πυκνότητα του ρεύματος έχει τη φορά των θετικών φορέων φορτίου.

Ο νόμος του Ohm

Σύμφωνα με τον **νόμο του Ohm**, σε πολλά υλικά ο λόγος της πυκνότητας ρεύματος προς το ηλεκτρικό πεδίο ισούται με μια σταθερή τιμή, σ (**ειδική αγωγιμότητα** του υλικού του αγωγού), ανεξάρτητη του ηλεκτρικού πεδίου που παράγει το ρεύμα.

- Ο νόμος του Ohm μπορεί να εκφραστεί με τη μαθηματική σχέση $\vec{J} = \sigma \vec{E}$

Ο νόμος του Ohm δεν είναι θεμελιώδης φυσική αρχή. Είναι μια εμπειρική σχέση, που ισχύει μόνο για ορισμένα υλικά. Τα υλικά που ακολουθούν τον νόμο του Ohm ονομάζονται *ωμικά*. Τα περισσότερα μέταλλα ακολουθούν τον νόμο του Ohm.

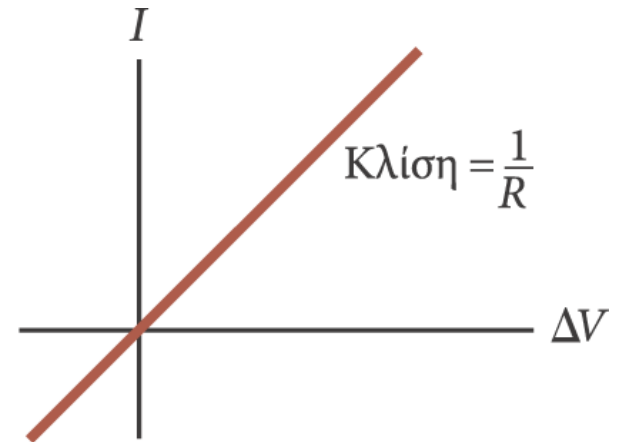
Αντίσταση

Το ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του. Η σταθερά αναλογίας ονομάζεται **αντίσταση**, R , του αγωγού. Η μονάδα μέτρησης της αντίστασης στο σύστημα SI είναι το ohm (Ω): $1 \Omega = 1 \text{ V} / \text{A}$

Η αντίσταση ενός κυκλώματος οφείλεται στις συγκρούσεις των ηλεκτρονίων, που δημιουργούν το ρεύμα, με τα άτομα του αγωγού.

Ωμικό υλικό – Γράφημα

Σε ωμικό υλικό η σχέση μεταξύ ρεύματος και τάσης είναι γραμμική. Η κλίση είναι ίση με το αντίστροφο της αντίστασης. Η αντίσταση είναι σταθερή για ένα μεγάλο εύρος τιμών της τάσης.

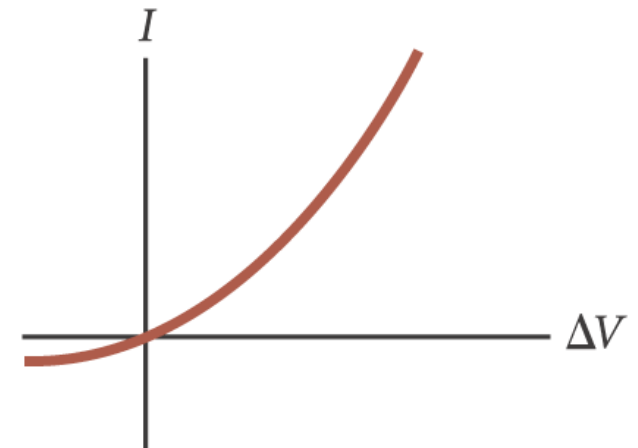


Μη ωμικό υλικό – Γράφημα

Στα μη ωμικά υλικά, η αντίσταση μεταβάλλεται με την τάση ή με το ρεύμα.

Η σχέση που συνδέει ρεύμα και τάση δεν είναι γραμμική.

