

2.3 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα προηγούμενα κεφάλαια του ηλεκτρομαγνητισμού εξετάσαμε τα ηλεκτρικά πεδία που δημιουργούνται από ακίνητα ηλεκτρικά φορτία και τα μαγνητικά πεδία, που δημιουργούνται από κινούμενα ηλεκτρικά φορτία. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε τα ηλεκτρικά πεδία, που δημιουργούνται από μεταβολές της μαγνητικής ροής.

Στη δεκαετία του 1820 ο Michael Faraday και ο Joseph Henry, ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, κατάφεραν να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα σ' ένα κύκλωμα, μεταβάλλοντας την μαγνητική ροή που διερχόταν απ' αυτό, δηλαδή ανακάλυψαν το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Αυτή η ανακάλυψη έφερε σημαντική πρόοδο, όχι μόνο στην επιστήμη της Φυσικής αλλά και στην ανθρωπότητα. Φθάνει να αναφέρουμε ότι η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος για οικιακή και βιομηχανική χρήση στηρίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.



MICHAEL FARADAY
(1791 - 1867)

Βρετανός Φυσικός και Χημικός. Θεωρείται από τους μεγαλύτερους πειραματικούς επιστήμονες του 19ου αιώνα. Οι κυριότερες ανακαλύψεις του είναι ο νόμος της Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής και οι νόμοι της Ηλεκτροόλωσης.

ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ (ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ FARADAY)

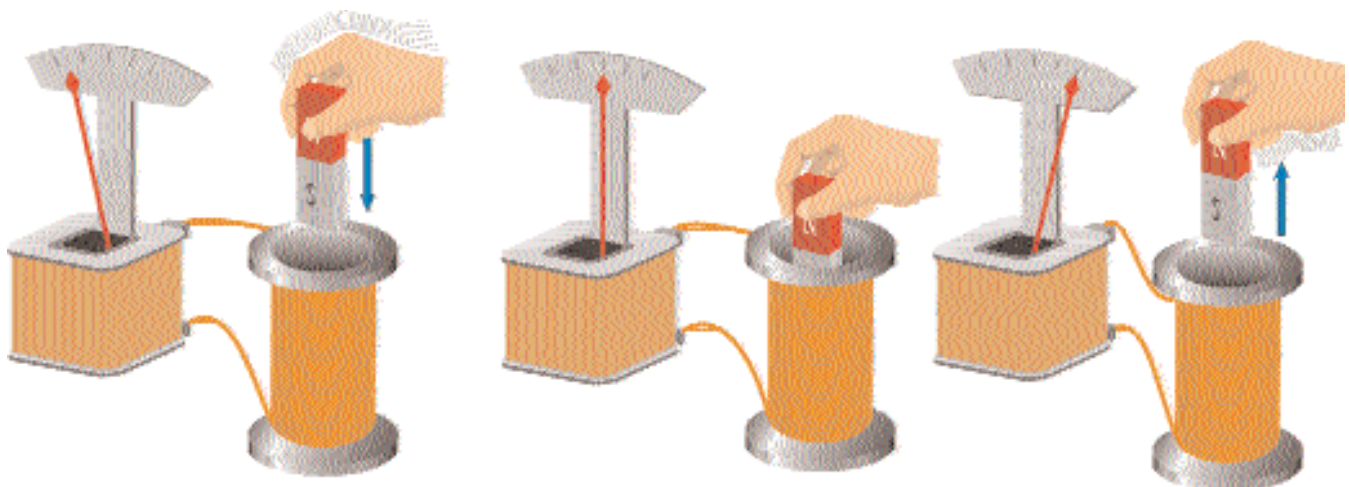
Είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο ότι το ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Με τα παρακάτω πειράματα θα διαπιστώσουμε ότι μπορεί να συμβεί και το αντίστροφο.

Παίρνουμε ένα πηνίο με πολλές σπείρες και στα άκρα του συνδέουμε ένα γαλβανόμετρο (σχ. 2.104). Χρησιμοποιούμε ακόμα ένα μαγνήτη και εκτελούμε πειράματα από τα οποία προκύπτουν τα εξής:

(i) Πλησιάζοντας τον μαγνήτη στο πηνίο το γαλβανόμετρο διαρρέεται από ρεύμα, του οποίου η τιμή είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο ταχύτερα πλησιάζει ο μαγνήτης προς το πηνίο.

(ii) Το γαλβανόμετρο δείχνει μηδέν, όταν ο μαγνήτης είναι ακίνητος, σ' οποιαδήποτε θέση.

(iii) Όταν απομακρύνουμε το μαγνήτη το γαλβανόμετρο διαρρέεται από ρεύμα αντίθετης φοράς, από τη φορά που είχε όταν πλησίαζε ο μαγνήτης.



ΣΧΗΜΑ 2.104

Όταν ο μαγνήτης κινείται, ως προς το πηνίο, το γαλβανόμετρο διαρρέεται από ρεύμα.

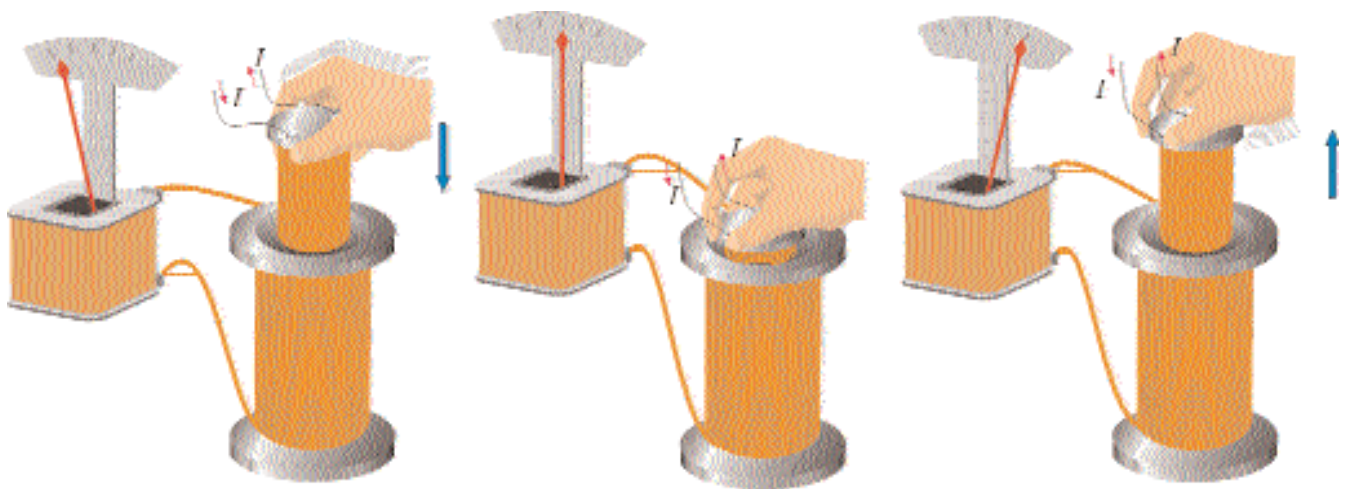
Μάλιστα η ένδειξη του γαλβανόμετρου είναι πάλι τόσο μεγαλύτερη, όσο ταχύτερα απομακρύνεται ο μαγνήτης.

(iv) Το γαλβανόμετρο διαρρέεται από ρεύμα και στην περίπτωση, που έχουμε ακίνητο το μαγνήτη και μετακινούμε κατά αντίστοιχο τρόπο το πηνίο.

(v) Αν αντικατασταθεί το πηνίο από ένα άλλο με λιγότερες σπείρες, πάλι θα παρατηρηθούν τα προηγούμενα φαινόμενα, με τη διαφορά ότι οι αντίστοιχες ενδείξεις του γαλβανόμετρου θα είναι μικρότερες.

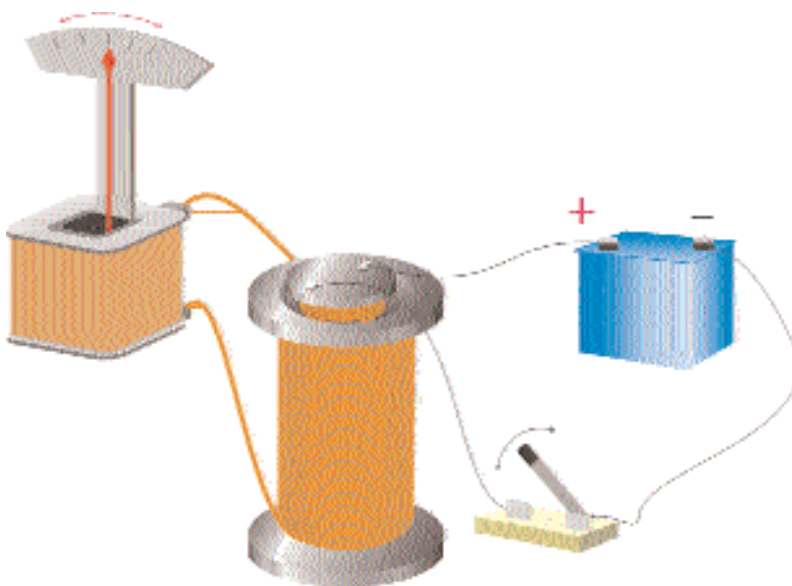
Έχουμε λοιπόν, στις προαναφερόμενες περιπτώσεις, ρεύμα στο κύκλωμα του πηνίου, δηλαδή εμφάνιση ΗΕΔ χωρίς να υπάρχει μπαταρία. Εδώ πρόκειται για επαγόμενη ΗΕΔ ή ΗΕΔ από επαγωγή και για επαγόμενο ρεύμα ή ρεύμα από επαγωγή.

Αν στο προηγούμενο πείραμα χρησιμοποιήσουμε, αντί του μαγνήτη, πηνίο τροφοδοτούμενο με ρεύμα, θα παρατηρήσουμε πάλι τα ίδια (σχ. 2.105). Δηλαδή το γαλβανόμετρο θα διαρρέεται από ρεύμα σε οποιαδήποτε



ΣΧΗΜΑ 2.105

Το γαλβανόμετρο διαρρέεται από ρεύμα όταν το ένα πηνίο κινείται σχετικά με το άλλο.

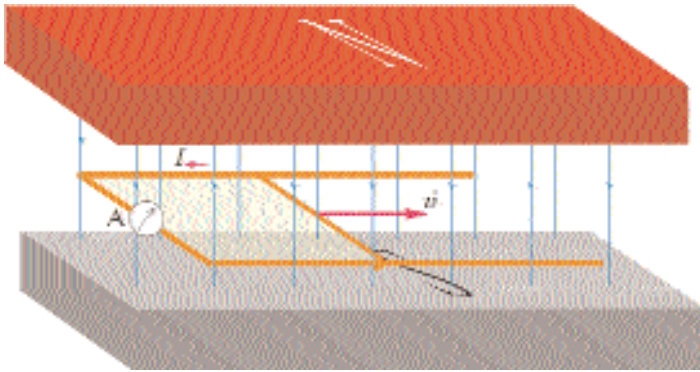


ΣΧΗΜΑ 2.106

Όταν κλείνουμε ή ανοίγουμε το διακόπτη παρατηρούμε στο γαλβανόμετρο ένα παλμό ρεύματος.

περίπτωση κίνησης του ενός πηνίου ως προς το άλλο. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί το μαγνητικό πεδίο του πηνίου είναι όμοιο με το πεδίο ενός ραβδόμορφου μαγνήτη. Σ' αυτή όμως την περίπτωση μπορούμε να εμπλουτίσουμε τις παρατηρήσεις μας. Τοποθετούμε τα πηνία πολύ κοντά ή, καλύτερα, το ένα μέσα στο άλλο (προφανώς δεν έχουν ηλεκτρική επαφή). Εφόσον το ένα πηνίο είναι ακίνητο ως προς το άλλο, το γαλβανόμετρο δείχνει μηδέν. Αν μεταβάλλουμε το ρεύμα του πηνίου του συνδεδεμένου με την πηγή, ανοίγοντας τον διακόπτη στο κύκλωμα, θα παρατηρήσουμε έναν παλμό ρεύματος στο γαλβανόμετρο του κυκλώματος του άλλου πηνίου (σχ. 2.106). Το ίδιο θα συμβεί, αν κατόπιν κλείσουμε ξανά τον διακόπτη.

Ακόμη ΗΕΔ επάγεται σε ένα πλαίσιο, που στρέφεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο ή μεταβάλλεται το εμβαδόν του (σχ. 2.107).



ΣΧΗΜΑ 2.107

Όταν μεταβάλλουμε το εμβαδόν του πλαισίου αυτό διαρρέεται από ρεύμα.

Αυτό που συνέβη σε όλες τις περιπτώσεις, που αναφέραμε, και εμφανίστηκε ΗΕΔ από επαγωγή σ' ένα κύκλωμα είναι ότι μεταβλήθηκε η διερχόμενη μαγνητική ροή απ' το κύκλωμα. Μάλιστα, όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ΗΕΔ.

Ο νόμος της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (νόμος του Faraday) λέει ότι:

Η επαγόμενη ΗΕΔ σ' ένα κύκλωμα ισούται με το αντίθετο του ρυθμού μεταβολής, της διερχόμενης απ' το κύκλωμα, μαγνητικής ροής.

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \tag{2.60}$$

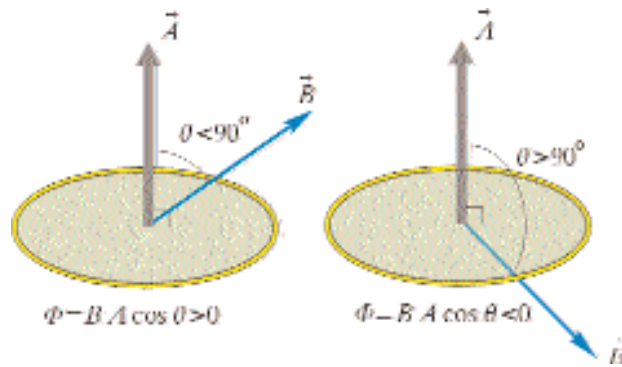
Αν έχουμε ένα πηνίο με N σπείρες και η ροή που περνά από κάθε σπείρα μεταβάλλεται με τον ίδιο ρυθμό, $\Delta\Phi/\Delta t$, τότε η επαγόμενη ΗΕΔ δίνεται απ' τη σχέση.

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} N$$

Οι παραπάνω σχέσεις μας δίνουν τη μέση τιμή της ΗΕΔ στο χρονικό διάστημα Δt . Μόνο στην περίπτωση που ο ρυθμός $\Delta\Phi/\Delta t$ δεν εξαρτάται από το πόσο μεγάλη είναι η χρονική διάρκεια Δt (δηλαδή αν η σχέση της ροής με το χρόνο είναι γραμμική $\Phi = \Phi_0 + Kt$), οι παραπάνω σχέσεις μας δίνουν και την στιγμιαία τιμή της ΗΕΔ, η οποία, προφανώς, είναι σταθερή με το χρόνο. Αν θέλουμε να υπολογίσουμε στην γενική περίπτωση την στιγμιαία τιμή της επαγόμενης ΗΕΔ, τότε το χρονικό διάστημα Δt πρέπει να είναι πολύ μικρό.

Το αρνητικό πρόσημο στις παραπάνω σχέσεις δηλώνει ότι, αν η ροή αυξάνεται, η επαγόμενη ΗΕΔ έχει αρνητική τιμή, ενώ, αν η ροή μειώνεται, η επαγόμενη ΗΕΔ έχει θετική τιμή. Να δούμε τώρα τη σημασία της θετικής ή της αρνητικής ΗΕΔ.

Θεωρούμε έναν κυκλικό μεταλλικό δακτύλιο. Η επίπεδη επιφάνεια που περικλείει χαρακτηρίζεται με το γνωστό μας διάνυσμα \vec{A} , που χρησιμοποιούμε στον ορισμό της μαγνητικής ροής με κατεύθυνση



ΣΧΗΜΑ 2.108

Το πρόσημο της ροής Φ καθορίζεται από τις κατευθύνσεις \vec{B} και \vec{A} .

αυθαίρετα ορισμένη. Οι κατευθύνσεις των \vec{A} και \vec{B} καθορίζουν το πρόσημο της μαγνητικής ροής $\Phi = BA \cos \theta$. Φανταζόμαστε κατόπιν δεξιόστροφη βίδα, που περιστρέφεται κατά τη φορά του ρεύματος που προκαλείται. Αν η βίδα προχωρά κατά την κατεύθυνση του \vec{A} τότε η ΗΕΔ είναι θετική, στην αντίθετη περίπτωση είναι αρνητική. Προφανώς μπορεί να γίνει χρήση και κανόνα του δεξιού χεριού. Μπορούμε πλέον, από το νόμο του Faraday, να υπολογίζουμε το πρόσημο της ΗΕΔ και τη φορά του επαγόμενου ρεύματος. Ας εξετάσουμε τις παρακάτω περιπτώσεις.

(α)	(β)	(γ)	(δ)
<p>θ: οξεία, $\Phi > 0$ B: αυξάνεται Φ: αυξάνεται $\mathcal{E} < 0$</p>	<p>θ: οξεία, $\Phi > 0$ B: μειώνεται Φ: μειώνεται $\mathcal{E} > 0$</p>	<p>θ: αμβλεία, $\Phi < 0$ B: αυξάνεται Φ: μειώνεται $\mathcal{E} > 0$</p>	<p>θ: αμβλεία, $\Phi < 0$ B: μειώνεται Φ: αυξάνεται $\mathcal{E} < 0$</p>

Σε κάθε περίπτωση μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η ΗΕΔ έχει τέτοια φορά, που να μπορεί να δημιουργήσει επαγόμενο ρεύμα, του οποίου το μαγνητικό πεδίο αντιτίθεται στις μεταβολές της μαγνητικής ροής. Στη περίπτωση (α), για παράδειγμα, το πεδίο \vec{B}_1 του ρεύματος I του δακτυλίου έχει φορά προς τα κάτω, αντιδρά δηλαδή στην αύξηση του μαγνητικού πεδίου, μέσα στο οποίο βρίσκεται ο δακτύλιος. Αυτό ακριβώς μας λέει και ο κανόνας του Lenz, με βάση τον οποίο μπορούμε να βρούμε εύκολα τη φορά του επαγόμενου ρεύματος.

Η επαγόμενη ΗΕΔ είναι τέτοια, ώστε να μπορεί να προκαλεί ρεύμα με φορά τέτοια, πού αυτό να αντιδρά στην αιτία δημιουργίας της ΗΕΔ.

Τον κανόνα του Lenz μπορούμε εύκολα να τον επιβεβαιώσουμε και πειραματικά. Πλησιάζουμε τον μαγνήτη του σχήματος 2.109 σ' έναν αιωρούμενο δακτύλιο. Κατά την προσέγγιση του μαγνήτη στο δακτύλιο, παρατηρούμε ότι ο δακτύλιος απομακρύνεται, δηλαδή μεταξύ μαγνήτη και



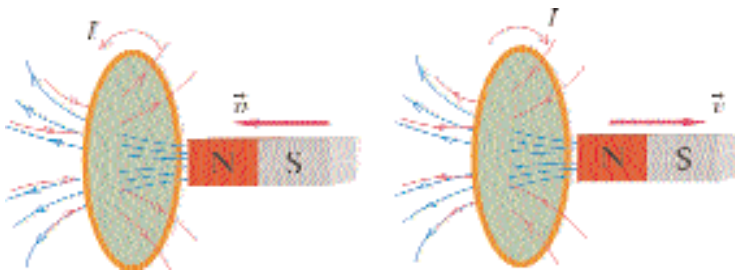
ΣΧΗΜΑ 2.109

Όταν πλησιάζουμε το μαγνήτη στο δακτύλιο εκδηλώνεται μεταξύ τους άπωση. Το αντίθετο συμβαίνει κατά την απομάκρυνση του μαγνήτη.

δακτυλίου εκδηλώνεται άπωση. Κατά την απομάκρυνση του μαγνήτη από το δακτύλιο εκδηλώνεται μεταξύ τους έλξη. Αυτό εξηγείται ως εξής.

Όταν ο μαγνήτης πλησιάζει, το επαγόμενο ρεύμα στο δακτύλιο έχει τέτοια φορά, ώστε απέναντι από το βόρειο πόλο του μαγνήτη να δημιουργείται βόρειος μαγνητικός πόλος, οπότε μεταξύ μαγνήτη και δακτυλίου εκδηλώνεται άπωση. Όταν ο μαγνήτης απομακρύνεται, αλλάζει η φορά του επαγόμενου ρεύματος και απέναντι από το βόρειο πόλο του μαγνήτη δημιουργείται νότιος μαγνητικός πόλος, άρα μεταξύ του δακτυλίου και του μαγνήτη εμφανίζεται έλξη.

Ο κανόνας του Lenz είναι συνέπεια της αρχής διατήρησης της ενέργειας. Πράγματι στην περίπτωση που πλησιάζουμε το μαγνήτη στο δακτύλιο (σχ. 2.110), εφόσον έχουμε άπωση, δαπανάμε ενέργεια για την



ΣΧΗΜΑ 2.110

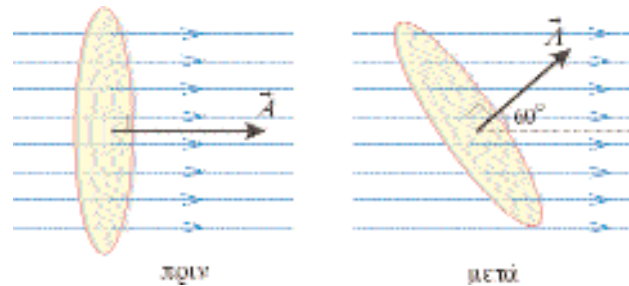
Η φορά του επαγόμενου ρεύματος σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz.