Παράδειγμα μη ωμικής διάταξης αποτελεί η **δίοδος ημιαγωγού**.



Ειδική αντίσταση και αντίσταση.

Το αντίστροφο της ειδικής αγωγιμότητας είναι η **ειδική αντίσταση**: $\rho = 1/\sigma$

Η μονάδες μέτρησης της ειδικής αντίστασης στο σύστημα SI είναι τα ohm-μέτρα ($\Omega \cdot m$).

Κάθε ωμικό υλικό έχει μια χαρακτηριστική ειδική αντίσταση, που εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού και από τη θερμοκρασία του.

Η αντίσταση ενός αγωγού (μήκους l και διατομής A) εξαρτάται τόσο από τη γεωμετρία του όσο και από την ειδική αντίστασή του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (\text{γενικά: } dR = \rho \frac{dx}{A})$$

Η ειδική αντίσταση είναι ιδιότητα του υλικού ενώ η αντίσταση είναι ιδιότητα του αγωγού.

Ένας ιδανικός αγωγός θα είχε μηδενική ειδική αντίσταση. Ένας ιδανικός μονωτής θα είχε άπειρη ειδική αντίσταση.

Τιμές ειδικής αντίστασης

ΠΙΝΑΚΑΣ Η5.2

Τιμές ειδικής αντίστασης και θερμοκρασιακοί συντελεστές ειδικής αντίστασης για διάφορα υλικά

Υλικό	Ειδική αντίσταση ^α ($\Omega \cdot \text{m}$)	Θερμοκρασιακός συντελεστής ^β $\alpha [(\text{°C})^{-1}]$
Άργυρος	1.59×10^{-8}	3.8×10^{-3}
Χαλκός	1.7×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Χρυσός	2.44×10^{-8}	3.4×10^{-3}
Αργίλιο	2.82×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Βολφράμιο	5.6×10^{-8}	4.5×10^{-3}
Σίδηρος	10×10^{-8}	5.0×10^{-3}
Λευκόχρυσος	11×10^{-8}	3.92×10^{-3}
Μόλυβδος	22×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Χρωμιονικελίνη ^γ	1.00×10^{-6}	0.4×10^{-3}
Άνθρακας	3.5×10^{-5}	-0.5×10^{-3}
Γερμάνιο	0.46	-48×10^{-3}
Πυρίτιο ^δ	2.3×10^3	-75×10^{-3}
Γυαλί	10^{10} έως 10^{14}	
Σκληρό καουτσούκ	$\sim 10^{13}$	
Θείο	10^{15}	
Χαλαζίας (τηγμένος)	75×10^{16}	

^α Όλες οι τιμές ισχύουν για θερμοκρασία 20°C. Θεωρούμε ότι τα στοιχεία του πίνακα δεν περιέχουν προσμίξεις.

^β Δείτε την Ενότητα Η5.4.

^γ Ένα κράμα νικελίου-χρωμίου που χρησιμοποιείται συνήθως σε θερμοαντιστατικά στοιχεία. Η ειδική αντίσταση της χρωμιονικελίνης εξαρτάται από τη σύστασή της και κυμαίνεται μεταξύ 1.00×10^{-6} και $1.50 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$.

^δ Η ειδική αντίσταση του πυριτίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την καθαρότητά του. Σε περίπτωση προσμίξεων με άλλα άτομα, η τιμή αυτή μπορεί να διαφέρει κατά αρκετές τάξεις μεγέθους.