προσέγγιση μαγνήτη-δακτυλίου. Αυτή η ενέργεια γίνεται ηλεκτρική ενέργεια, και στη συνέχεια εσωτερική ενέργεια και ένεκα αύξησης της θερμοκρασίας του δακτυλίου διαδίδεται προς το περιβάλλον ως θερμότητα. Αν το επαγόμενο ρεύμα δεν είχε τη φορά που προβλέπει ο κανόνας του Lenz, θα είχαμε νότιο πόλο απέναντι από το βόρειο πόλο του μαγνήτη. Μεταξύ δακτυλίου και μαγνήτη θα εκδηλωνόταν έλξη και συνεπώς δεν θα είχαμε δαπάνη ενέργειας για την προσέγγισή τους, ενώ ταυτόχρονα θα είχαμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο δακτύλιο. Προφανώς τα παραπάνω έρχονται σε αντίθεση με την αρχή διατήρησης της ενέργειας.

Καταλήγοντας συμπεραίνουμε ότι το πρόσημο μείον, που τίθεται στη μαθηματική διατύπωση του νόμου του Faraday, εκφράζει τον κανόνα του Lenz και κατά συνέπεια, την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Υπογραμμίζουμε επίσης ότι η ΗΕΔ επάγεται και όταν ακόμη το κύκλωμα δεν είναι κλειστό και δεν διαρρέεται από ρεύμα.

Παράδειγμα 2-28

Ένας συρμάτινος κυκλικός βρόχος έχει διάμετρο $D = 20\text{ cm}$, αντίσταση $R = 2,0\ \Omega$ και είναι τοποθετημένος με το επίπεδό του κάθετο στις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου $B = 2,0\text{ T}$. Σε χρόνο $\Delta t = 0,40\text{ s}$, στρέφουμε τον βρόχο κατά 60° γύρω από μια διάμετρό του. Να υπολογισθεί η μέση τιμή του επαγόμενου ρεύματος.



ΣΧΗΜΑ 2.111

Απάντηση

Η μαγνητική ροή που διέρχεται απ' το βρόχο, όταν αυτός είναι τοποθετημένος κάθετα στις μαγνητικές γραμμές, είναι

$$\Phi_0 = BA = B\pi \frac{D^2}{4}$$

Η ροή μετά την περιστροφή είναι

$$\Phi = BA \cos 60^\circ = B\pi \frac{D^2}{4} \frac{1}{2}$$

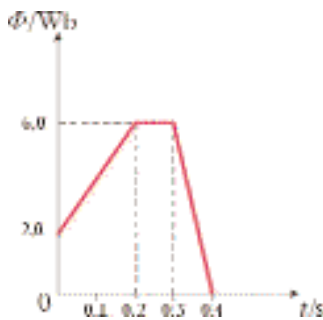
Η μέση τιμή της επαγόμενης ΗΕΔ δίνεται από το νόμο του Faraday

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = - \frac{\Phi - \Phi_0}{\Delta t} \quad \text{ή}$$

$$\mathcal{E} = \frac{B\pi D^2}{8\Delta t} = 0,078\text{ V}$$

Η μέση τιμή του επαγόμενου ρεύματος είναι

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{0,078\text{ V}}{2,0\ \Omega} = 39\text{ mA}$$



ΣΧΗΜΑ 2.112

Παράδειγμα 2-29

Στο διάγραμμα του σχήματος 2.112 φαίνεται η μεταβολή της μαγνητικής ροής, που περνά μέσα από ένα συρμάτινο πλαίσιο. Να κατασκευαστεί το διάγραμμα της επαγόμενης ΗΕΔ στο πλαίσιο, συναρτήσει του χρόνου.

Απάντηση

Είδαμε ότι, από τη σχέση $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, υπολογίζουμε τη μέση τιμή της επαγόμενης ΗΕΔ. Για να υπολογίσουμε όμως την στιγμιαία τιμή της, πρέπει το Δt να τείνει στο μηδέν.

Όταν έχουμε διάγραμμα $\Phi = f(t)$, προκειμένου να βρούμε την επαγόμενη ΗΕΔ μια χρονική στιγμή t_i , φέρνουμε την εφαπτόμενη της καμπύλης $\Phi = f(t)$ στο αντίστοιχο σημείο (Φ_i, t_i) , και το αντίθετο της κλίσης μας δίνει την ζητούμενη τιμή της ΗΕΔ.

Στο δοσμένο όμως πρόβλημα, ο ρυθμός μεταβολής της ροής παραμένει σταθερός για μεγάλα χρονικά διαστήματα, άρα η επαγόμενη ΗΕΔ έχει σταθερή τιμή σε αυτά τα διαστήματα. Έχουμε λοιπόν

(I) Από τη στιγμή 0,0 s, ως τη στιγμή 0,20 s η επαγόμενη ΗΕΔ είναι

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{6,0 - 2,0}{0,2} \text{ V} = -20 \text{ V}$$

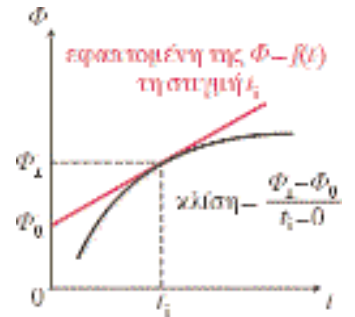
(II) Από τη στιγμή 0,20 s ως τη στιγμή 0,30 s έχουμε

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 0$$

(III) Τέλος από 0,30 s ως 0,40 s είναι

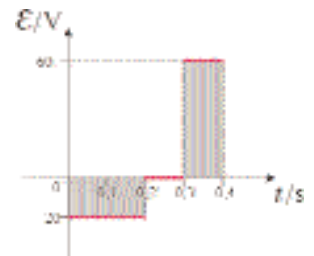
$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{0 - 6,0}{0,1} \text{ V} = 60 \text{ V}$$

Το ζητούμενο διάγραμμα εικονίζεται στο σχήμα 2.114.



ΣΧΗΜΑ 2.113

Η επαγόμενη ΗΕΔ ισούται με το αντίθετο της κλίσης του διαγράμματος $\Phi = f(t)$.



ΣΧΗΜΑ 2.114

Παράδειγμα 2-30

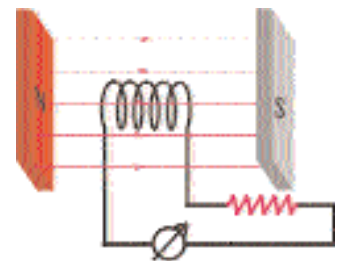
Μέτρηση του B. Διαθέτουμε πηνίο με $N = 20$ πανομοιότυπες σπείρες εμβαδού $A = 1,5 \text{ cm}^2$. Τα άκρα του πηνίου συνδέονται με ένα βαλλιστικό γαλβανόμετρο, δηλαδή ένα όργανο, το οποίο μετρά το φορτίο που διέρχεται απ' αυτό. Η ολική αντίσταση του κυκλώματος είναι $R = 10 \Omega$. Το πηνίο, που αρχικά βρίσκεται μέσα σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο με τον άξονά του κάθετο στις δυναμικές γραμμές, στρέφεται απότομα κατά 90° . Να βρεθεί το πεδίο B , αν το βαλλιστικό γαλβανόμετρο έδειξε $150 \mu\text{C}$.

Η διαδικασία της περιστροφής πρέπει να γίνει απότομα για λόγους που έχουν να κάνουν με τη λειτουργία του βαλλιστικού γαλβανομέτρου.

Απάντηση

Αρχικά η διερχόμενη από το πηνίο μαγνητική ροή είναι $\Phi_i = 0$, γιατί το επίπεδο των σπειρών του είναι παράλληλο προς τις δυναμικές γραμμές. Τελικά, όταν το επίπεδο των σπειρών τοποθετείται κάθετα στις δυναμικές γραμμές, από κάθε σπείρα η διερχόμενη ροή είναι $\Phi_f = BA$. Η μέση (απόλυτη) τιμή της επαγόμενης ΗΕΔ στο πηνίο, στο χρονικό διάστημα Δt της περιστροφής, είναι

$$\mathcal{E} = \frac{|\Delta\Phi|}{\Delta t} N = \frac{BA}{\Delta t} N$$



βαλλιστικό γαλβανόμετρο

ΣΧΗΜΑ 2.115

Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του B.

Η μέση τιμή του επαγόμενου ρεύματος είναι

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{BAN}{R\Delta t}$$

Το επαγόμενο φορτίο, που μετακινήθηκε μέσω του γαλβανομέτρου στο χρόνο Δt , δίνεται απ' τη σχέση

$$Q = I\Delta t = \frac{BAN}{R} \quad (I)$$

Άρα από την (I) βρίσκουμε εύκολα τη ζητούμενη τιμή του πεδίου B .

$$B = \frac{QR}{NA} = \frac{150 \times 10^{-6} \text{ C} \times 10 \Omega}{20 \times 1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 0,50 \text{ T}$$

Μπορούμε να παρατηρήσουμε από τη σχέση (I) ότι **το επαγόμενο φορτίο είναι ανεξάρτητο του χρόνου στον οποίο επήλθε η μεταβολή της μαγνητικής ροής.**

ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΗΕΔ ΣΕ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟ ΑΓΩΓΟ

Θεωρούμε έναν ευθύγραμμο αγωγό ZH μήκους ℓ , που κινείται με σταθερή ταχύτητα v , έχοντας τα άκρα του σε επαφή με δύο οριζόντια μεταλλικά σύρματα $Ax, \Gamma y$. Τα A, Γ ενώνονται με αγωγό $A\Gamma$, στον οποίο παρεμβάλεται ένα αμπερόμετρο. Το επίπεδο της διάταξης είναι οριζόντιο και αυτή βρίσκεται σε ένα χώρο, όπου υπάρχει κατακόρυφο ομογενές μαγνητικό πεδίο, \vec{B} . Παρατηρώντας το αμπερόμετρο, διαπιστώνουμε ότι το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα, δηλαδή και σε αυτή την περίπτωση, επάγεται στο κύκλωμα ΗΕΔ. Αυτό δικαιολογείται θεωρητικά ως εξής: Η μεταβολή του εμβαδού του κυκλώματος $AZ\Gamma A$ συνεπάγεται μεταβολή της διερχόμενης μαγνητικής ροής, άρα εμφάνιση επαγόμενης ΗΕΔ.

Σε χρόνο Δt το εμβαδό του $AZ\Gamma A$ μεταβάλλεται κατά

$$\Delta A = \ell \Delta x = \ell v \Delta t$$

Οπότε η μεταβολή της μαγνητικής ροής είναι

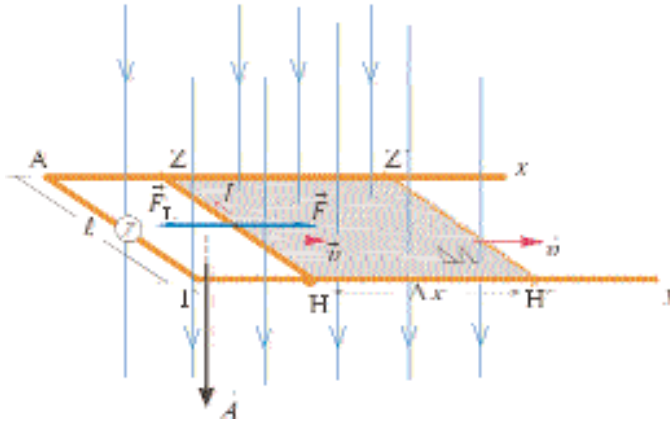
$$\Delta \Phi = B \Delta A = B \ell v \Delta t$$

Άρα η επαγόμενη ΗΕΔ είναι

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{ή}$$

$$\mathcal{E} = -Bv\ell$$

Το μείον στην σχέση δηλώνει, σύμφωνα με όσα αναφέραμε για το πρόσημο της επαγόμενης ΗΕΔ, ότι το επαγόμενο ρεύμα έχει τη φορά που φαίνεται στο σχήμα 2.116. Μπορούμε να προσδιορίσουμε τη φορά του ρεύματος και από τον κανόνα του Lenz. Δηλαδή, το επαγόμενο ρεύμα πρέπει να έχει τη φορά που φαίνεται στο σχήμα, ώστε η ασκούμενη στον αγωγό ZH δύναμη Laplace να έχει φορά αντίρροπη της ταχύτητας. Δηλαδή να δημιουργείται "αντίδραση" στην αιτία της ΗΕΔ, που είναι η κίνηση της ράβδου.