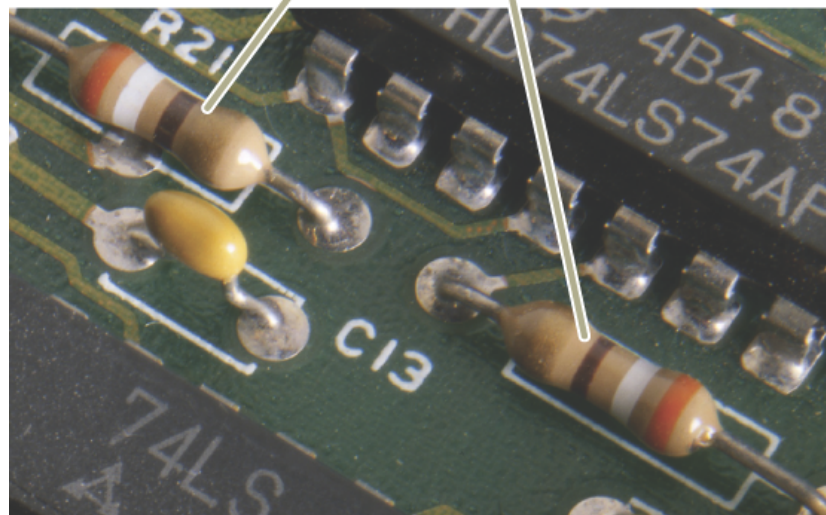
Αντιστάτες

Για τον έλεγχο του ρεύματος στα διάφορα μέρη ενός κυκλώματος, χρησιμοποιούνται στοιχεία με συγκεκριμένη ηλεκτρική αντίσταση, οι **αντιστάτες**. Η χρήση μεμονωμένων αυτόνομων αντιστατών είναι πολύ διαδεδομένη. Αντιστάτες ενσωματώνονται, μεταξύ άλλων, σε πλακέτες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Η ηλεκτρική αντίσταση ενός αντιστάτη σημειώνεται με έγχρωμες λωρίδες.

- Οι πρώτες δύο λωρίδες δίνουν τα δύο πρώτα ψηφία της αντίστασης.
- Η τρίτη λωρίδα αντιστοιχεί στη δεκαδική δύναμη του πολλαπλασιαστή της αντίστασης.
- Η τελευταία λωρίδα αντιστοιχεί στην ανοχή της αντίστασης.

Οι λωρίδες αυτών των αντιστατών έχουν χρώμα πορτοκαλί, λευκό, καφέ και χρυσό.



Χρωματική κωδικοποίηση αντιστατών

ΠΙΝΑΚΑΣ Η5.1

Χρωματική κωδικοποίηση αντιστατών

Χρώμα	Αριθμός	Πολλαπλασιαστής	Ανοχή
Μαύρο	0	1	
Καφέ	1	10^1	
Κόκκινο	2	10^2	
Πορτοκαλί	3	10^3	
Κίτρινο	4	10^4	
Πράσινο	5	10^5	
Μπλε	6	10^6	
Μωβ	7	10^7	
Γκρι	8	10^8	
Λευκό	9	10^9	
Χρυσό		$10^{2.1}$	5%
Ασημένιο		$10^{2.2}$	10%
Χωρίς χρώμα			20%

Χρωματική κωδικοποίηση της αντίστασης ενός αντιστάτη – Παράδειγμα



Το κόκκινο χρώμα (= 2) και το μπλε χρώμα (= 6) δίνουν τα δύο πρώτα ψηφία: 26

Το πράσινο χρώμα (= 5) δίνει τη δεκαδική δύναμη του πολλαπλασιαστή της αντίστασης: 10^5

Άρα, η αντίσταση του αντιστάτη είναι $26 \times 10^5 \Omega$ (ή 2.6 MΩ).

Η ανοχή της αντίστασης είναι 10% (ασημί χρώμα = 10%) ή $2.6 \times 10^5 \Omega$.

Αντίσταση και θερμοκρασία

Εντός ενός περιορισμένου εύρους θερμοκρασιών, η ειδική αντίσταση ενός υλικού μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με τη θερμοκρασία σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)].$$

Δηλαδή, η ειδική αντίσταση είναι ανάλογη της θερμοκρασίας.

- ρ_0 είναι η ειδική αντίσταση σε κάποια θερμοκρασία αναφοράς T_0 . Ως θερμοκρασία αναφοράς, T_0 , θεωρούμε συνήθως τους 20°C.

- α είναι ο **θερμοκρασιακός συντελεστής της ειδικής αντίστασης**: $\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta \rho}{\Delta T}$

Η μονάδα μέτρησης του συντελεστή α στο σύστημα SI είναι C⁻¹.

Μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας

Εφόσον η αντίσταση ενός αγωγού σταθερής διατομής είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης, και η αντίσταση ενός αγωγού θα εξαρτάται από τη θερμοκρασία:

$$R = R_0[1 + \alpha (T - T_0)]$$

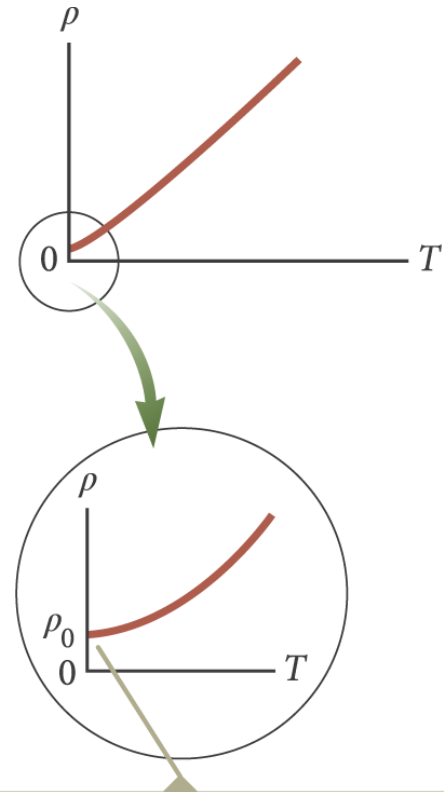
Η χρήση αυτής της ιδιότητας επιτρέπει τη λήψη μετρήσεων ακριβείας της θερμοκρασίας με την προσεκτική παρακολούθηση της αντίστασης ενός ηλεκτρόδιου από συγκεκριμένο υλικό.

Αντίσταση και θερμοκρασία – Γράφημα

Η ειδική αντίσταση στις υψηλές θερμοκρασίες οφείλεται κυρίως στις συγκρούσεις μεταξύ των ηλεκτρονίων και των ατόμων του μετάλλου. Αυτό αντιστοιχεί στη γραμμική περιοχή του γραφήματος

Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, πάντα υπάρχει μια μη γραμμική περιοχή στο γράφημα. Καθώς η θερμοκρασία τείνει στο απόλυτο μηδέν, συνήθως η ειδική αντίσταση προσεγγίζει μια πεπερασμένη τιμή.

Η υπολειμματική ειδική αντίσταση κοντά στο απόλυτο μηδέν είναι αποτέλεσμα κυρίως των συγκρούσεων των ηλεκτρονίων με προσμίξεις και ατέλειες του μετάλλου.