ΣΧΗΜΑ 2.116

Η μεταβολή του εμβαδού συνεπάγεται μεταβολή της μαγνητικής ροής, άρα εμφάνιση ΗΕΔ από επαγωγή.

Είπαμε ότι ο κανόνας του Lenz αποτελεί συνέπεια της αρχής διατήρησης της ενέργειας. Αυτό μπορούμε να το δείξουμε και στο συγκεκριμένο κύκλωμα. Για να κινείται ο αγωγός ZH με σταθερή ταχύτητα, πρέπει να ασκείται πάνω του και άλλη δύναμη \vec{F} , ομόρροπη της ταχύτητας, της οποίας το μέτρο ισούται με το μέτρο της δύναμης Laplace.

$$F = F_L = B I l$$

Η F εκτελεί έργο επί του σύρματος με ρυθμό (ισχύς)

$$P = \frac{\Delta W_F}{\Delta t} = \frac{F \Delta x}{\Delta t} = Fv = B I l v$$

Η ενέργεια που παρέχει η δύναμη F , μετατρέπεται (με τον ίδιο ρυθμό) σε ηλεκτρική ενέργεια

$$|\mathcal{E}| I = B v l I$$

η οποία, με τη σειρά της μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια που ζεσταίνει το σύρμα, και στη συνέχεια, ένεκα διαφοράς θερμοκρασίας "ρέει" προς το περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας. Δηλαδή έχουμε σωστό ισοζύγιο ενέργειας. Αν το ρεύμα δεν είχε την φορά που προβλέπει ο κανόνας του Lenz η δύναμη Laplace θα ήταν ομόρροπη της ταχύτητας και η \vec{F} αντίρροπη, εφόσον η ταχύτητα θα παρέμεινε σταθερή. Σε αυτή την περίπτωση θα είχαμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και προσφορά ενέργειας στον παράγοντα που ασκεί την \vec{F} , χωρίς αντίστοιχη δαπάνη. Δηλαδή δεν έχουμε σωστό ισοζύγιο ενέργειας. Επειδή η \vec{F} είναι ίση κατά μέτρο με την \vec{F}_L , δεν πρέπει να νομίσει κανείς ότι οι μαγνητικές δυνάμεις παράγουν έργο. Μια βαθύτερη ανάλυση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι ηλεκτρικές δυνάμεις παράγουν το συγκεκριμένο έργο.

ΕΞΗΓΗΣΗ ΤΗΣ ΗΕΔ ΤΟΥ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

Ο νόμος της επαγωγής είναι γενικός και σχετίζεται με τη μεταβολή της μαγνητικής ροής. Αν ένα μέρος του κυκλώματος κινείται, τότε μπορούμε να δείξουμε τον νόμο για το κινούμενο μέρος, με βάση τη μαγνητική δύναμη. Φανταζόμαστε τον αγωγό ZH να κινείται, μέσα στο πεδίο, χωρίς



ΣΧΗΜΑ 2.117

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της ράβδου δέχονται μαγνητική και ηλεκτρική δύναμη.

να υπάρχει το υπόλοιπο κύκλωμα. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού συμμετέχουν στην κίνησή του, άρα δέχονται μαγνητική δύναμη μέτρου

$$F_M = B v e$$

Συνεπώς δημιουργείται συσσώρευση αρνητικών φορτίων στο άκρο Η και περίσσεια θετικού φορτίου στο Ζ. Τα ιόντα του μεταλλικού πλέγματος δέχονται μαγνητική δύναμη, αλλά δεν μετατοπίζονται. Αφού ισορροπίσουν τα φορτία, δημιουργείται στο εσωτερικό του αγωγού ομογενές ηλεκτρικό πεδίο έντασης \vec{E} , οπότε στα ηλεκτρόνια ασκείται και ηλεκτρική δύναμη μέτρου.

$$F_E = E e$$

Αφού έχουμε ισορροπία, οι δυνάμεις \vec{F}_M και \vec{F}_E έχουν αντίθετη φορά και

$$\begin{aligned} F_M &= F_E \\ B v e &= E e \\ B v &= E \end{aligned} \tag{2.61}$$

Αφού δεν έχουμε ρεύμα στον αγωγό ΖΗ, η επαγόμενη ΗΕΔ ισούται με την τάση στα άκρα του

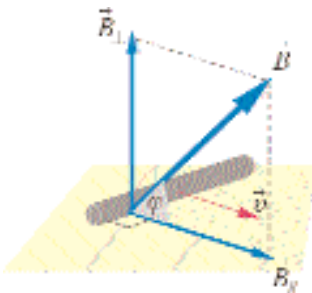
$$\mathcal{E} = V$$

Από τη σχέση μεταξύ έντασης και τάσης στο ομογενές ηλεκτρικό πεδίο έχουμε

$$E = \frac{V}{\ell} = \frac{\mathcal{E}}{\ell}$$

Η σχέση (2.61) γίνεται

$$\begin{aligned} B v &= \frac{\mathcal{E}}{\ell} \\ \mathcal{E} &= B v \ell \end{aligned} \tag{2.62}$$



ΣΧΗΜΑ 2.118

Μπορούμε να αναλύουμε την \vec{B} σε δύο συνιστώσες \vec{B}_\perp , \vec{B}_\parallel και να γράψουμε $\mathcal{E} = B_\perp v = B v \sin \varphi$.

Αν η ταχύτητα του αγωγού σχηματίζει γωνία $\varphi \neq 90^\circ$ με το \vec{B} , η μαγνητική δύναμη στα ηλεκτρόνια είναι

$$F_M = B v e \sin \varphi$$

οπότε

$$\mathcal{E} = B v \ell \sin \varphi \tag{2.63}$$

Παράδειγμα 2-31

Δύο κατακόρυφοι μεταλλικοί αγωγοί Αx, Γy, πολύ μεγάλου μήκους, έχουν αμελητέα αντίσταση και ενώνονται με αγωγό ΑΓ αντίστασης $R_1 = 1,0 \Omega$. Το επίπεδο των αγωγών Αx, Γy είναι κάθετο στις γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου $B = 1,0 \text{ T}$. Μια λεπτή μεταλλική ράβδος μήκους $\ell = 1,0 \text{ m}$, αντίστασης $R_2 = 2,0 \Omega$ και μάζας $m = 0,10 \text{ kg}$ αφήνεται να γλυστρίσει, χωρίς τριβές, έχοντας τα άκρα της συνεχώς σε επαφή με τους αγωγούς Αx, Γy και κατά την πτώση της διατηρείται οριζόντια.

α) Δείξτε ότι η ράβδος αποκτά σταθερή (οριζική) ταχύτητα $v_{ορ}$, η οποία ζητείται

β) Αν η ράβδος διανύει $h = 4,0 \text{ m}$, μέχρι να αποκτήσει την $v_{οθ}$, να βρεθεί η παραγόμενη ενέργεια Joule.

γ) Να βρεθεί η παραγόμενη ενέργεια Joule σε χρόνο $\Delta t = 1,0 \text{ s}$, αφού η ράβδος έχει αποκτήσει την $v_{οθ}$.

δ) Να υπολογισθεί το φορτίο που περνά από μια διατομή της ράβδου, απ' τη στιγμή που αφέθηκε, μέχρι τη στιγμή που απόκτησε την οριακή ταχύτητα ($g = 10 \text{ m/s}^2$).

Απάντηση

α) Η ράβδος, μόλις αφεθεί, αρχίζει να κινείται προς τα κάτω υπό την επίδραση του βάρους της. Η κίνησή της έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη ΗΕΔ.

$$\mathcal{E} = B v \ell$$

Τότε το επαγόμενο ρεύμα είναι

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_2} = \frac{B v \ell}{R_1 + R_2}$$

Η εμφάνιση του επαγόμενου ρεύματος έχει ως συνέπεια την άσκηση δύναμης Laplace στη ράβδο, με φορά προς τα πάνω.

$$F_L = B I \ell = \frac{B^2 \ell^2 v}{R_1 + R_2}$$

Η ράβδος επιταχύνεται (όχι ομαλά), οπότε η \vec{F}_L αυξάνεται. Αυτό θα συνεχιστεί, έως ότου το μέτρο της \vec{F}_L γίνει ίσο με το βάρος της ράβδου. Από τότε και ύστερα η ράβδος αποκτά σταθερή ταχύτητα $v_{οθ}$.

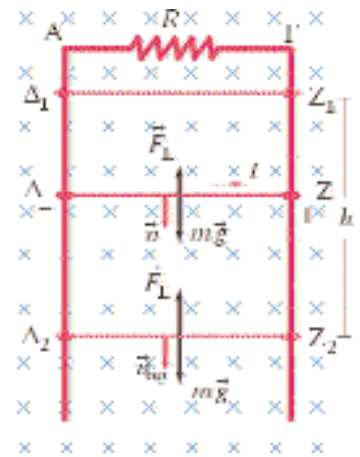
$$\frac{B^2 \ell^2 v_{οθ}}{R_1 + R_2} = mg \quad \text{ή}$$

$$v_{οθ} = \frac{mg(R_1 + R_2)}{B^2 \ell^2} = \frac{0,10 \times 10 \times 3,0}{1,0^2 \times 1,0^2} \text{ m/s} = 3,0 \text{ m/s}$$

β) Καθώς η ράβδος κατέρχεται, μειώνεται η (βαρυτική) δυναμική ενέργειά της και αυξάνεται η κινητική της ενέργεια. Η αύξηση όμως της κινητικής ενέργειας δεν ισοσταθμίζει την απώλεια δυναμικής ενέργειας, δηλαδή έχουμε μείωση της μηχανικής ενέργειας της ράβδου. Αυτή η μείωση γίνεται ηλεκτρική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια γίνεται εσωτερική ενέργεια και ρέει προς το περιβάλλον ως θερμότητα (θερμότητα Joule). Αν Q_1 η θερμότητα Joule μέχρι η ράβδος να αποκτήσει την $v_{οθ}$, έχουμε από την αρχή διατήρησης της ενέργειας.

$$Q_1 = mgh - \frac{1}{2} m v_{οθ}^2 \quad \text{ή}$$

$$Q_1 = \left(0,10 \times 10 \times 4,0 - \frac{1}{2} 0,10 \times 3,0^2 \right) \text{ J} = 3,6 \text{ J}$$



ΣΧΗΜΑ 2.119

Η ράβδος αποκτά οριακή ταχύτητα.

γ) Όταν η ράβδος αποκτήσει την v_{oo} , η απώλεια δυναμικής ενέργειας ισούται με την θερμότητα Joule. Αν σε $\Delta t = 1,0$ s η ράβδος μετατοπιστεί με ταχύτητα v_{oo} κατά h_1 , η θερμότητα Joule θα είναι:

$$Q_2 = mgh_1 = mgv_{oo} \Delta t \quad \text{ή}$$

$$Q_2 = (0,1 \times 10 \times 3,0 \times 1,0) \text{ J} = 3,0 \text{ J}$$

Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι αφού η ράβδος κινείται με v_{oo} το επαγόμενο ρεύμα έχει σταθερή τιμή

$$I_{oo} = \frac{Bv_{oo} \ell}{R_1 + R_2} = 1,0 \text{ A}$$

Οπότε σε $\Delta t = 1,0$ s, από το νόμο του Joule, έχουμε

$$Q_2 = I_{oo}^2 (R_1 + R_2) \Delta t = 3,0 \text{ J}$$

δ) Το ρεύμα I , μέχρι η ράβδος να αποκτήσει την v_{oo} , μεταβάλλεται. Χωρίζουμε το χρονικό διάστημα, που απαιτείται για να αποκτήσει η ράβδος την v_{oo} σε στοιχειώδη χρονικά διαστήματα $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots$. Σε κάθε στοιχειώδες χρονικό διάστημα Δt_i , μπορούμε να θεωρήσουμε το ρεύμα σταθερό, οπότε το αντίστοιχο στοιχειώδες φορτίο, που περνά από μια διατομή της ράβδου, θα είναι

$$\Delta q_i = I \Delta t_i = \frac{Bv\ell}{R_1 + R_2} \Delta t_i$$

Όμως το γινόμενο $v \Delta t_i$ ισούται με την αντίστοιχη μετατόπιση Δx_i της ράβδου, άρα

$$\Delta q_i = \frac{B\ell}{R_1 + R_2} \Delta x_i$$

Το ζητούμενο φορτίο q θα είναι

$$q = \Delta q_1 + \Delta q_2 + \dots \quad \text{ή}$$

$$q = \frac{B\ell}{R_1 + R_2} (\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots) \quad \text{ή}$$

$$q = \frac{B\ell}{R_1 + R_2} h = \left(\frac{1,0 \times 1,0}{3,0} \times 4,0 \right) \text{ C} = \frac{4}{3} \text{ C} = 1,3 \text{ C}$$

Το φορτίο μπορεί να βρεθεί και από το νόμο του Faraday.

$$q = I \Delta t = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_2} \Delta t = \frac{\Delta \Phi}{R_1 + R_2}$$

Όμως η μεταβολή ΔA του εμβαδού του κυκλώματος ΑΓΖΔΑ είναι

$$\Delta A = \ell h$$

οπότε $\Delta \Phi = B \Delta A = B \ell h$, άρα

$$q = \frac{B \ell h}{R_1 + R_2} = \frac{4}{3} \text{ C} = 1,3 \text{ C}$$

ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΗΕΔ ΣΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Έστω ότι το συρμάτινο πλαίσιο ΚΓΔΖΗΑ του σχήματος 2.120 στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από άξονα $x'x$, που περνά από τα μέσα των πλευρών ΔΖ και ΓΗ. Το πλαίσιο βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο \vec{B} και τη στιγμή $t = 0$ είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές. Τη χρονική στιγμή t , το πλαίσιο έχει στραφεί κατά γωνία $\varphi = \omega t$.

Στις πλευρές ΔΖ και ΓΗ δεν επάγεται ΗΕΔ, γιατί αυτές στρέφονται σε επίπεδο παράλληλο στις δυναμικές γραμμές. Η επαγόμενη ΗΕΔ στην πλευρά ΖΗ, τη στιγμή t , είναι

$$\mathcal{E}_{ZH} = Bv (ZH) \sin \varphi$$

ενώ στην ΓΔ είναι $\mathcal{E}_{\Gamma\Delta} = Bv (\Gamma\Delta) \sin (180^\circ - \varphi)$ ή

$$\mathcal{E}_{\Gamma\Delta} = Bv (ZH) \sin \varphi$$

Η ΗΕΔ σε όλο το πλαίσιο είναι

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\Gamma\Delta} + \mathcal{E}_{ZH} \quad \text{ή}$$

$$\mathcal{E} = 2Bv (ZH) \sin \varphi = 2Bv (ZH) \sin \omega t$$

Όμως η ταχύτητα v των σημείων των πλευρών ΓΔ και ΖΗ δίνεται απ' τη σχέση

$$v = \dot{u}R = \dot{u} \frac{(\Delta Z)}{2}$$

Άρα

$$\mathcal{E} = 2B\omega \frac{(\Delta Z)}{2} (ZH) \sin \omega t$$

Όμως το γινόμενο $(\Delta Z) \cdot (ZH)$ ισούται με το εμβαδόν A του πλαισίου, συνεπώς

$$\mathcal{E} = B\omega A \sin \omega t$$

Αυτή είναι και η τάση V_{KA}

$$V_{KA} = B\omega A \sin \omega t$$

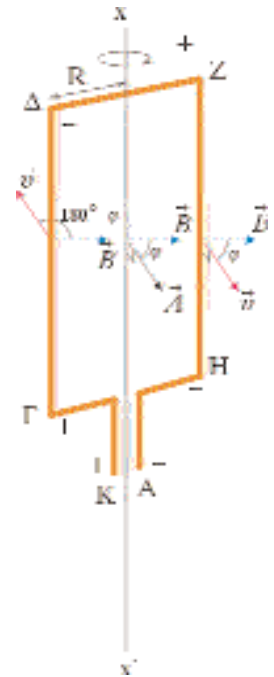
Αν το πλαίσιο αποτελείται από N σπειρές, τότε η τάση στα άκρα του είναι

$$V_{KA} = NB\omega A \sin \omega t \quad (2.64)$$

Η τάση αυτής της μορφής ονομάζεται, όπως θα δούμε παρακάτω, έναλασσομένη τάση.

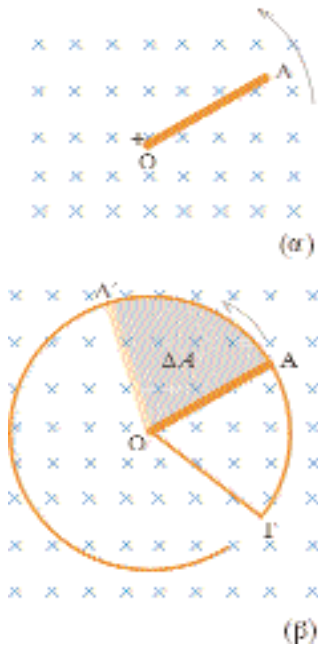
ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΗΕΔ ΣΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗ ΡΑΒΔΟ ΚΑΙ ΣΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΔΙΣΚΟ

Θεωρούμε μεταλλική ράβδο ΟΑ μήκους l , που στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από το άκρο της Ο. Η ράβδος, κατά την



ΣΧΗΜΑ 2.120

Η επαγόμενη ΗΕΔ στο πλαίσιο μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο.



ΣΧΗΜΑ 2.121

Η μαγνητική δύναμη ωθεί τα ηλεκτρόνια στο Α.

κίνησή της "κόβει" κάθετα τις γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου \vec{B} , όπως στο σχήμα 2.121(α). Η μαγνητική δύναμη που ασκείται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια της ράβδου τα συσσωρεύει προς το άκρο Α, οπότε στο Ο δημιουργείται περίσσεια θετικού φορτίου. Επειδή όλα τα σημεία της ράβδου δεν έχουν την ίδια γραμμική ταχύτητα, η μαγνητική δύναμη που ασκείται στα ηλεκτρόνια, δεν είναι παντού η ίδια. Συναντούμε συνεπώς μια δυσκολία στον υπολογισμό της ΗΕΔ με βάση τις ασκούμενες δυνάμεις στα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η άρση αυτής της δυσκολίας επιτυγχάνεται με χρήση μαθηματικών εννοιών, που δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε εδώ, γι' αυτό για τον υπολογισμό της επαγόμενης ΗΕΔ στη ράβδο θα καταφύγουμε στο νόμο του Faraday.

Θεωρούμε ότι το άκρο Α της ράβδου βρίσκεται συνεχώς σε επαφή με ένα κυκλικό σύρμα. Επίσης, το άκρο Ο της ράβδου συνδέεται, μέσω αγωγού, με το άκρο Γ του κυκλικού σύρματος (σχήμα 2.121(β)), οπότε δημιουργείται ένα κύκλωμα ΓΟΑΓ. Σε χρόνο Δt το εμβαδόν του κυκλώματος αυξάνεται κατά ΔA , οπότε και η διερχόμενη μαγνητική ροή αυξάνεται κατά $\Delta \Phi$. Η επαγόμενη ΗΕΔ κατά μέτρο είναι

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = B \frac{\Delta A}{\Delta t}$$

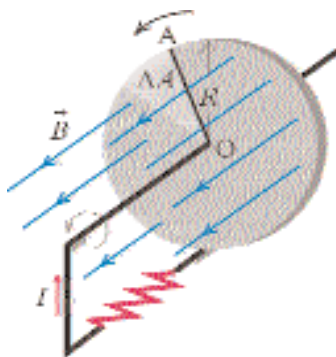
Το πηλίκο $\Delta A / \Delta t$ είναι σταθερό, γιατί η ράβδος στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω . Μπορούμε λοιπόν να θέσουμε $\Delta t = T$, όπου T η περίοδος περιστροφής, και τότε η αύξηση του εμβαδού είναι $\Delta A = \pi \ell^2$, έτσι

$$\mathcal{E} = B \frac{\pi \ell^2}{T}$$

και αφού $T = \frac{1}{f}$ ή $T = \frac{2\pi}{\omega}$, παίρνουμε

$$\mathcal{E} = B \pi f \ell^2 \quad \text{ή} \quad (2.65)$$

$$\mathcal{E} = \frac{B \omega \ell^2}{2} \quad (2.66)$$



ΣΧΗΜΑ 2.122

Ο δίσκος του Faraday ή ομοπολική γεννήτρια.

Έχουμε ένα μεταλλικό δίσκο, ακτίνας R , που στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω , έχοντας το επίπεδό του κάθετο στις γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου \vec{B} . Ο άξονας περιστροφής του δίσκου είναι παράλληλος με τις μαγνητικές γραμμές και διέρχεται από το κέντρο του δίσκου. Επειδή τα ηλεκτρόνια, ένεκα τριβών, συμπαρυσύρονται με το δίσκο κατά την περιστροφή του, μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο δίσκος αποτελείται από ένα μεγάλο πλήθος λεπτών ράβδων, που κάθε μία έχει το ένα άκρο της στο κέντρο Ο του δίσκου και το άλλο στην περιφέρεια του. Σύμφωνα με την σχέση (2.66) η επαγόμενη ΗΕΔ σε κάθε ράβδο είναι κατ' απόλυτη τιμή

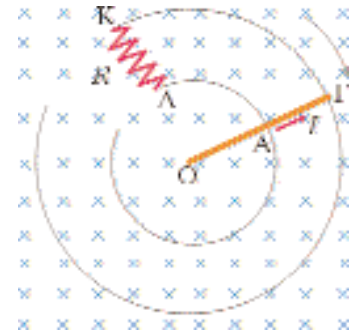
$$\mathcal{E} = \frac{B \omega R^2}{2}$$

Αυτή όμως είναι και η επαγόμενη ΗΕΔ μεταξύ του κέντρου του δίσκου και της περιφέρειάς του. Τη συσκευή μπορούμε να την χρησιμοποιήσουμε ως ηλεκτρική πηγή σε κύκλωμα. Αυτή η συσκευή ονομάζεται δίσκος του Faraday ή ομοπολική γεννήτρια.