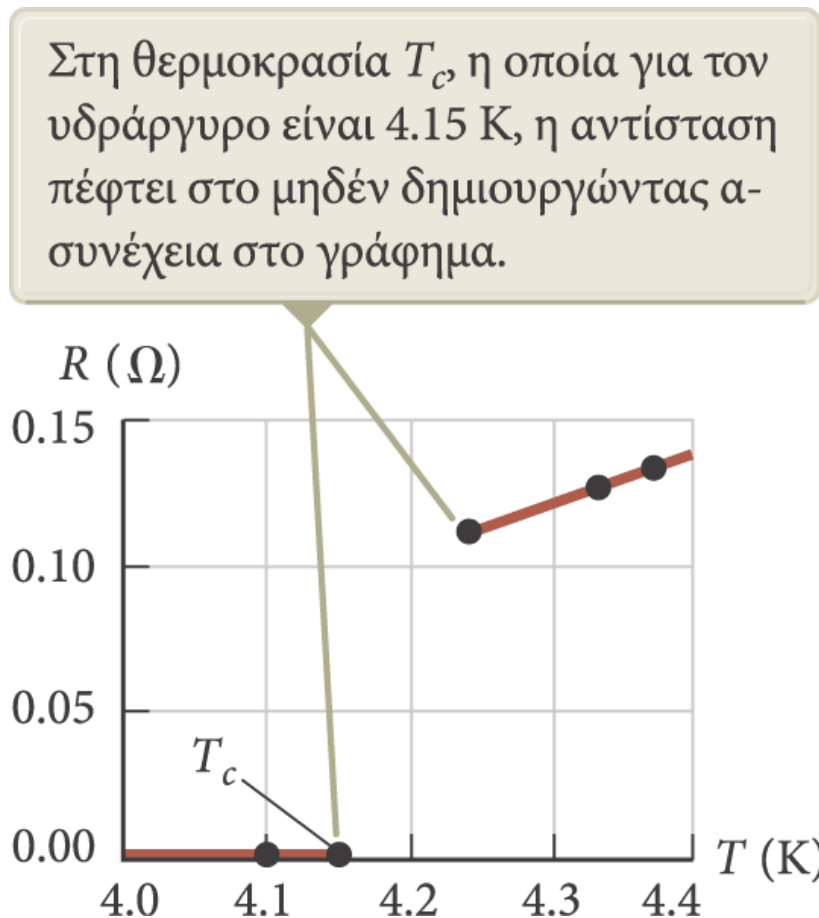
Καθώς η T πλησιάζει στο απόλυτο μηδέν, η ειδική αντίσταση πλησιάζει μια πεπερασμένη τιμή ρ_0 .

Ημιαγωγοί

Οι ημιαγωγοί είναι υλικά των οποίων η ειδική αντίσταση **μειώνεται** όσο αυξάνεται η θερμοκρασία (το α είναι αρνητικό). Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται η πυκνότητα των φορέων φορτίου.

Υπεραγωγοί

Οι υπεραγωγοί είναι μια κατηγορία μετάλλων και ενώσεων των οποίων η αντίσταση μειώνεται στο μηδέν όταν η θερμοκρασία τους πέσει κάτω από μια ορισμένη τιμή T_c που ονομάζεται **κρίσιμη θερμοκρασία**. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της T_c , το γράφημα μοιάζει με εκείνο ενός απλού μετάλλου, αλλά στη θερμοκρασία T_c μηδενίζεται απότομα.



Υπεραγωγοί (συνέχεια)

Η τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας T_c εξαρτάται από:

- τη χημική σύσταση
- την πίεση
- τη μοριακή δομή

Από τη στιγμή που δημιουργηθεί ρεύμα σε έναν υπεραγωγό, τότε το ρεύμα αυτό παραμένει χωρίς να απαιτείται η εφαρμογή εξωτερικής τάσης, επειδή $R = 0$.

Εφαρμογές των υπεραγωγών

Μια σημαντική εφαρμογή των υπεραγωγών είναι ο υπεραγώγιμος μαγνήτης.

Το μέτρο του μαγνητικού πεδίου ενός υπεραγώγιμου μαγνήτη είναι περίπου δεκαπλάσιο από εκείνο που παράγει ένας απλός ηλεκτρομαγνήτης.

Οι υπεραγώγιμοι μαγνήτες έχουν προταθεί ως μέσα αποθήκευσης ενέργειας.

Χρησιμοποιούνται σε ιατρικούς μαγνητικούς τομογράφους.