Παράδειγμα 2-32

Ομογενής και ισοπαχής ράβδος ΟΓ, μήκους 2,0 m, στρέφεται με σταθερή συχνότητα $f = 2,0 \text{ Hz}$, γύρω από το Ο. Η ράβδος παρουσιάζει γραμμική αντίσταση $2,0 \Omega/\text{m}$ και βρίσκεται συνεχώς σε επαφή με δύο ομόκεντρα κυκλικά σύρματα με κέντρο το Ο (σχ. 2.123). Η ράβδος εφάπτεται στο ένα σύρμα με το άκρο της Γ και στο άλλο με το μέσο της Α. Τα κυκλικά σύρματα δεν παρουσιάζουν αντίσταση και τα άκρα τους Κ, Λ γαφυρώνονται με αντίσταση $R = 1,0 \Omega$.

Να βρεθεί το ρεύμα που διαρρέει την R και η διαφορά δυναμικού $V_{\Gamma\text{O}}$, αν το επίπεδο της διάταξης είναι κάθετο στις γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου $B = 2,0 \text{ T}$.



ΣΧΗΜΑ 2.123

Απάντηση

Στα περιστρεφόμενα τμήματα της ράβδου επάγεται ΗΕΔ, οπότε το ισοδύναμο κύκλωμα της διάταξης φαίνεται στο σχήμα 2.124.

Αφού $(\text{OA}) = (\text{AG}) = 1,0 \text{ m}$, έχουμε ότι $R_1 = R_2 = 2,0 \Omega$

Ακόμα από τη σχέση (2.65) είναι

$$\mathcal{E}_1 = B \pi f (\text{OA})^2 \quad \text{ή}$$

$$\mathcal{E}_1 = 2,0 \text{ T} \times 3,14 \times 2,0 \text{ Hz} \times 1,0^2 \text{ m}^2 \quad \text{ή}$$

$$\mathcal{E}_1 = 13 \text{ V}$$

Το εμβαδόν (ΚΓΑΛΚ) αυξάνεται κατά ΔA σε χρόνο Δt , άρα

$$\mathcal{E}_2 = \frac{|\Delta \Phi|}{\Delta t} = B \frac{\Delta A}{\Delta t}$$

Για $\Delta t = T = \frac{1}{f} = 0,5 \text{ s}$ έχουμε

$$\Delta A = \pi(\text{ΟΓ})^2 - \pi(\text{ΟΑ})^2 \quad \text{ή}$$

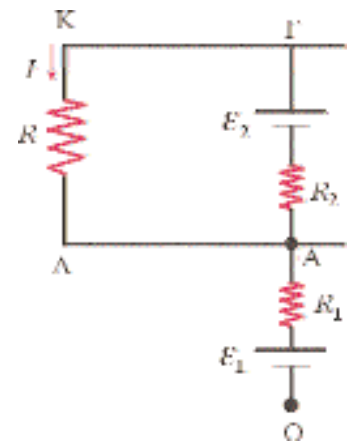
$$\Delta A = 3,14 \times (2,0^2 - 1,0^2) \text{ m}^2 = 9,4 \text{ m}^2$$

Άρα

$$\mathcal{E}_2 = \left(2,0 \times \frac{9,4}{0,50} \right) \text{ V} = 38 \text{ V}$$

Το ζητούμενο ρεύμα απ' το νόμο του Ohm είναι

$$I = \frac{\mathcal{E}_2}{R + R_2} = \frac{38 \text{ V}}{3,0 \Omega} = 13 \text{ A}$$



ΣΧΗΜΑ 2.124

Τέλος έχουμε

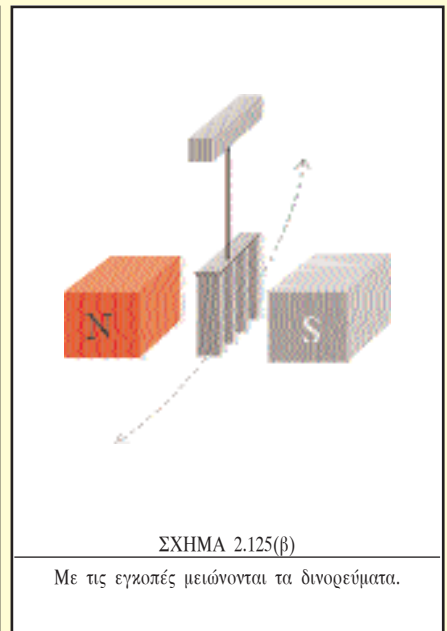
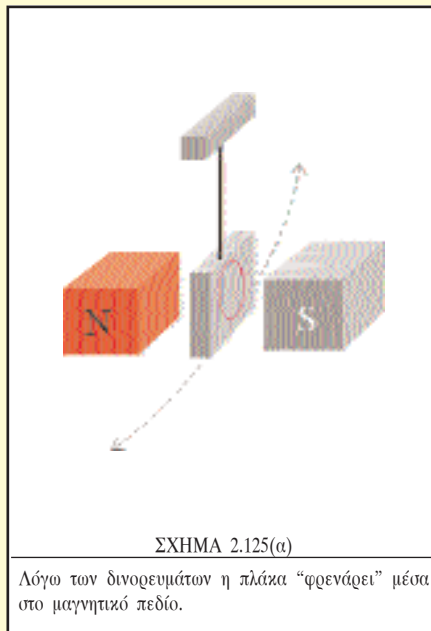
$$V_{ΓΟ} = V_{Γ} - V_{Ο} = V_{Γ} - V_{Α} + V_{Α} - V_{Ο} \quad \text{ή}$$

$$V_{ΓΟ} = \mathcal{E}_2 - IR_2 + \mathcal{E}_1 \quad \text{ή}$$

$$V_{ΓΟ} = 38\text{V} - 13\text{A} \times 2,0\Omega + 13\text{V} = 25\text{V}$$

ΔΙΝΟΡΕΥΜΑΤΑ (Ή ΡΕΥΜΑΤΑ FOUCAULT)

Όταν μεταλλικές πλάκες βρίσκονται ακίνητες σε χρονικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία ή κινούνται μέσα σε ανομοιογενή, χρονικά αμετάβλητα πεδία (ή έχουμε συνδυασμό των ανωτέρω), δημιουργούνται στο εσωτερικό τους δινορεύματα ή ρεύματα Foucault. Αυτά είναι επαγόμενα ρεύματα και τα φορτία μπορεί να κινούνται και σε κλειστές τροχιές στο εσωτερικό των μεταλλικών πλακών, οπότε είναι ισχυρά και θερμαίνουν τις πλάκες. Την ύπαρξη των ρευμάτων Foucault μπορούμε να τη διαπιστώσουμε με πολλούς τρόπους. Παρακάτω θα αναφέρουμε δύο από τους τρόπους αυτούς.



Τοποθετούμε μια μεταλλική πλάκα μέσα σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, οπότε παρατηρούμε θέρμανση της πλάκας. Η θέρμανση οφείλεται στα δινορεύματα, που οδηγούν στο φαινόμενο Joule.

Έχουμε μεταλλική πλάκα, που μπορεί να αιωρείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο [σχ. 2.125(α)]. Αν δεν υπάρχει το μαγνητικό πεδίο, η πλάκα εκτελεί αρκετές αιωρήσεις μέχρι να σταματήσει. Όταν όμως υπάρχει το μαγνητικό πεδίο η πλάκα "φρενάρει". Πράγματι, κατά την είσοδο και την έξοδο της πλάκας από το πεδίο, επάγονται σ' αυτή δινορεύματα, των οποίων η φορά

καθορίζεται από τον κανόνα του Lenz. Τα ρεύματα είναι τέτοια, ώστε οι δυνάμεις που αναπτύσσονται να αντιδρούν τόσο στην είσοδο, όσο και στην έξοδο της πλάκας από το πεδίο.

Τα δινορεύματα σε κάποιες περιπτώσεις, όπως στους μετασχηματιστές, στους κινητήρες κτλ. είναι ανεπιθύμητα και προσπαθούμε να τα μειώσουμε, αποφεύγοντας τα μεταλλικά φύλλα μεγάλου πάχους. Χρησιμοποιούμε λεπτά μεταλλικά φύλλα μονωμένα μεταξύ τους. Η αιωρούμενη πλάκα του σχήματος 2.125(β) ταλαντώνεται πολύ περισσότερο από την πλάκα του σχήματος 2.125(α), γιατί με τις εγκοπές μειώνουμε τα δινορεύματα.

Σε κάποιες άλλες περιπτώσεις, όπως στους επαγωγικούς φούρνους, στο φρενάρισμα των ηλεκτρικών τρένων κ.τ.λ., τα δινορεύματα αξιοποιούνται κατάλληλα.

ΕΠΑΓΟΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

Θεωρούμε ένα συρμάτινο βρόχο μέσα σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο (σχήμα 2.126). Η μαγνητική ροή που περνά απ’ το βρόχο μεταβάλλεται με ρυθμό $\Delta\Phi/\Delta t$, οπότε στο βρόχο επάγεται ΗΕΔ και δημιουργείται επαγόμενο ρεύμα. Η δύναμη, που κινεί τα φορτία κατά μήκος του βρόχου, δεν μπορεί να είναι μαγνητική, όπως στην περίπτωση κινούμενου αγωγού, γιατί ο βρόχος είναι ακίνητος. Οδηγούμαστε λοιπόν στο συμπέρασμα, ότι η δύναμη προέρχεται από ένα επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο παράγεται από το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.



ΣΧΗΜΑ 2.126

Τα φορτία του βρόχου κινούνται υπό την επίδραση δύναμης επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

Θα υπολογίσουμε τώρα το έργο W του πεδίου κατά τη μετακίνηση ενός φορτίου q , κατά μήκος του βρόχου. Χωρίζουμε το βρόχο σε στοιχειώδη τμήματα $\Delta l_1, \Delta l_2, \dots$. Κατά μήκος ενός τέτοιου τμήματος Δl_i θεωρείται σταθερή η παράλληλη προς το Δl_i συνιστώσα $E_{//}$ της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, οπότε το έργο για την μετακίνηση του q πάνω στο Δl_i είναι

$$\Delta W_i = E_{//} q \Delta l_i$$

Για να βρούμε το έργο W , αθροίζουμε τα στοιχειώδη έργα

$$W = \sum E_{//} q \Delta l_i \quad \text{ή} \quad \frac{W}{q} = \sum E_{//} l_i$$

Όμως το πηλίκο W/q παριστάνει, εξ ορισμού, την επαγόμενη ΗΕΔ \mathcal{E}

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Άρα καταλήγουμε στην έκφραση

$$\sum E_{//} \Delta l_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \tag{2.67}$$

η οποία αποτελεί γενικότερη διατύπωση του νόμου της επαγωγής του Faraday.

Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο, που οφείλεται στις μεταβολές της μαγνητικής ροής είναι μη συντηρητικό πεδίο. Αυτό είναι

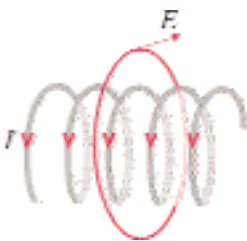
προφανές, γιατί το έργο της δύναμής του σε κλειστή διαδρομή είναι διάφορο του μηδενός.

Τέλος το πεδίο \vec{E} υπάρχει, σύμφωνα με τη γενικότερη διατύπωση του νόμου του Faraday, ανεξάρτητα απ' την ύπαρξη του συρμάτινου βρόχου. Απλώς με το βρόχο έχουμε ροή ρεύματος, άρα πιστοποιούμε την ύπαρξη του πεδίου \vec{E} .

ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΕΠΑΓΟΜΕΝΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ		
	ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ	ΕΠΑΓΟΜΕΝΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ
1.	Συντηρητικό	Μη συντηρητικό
2.	Οι δυναμικές γραμμές αρχίζουν και καταλήγουν σε φορτία ή στο άπειρο	Οι δυναμικές γραμμές δεν αρχίζουν και δεν καταλήγουν κάπου. Σε απλές περιπτώσεις με συμμετρία, που συνήθως εξετάζουμε είναι κλειστές

Παράδειγμα 2-33

Δίνεται ένα σωληνοειδές πηνίο απείρου μήκους, με n σπείρες ανά μονάδα μήκους, που διαρρέεται από μεταβαλλόμενο ρεύμα με σταθερό ρυθμό $\Delta I/\Delta t = \lambda > 0$. Να υπολογισθεί το μέτρο της έντασης του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου, συναρτήσει της απόστασης r από τον άξονα του σωληνοειδούς. Η ακτίνα της διατομής του πηνίου είναι R (σχήμα 2.127).



ΣΧΗΜΑ 2.127

Η φορά της έντασης \vec{E} είναι ίδια με τη φορά του επαγόμενου ρεύματος, που θα δημιουργηθεί, αν στη θέση της δυναμικής γραμμής υπάρχει κυκλικός αγωγός.

Απάντηση

Θεωρούμε ότι μαγνητικό πεδίο $B = \mu_0 nI$ υπάρχει μόνο στο εσωτερικό του πηνίου. Αφού το ρεύμα μεταβάλλεται, θα μεταβάλλεται και το πεδίο B στο εσωτερικό του σωληνοειδούς, συνεπώς δημιουργείται επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου είναι ομόκεντροι κύκλοι, κάθετοι στον άξονα του σωληνοειδούς με το κέντρο τους πάνω σ' αυτόν. Θεωρούμε μια κλειστή καμπύλη γραμμή, που ταυτίζεται με μία δυναμική γραμμή, και εφαρμόζουμε τη σχέση (2.67) (για τα μέτρα)

$$\sum E \Delta \ell = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Λόγω συμμετρίας, η ένταση \vec{E} έχει σταθερή τιμή κατά μήκος της καμπύλης και εφάπτεται σ' αυτή. Επιδιώκοντας να υπολογίσουμε το μέτρο της έντασης E μπορούμε να γράψουμε

$$E \sum \Delta \ell = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{ή} \quad E 2\pi r = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{ή} \quad E = \frac{1}{2\pi r} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \tag{2.68}$$

Για $r \leq R$ ισχύει

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \pi r^2 \frac{\Delta B}{\Delta t} = \pi r^2 \mu_0 n \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

οπότε η (2.68) δίνει

$$E = \frac{r}{2} \mu_0 n \lambda$$

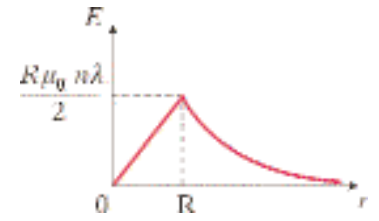
Για $r > R$ ισχύει

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \pi R^2 \frac{\Delta B}{\Delta t} = \pi R^2 \mu_0 n \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

άρα η (2.68) δίνει

$$E = \frac{R^2}{2r} \mu_0 n \lambda$$

Στο σχήμα 2.128 φαίνεται το διάγραμμα της έντασης E , συναρτήσει της απόστασης r .



ΣΧΗΜΑ 2.128

Γραφική παράσταση της έντασης E , συναρτήσει της απόστασης r .

ΑΜΟΙΒΑΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗ

Έχουμε δύο πηνία Π_1, Π_2 το ένα κοντά στο άλλο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.129. Όταν το πηνίο Π_1 τροφοδοτείται με ρεύμα I_1 , δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, του οποίου οι γραμμές περνούν (εν μέρει) και από το πηνίο Π_2 . Τότε λέμε ότι τα πηνία είναι συζευγμένα.

Κάθε μεταβολή στο ρεύμα I_1 του πηνίου Π_1 , συνοδεύεται από δημιουργία ρεύματος στο πηνίο Π_2 . Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί κάθε μεταβολή του ρεύματος του Π_1 ακολουθείται από μεταβολή του μαγνητικού του πεδίου, άρα από μεταβολή και της μαγνητικής ροής που περνά από το Π_2 . Συνεπώς στο πηνίο Π_2 επάγεται ΗΕΔ.

Το φαινόμενο αυτό, της εμφάνισης επαγόμενης ΗΕΔ σε ένα πηνίο Π_2 (δευτερεύον πηνίο), όταν μεταβάλλεται το ρεύμα που διαρρέει κάποιο γειτονικό του πηνίο Π_1 (πρωτεύον πηνίο), ονομάζεται αμοιβαία επαγωγή.

Όταν το πηνίο Π_1 διαρρέεται από ρεύμα I_1 , η ολική ροή που περνά από το Π_2 είναι Φ_2 . Η ροή Φ_2 είναι ανάλογη του πεδίου B , που δημιουργεί το Π_1 , άρα ανάλογη και του ρεύματος I_1 , δηλαδή

$$\Phi_2 = M I_1 \tag{2.69}$$

όπου M ένας συντελεστής αναλογίας.

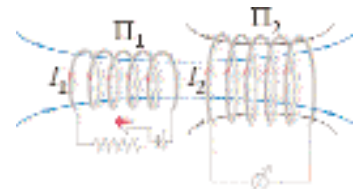
Αν σε χρόνο Δt μεταβληθεί το ρεύμα του πηνίου Π_1 κατά ΔI_1 , η ροή Φ_2 θα μεταβληθεί κατά $\Delta \Phi_2$, οπότε η σχέση (2.69) δίνει

$$\frac{\Delta \Phi_2}{\Delta t} = M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

άρα η επαγόμενη ΗΕΔ στο Π_2 είναι

$$\mathcal{E}_2 = - \frac{\Delta \Phi_2}{\Delta t} = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \tag{2.70}$$

Η επαγόμενη ΗΕΔ στο δευτερεύον πηνίο, κατά το φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής, είναι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής του ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο.



ΣΧΗΜΑ 2.129

Κάθε μεταβολή του ρεύματος I_1 , του πηνίου Π_1 , οδηγεί στην εμφάνιση ρεύματος I_2 στο πηνίο Π_2 .



JOSEPH HENRY
(1797 - 1878)

Αμερικανός φυσικός. Εισήγαγε το πρώτο σύστημα πρόβλεψης καιρού. Τα πρώτα πειράματά του αφορούσαν στον ηλεκτρομαγνητισμό. Ασχολήθηκε με τα φαινόμενα της επαγωγής και βρήκε το νόμο της αυτεπαγωγής, αλλά δεν προέβη αμέσως σε σχετική ανακοίνωση και έτσι επικράτησε να μνημονεύεται ως νόμος του Faraday.



ΣΧΗΜΑ 2.130

Όλες οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου, που δημιουργείται στην κεντρική περιοχή του πηνίου Π₁, διέρχονται από κάθε σπείρα του πηνίου Π₂.

Ο συντελεστής αναλογίας *M* ονομάζεται συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πηνίων, τη σχετική τους θέση και το υλικό που υπάρχει στην περιοχή της διάταξης των πηνίων. Πρέπει να τονίσουμε ότι ο συντελεστής *M* είναι ίδιος και στην περίπτωση που αντιστραφούν οι ρόλοι των πηνίων.

Η μονάδα του συντελεστή αυτεπαγωγής είναι το 1 henry (1H) (Χένρυ)

$$1 \text{ H} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{A}}$$

(Διαστάσεις, $\dim M = L^2 \text{MT}^{-2} \text{A}^{-2}$)

Παράδειγμα 2-34

Δίνεται ένα πηνίο Π₁ μεγάλου μήκους *L* (Σχ. 2.130), με εμβαδό διατομής *A* και *N*₁ σπείρες. Γύρω από την κεντρική περιοχή του Π₁ τυλίγουμε ένα δεύτερο πηνίο Π₂, με *N*₂ σπείρες. Να βρεθεί ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής *M* των δύο πηνίων.

Απάντηση

Έστω ότι το Π₁ διαρρέεται από ρεύμα *I*₁, οπότε το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του είναι

$$B_1 = \mu_0 \frac{N_1}{L} I_1$$

Η διερχόμενη ροή από κάθε σπείρα του Π₂ είναι

$$\Phi_2 = B_1 A = \mu_0 \frac{N_1}{L} I_1 A$$

Πολλαπλασιάζουμε επί *N*₂ και τα δύο μέλη της τελευταίας σχέσης

$$\Phi_2 N_2 = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{L} A I_1$$

Προφανώς, η ολική ροή που διέρχεται από το Π₂ είναι $\Phi_2 N_2$, άρα από την (2.69) προκύπτει

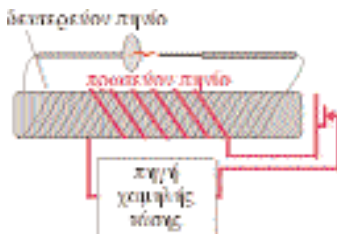
$$M I_1 = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{L} A I_1$$

$$M = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{L} A$$

Αν υποθέσουμε ότι τα πηνία είναι τυλιγμένα σε ράβδο από μαγνητικό υλικό, τότε το 2ο μέλος των ανωτέρω σχέσεων πολλαπλασιάζεται επί ένα παράγοντα μ_r , ο οποίος είναι ή σχετική διαπερατότητα του υλικού. Για σιδηρομαγνητικά υλικά έχει τιμές μέχρι μερικές χιλιάδες.

ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΠΗΝΙΟ

Θεωρούμε δύο πηνία τυλιγμένα γύρω από τον ίδιο σιδηροπυρήνα (Σχ. 2.131). Το πρωτεύον έχει λίγες σπείρες και τροφοδοτείται με διακοπτόμενο ρεύμα, που παρέχει πηγή χαμηλής τάσης (πχ. 12V). Το δευτερεύον έχει πολύ μεγάλο αριθμό σπειρών, οπότε επάγεται σ' αυτό υψηλή τάση, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή σπινθήρων. Η διάταξη ονομάζεται επαγωγικό πηνίο ή πηνίο Ruhmkorff και βρίσκει πολλές εφαρμογές. Ένα είδος επαγωγικού πηνίου είναι και ο πολλαπλασιαστής του αυτοκινήτου.