Ηλεκτρική ισχύς

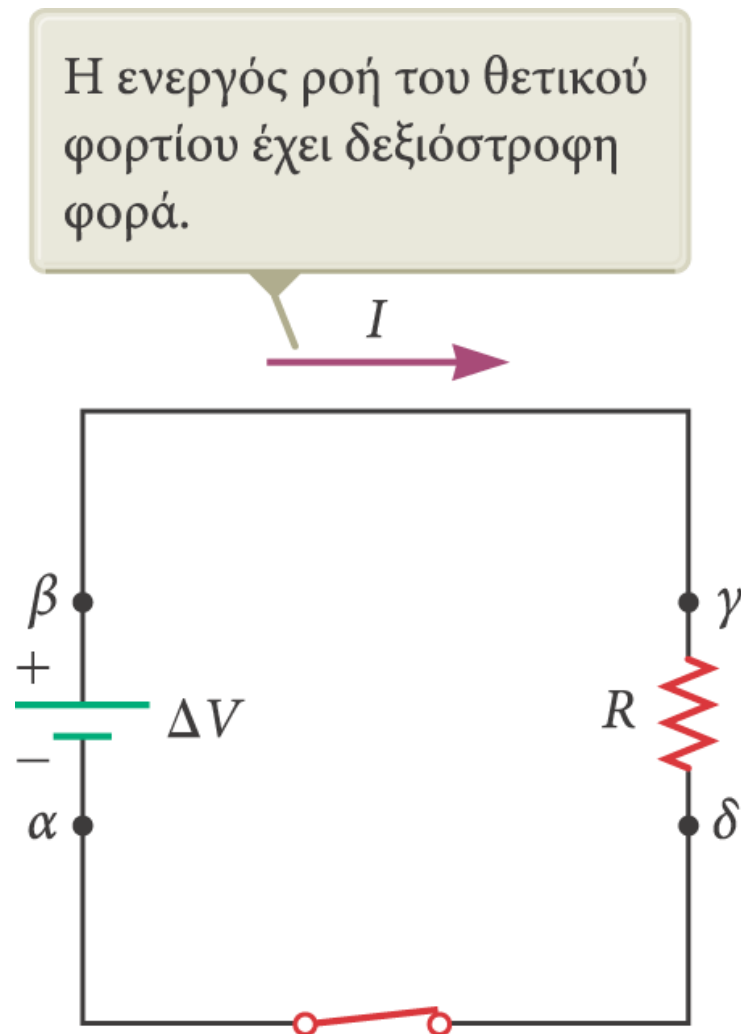
Θεωρούμε το κύκλωμα της εικόνας. Ως σύστημα θεωρούμε ολόκληρο το κύκλωμα.

Καθώς ηλεκτρόνια (συνολικού φορτίου $-Q$) μετακινούνται από το σημείο β στο α , η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του συστήματος αυξάνεται κατά $Q\Delta V$.

- Η χημική ενέργεια της μπαταρίας πρέπει να μειωθεί κατά το ίδιο ποσό.

Αυτή η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια μετασχηματίζεται σε εσωτερική ενέργεια στον αντιστάτη.

- Αντιστοιχεί στην αύξηση της ταλάντωσης των ατόμων του αντιστάτη.



Ηλεκτρική ισχύς

Υπό κανονικές συνθήκες, ο αντιστάτης περιβάλλεται από ατμοσφαιρικό αέρα, οπότε η αύξηση της θερμοκρασίας του αντιστάτη θα προκαλέσει μεταφορά ενέργειας στον αέρα μέσω θερμότητας. Επιπλέον, ο αντιστάτης εκπέμπει θερμική ακτινοβολία.

Έπειτα από ένα χρονικό διάστημα, η θερμοκρασία του αντιστάτη θα σταθεροποιηθεί.

Τότε, η εισροή ενέργειας από την μπαταρία εξισορροπείται από την απώλεια ενέργειας από τον αντιστάτη μέσω θερμότητας και ακτινοβολίας.

Ο ρυθμός αύξησης της δυναμικής ενέργειας του συστήματος, ισούται με τον ρυθμό αύξησης της εσωτερικής ενέργειας του αντιστάτη.

Η **ηλεκτρική ισχύς**, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο αποδίδεται ενέργεια στον αντιστάτη, δίνεται από την εξίσωση: $P = I \Delta V$.

Ο ρυθμός με τον οποίο καταναλώνεται ενέργεια από τον αντιστάτη είναι: $P=I^2R$.