ΣΧΗΜΑ 2.131

Σχηματική παράσταση του επαγωγικού πηνίου.

ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΗ

Ας παρακολουθήσουμε δύο πειράματα

1ο πείραμα

Κατασκευάζουμε το κύκλωμα του σχήματος 2.132 και, έχοντας κλειστό το διακόπτη Δ, ρυθμίζουμε τον αντιστάτη R, ώστε οι δύο λάμπες Λ₁, Λ₂ να φωτίζουν περίπου εξίσου. Κατόπιν, ανοίγουμε το διακόπτη και, αφού σβήσουν οι λάμπες, τον κλείνουμε ξανά. Παρατηρούμε ότι η λάμπα Λ₂ φωτοβολεί αμέσως, ενώ η φωτοβολία της λάμπας Λ₁ αυξάνεται σταδιακά, μέχρι να σταθεροποιηθεί.

2ο πείραμα

Πραγματοποιούμε το κύκλωμα του σχήματος 2.133 και ρυθμίζουμε τον αντιστάτη R, ώστε η λάμπα Λ να φωτοβολεί ασθενώς. Ανοίγουμε κατόπιν το διακόπτη Δ, οπότε παρατηρούμε έντονη φωτοβολία της λάμπας, για μικρό χρονικό διάστημα.

Στο πρώτο πείραμα η λάμπα Λ₂ φωτοβολεί αμέσως, γιατί το ρεύμα στον κλάδο της παίρνει ακαριαία τη μέγιστη τιμή του. Αυτό όμως δεν συμβαίνει στον κλάδο του πηνίου και της λάμπας Λ₁. Ας δούμε, για ποιο λόγο. Η μεταβολή (αύξηση) του ρεύματος στο πηνίο οδηγεί στη μεταβολή του μαγνητικού του πεδίου B, άρα και της διερχόμενης απ' αυτό μαγνητικής ροής. Συνεπώς, στο πηνίο επάγεται ΗΕΔ, η οποία σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz αντιτίθεται στην αύξηση του ρεύματος.

Στο δεύτερο πείραμα, η διακοπή του ρεύματος στο πηνίο οδηγεί με το ίδιο σκεπτικό και πάλι σε εμφάνιση επαγόμενης ΗΕΔ στο πηνίο, η οποία αντιτίθεται στη μείωση του ρεύματος.

Το φαινόμενο αυτό, κατά το οποίο επάγεται ΗΕΔ σε ένα πηνίο, λόγω της μεταβολής του ρεύματος που διαρρέει το ίδιο το πηνίο, ονομάζεται αυτεπαγωγή.

Όταν ένα πηνίο με N σπείρες διαρρέεται από ρεύμα I, η διερχόμενη μαγνητική ροή, από όλες τις σπείρες, είναι Φ. Η ολική ροή που διέρχεται από το πηνίο είναι ανάλογη του πεδίου B, άρα ανάλογη και του ρεύματος I, δηλαδή

$$\Phi = L I \tag{2.71}$$

όπου L ο συντελεστής αναλογίας, που ονομάζεται **συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου** ή απλά αυτεπαγωγή. Η μονάδα της αυτεπαγωγής L είναι το 1H (έχει τις ίδιες διαστάσεις με το M) και αυτή εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πηνίου και από το υλικό που υπάρχει μέσα στο πηνίο. Παραδείγματος χάρη, για ένα σωληνοειδές πηνίο μεγάλου μήκους ℓ, με N σπείρες, που κάθε μία έχει εμβαδό A, αγνοώντας τα φαινόμενα των άκρων, θα ισχύει

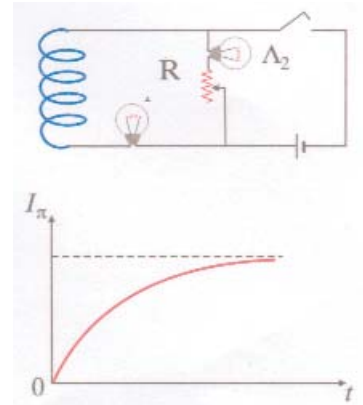
$$\Phi = N \Phi' = L I$$

όπου Φ' η διερχόμενη ροή από κάθε σπείρα και Φ η ολική ροή

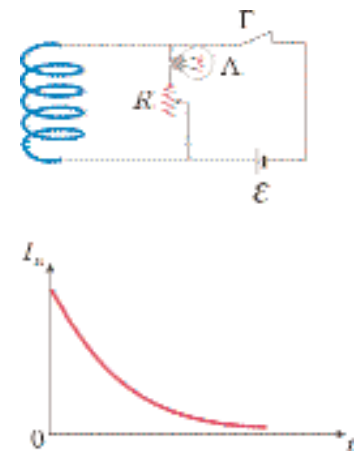
Άρα

$$NBA = LI \quad \text{ή}$$

$$N \mu_0 \frac{N}{\ell} I A = L I \quad \text{ή}$$



ΣΧΗΜΑ 2.132
Αποκατάσταση του ρεύματος σε πηνίο.



ΣΧΗΜΑ 2.133
Διακοπή του ρεύματος σε πηνίο.



ΣΧΗΜΑ 2.134

Για πηνίο χωρίς αντίσταση η τάση στα άκρα του είναι $V_{AB} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

$$L = \mu_0 \frac{N^2 A}{\ell}$$

Αν σε χρόνο Δt μεταβληθεί το ρεύμα κατά ΔI , η ροή Φ θα μεταβληθεί κατά $\Delta \Phi$, άρα η (2.71) δίνει

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Η ΗΕΔ από επαγωγή είναι

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (2.72)$$

Η ΗΕΔ που επάγεται σ' ένα πηνίο, λόγω του φαινομένου της αυτεπαγωγής, είναι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο.

ΕΝΡΓΕΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΗ ΣΤΟ ΠΗΝΙΟ

Στο 2ο πείραμα παρατηρούμε ότι η λάμπα Λ φωτοβολεί έντονα χωρίς να υπάρχει η πηγή στο κύκλωμα. Πού βρέθηκε η απαιτούμενη γι' αυτό ενέργεια; Η απάντηση είναι ότι αυτή η ενέργεια ήταν αποθηκευμένη στο πηνίο και μεταφέρθηκε σ' αυτό από την πηγή. Άρα πηνίο που διαρρέεται από ρεύμα έχει αποθηκευμένη ενέργεια (μαγνητική).

Θα υπολογίσουμε τώρα την ενέργεια U_L που αποθηκεύεται σε πηνίο με αυτεπαγωγή L , όταν διαρρέεται από ρεύμα I_0 .

Σ' ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα Δt , το ρεύμα στο πηνίο αυξάνεται ελάχιστα κατά ΔI . Στο χρόνο Δt , θεωρώντας το ρεύμα I σταθερό, η ενέργεια που μεταφέρεται από την πηγή στο πηνίο είναι

$$\Delta U_L = VI \Delta t$$

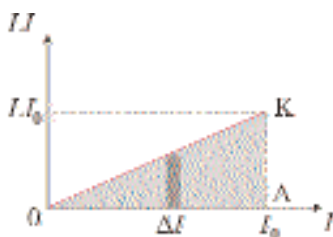
όπου V η τάση στα άκρα του πηνίου. Όμως είναι

$$V = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

οπότε $\Delta U_L = L I \Delta I$

Κατασκευάζουμε το διάγραμμα $LI = f(I)$ (σχήμα 2.135) και παρατηρούμε ότι το ποσό ενέργειας ΔU_L ισούται, ουσιαστικά με το εμβαδόν της έντονα σκιασμένης λωρίδας. Θεωρώντας ότι το ρεύμα μεταβάλλεται από μηδέν ως I_0 , με διαδοχικές στοιχειώδεις αυξήσεις ΔI , οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι το εμβαδόν (ΟΚΛ) ισούται με την ενέργεια U_L που αποθηκεύτηκε στο πηνίο, άρα, από το τρίγωνο ΟΚΛ, βρίσκουμε

$$U_L = \frac{1}{2} L I_0^2$$



ΣΧΗΜΑ 2.135

Το εμβαδόν του τριγώνου ΟΚΛ ισούται με την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο πηνίο.

Παράδειγμα 2-35

Ιδανικό πηνίο με αυτεπαγωγή $L = 0,50$ Η, συνδέεται σε σειρά με αντιστάτη αντίστασης $R = 10 \Omega$ και το σύστημα τροφοδοτείται, μέσω

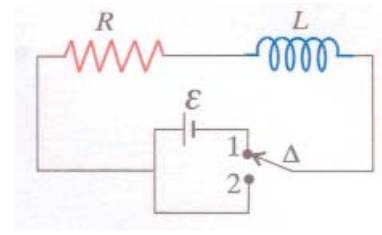
διακόπτη Δ , από πηγή με ΗΕΔ $\mathcal{E} = 12\text{ V}$ και αμελητέα εσωτερική αντίσταση (Σχ. 2.136).

A) Κάποια στιγμή ο διακόπτης κλείνει στη θέση 1. Να βρεθούν, την στιγμή που στο πηνίο έχει αποθηκευτεί το $1/4$ της τελικής ενέργειας, τα μεγέθη:

- i) Ρεύμα
- ii) Ρυθμός μεταβολής του ρεύματος
- iii) Ρυθμός αποθήκευσης ενέργειας στο πηνίο.

B) Αφού σταθεροποιηθεί το ρεύμα στο κύκλωμα (μόνιμο ρεύμα), κλείνουμε το διακόπτη στη θέση 2. Να βρεθούν, τη στιγμή που το πηνίο έχει χάσει τα $8/9$ της μέγιστης ενέργειας του, τα μεγέθη:

- i) Ρεύμα
- ii) Ρυθμός μεταβολής του ρεύματος
- iii) Ρυθμός μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμοδυναμική ενέργεια, στον αντιστάτη.



ΣΧΗΜΑ 2.136

Απάντηση

A) Όπως γνωρίζουμε, το ρεύμα θα αυξηθεί σταδιακά μέχρι που θα αποκτήσει την τελική του τιμή. Σε κάθε χρονική στιγμή ισχύει

$$\mathcal{E} = V_R + V_L$$

όπου V_R , V_L οι τάσεις στα άκρα του αντιστάτη και του πηνίου, δηλαδή

$$V_R = IR$$

$$\text{και } V_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Όταν το ρεύμα σταθεροποιηθεί στην τελική του (μόνιμη) τιμή I_0 , προφανώς, θα είναι $V_L = 0$, άρα $\mathcal{E} = I_0 R$, οπότε

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R} = 1,2\text{ A}$$

Η ενέργεια που αποθηκεύεται τελικά στο πηνίο, είναι

$$U_{L\max} = \frac{1}{2} L I_0^2$$

i) Την στιγμή που έχει αποθηκευτεί στο πηνίο το $1/4$ της τελικής ενέργειας, ισχύει

$$U_L = \frac{1}{4} U_{L\max} \quad \text{ή}$$

$$\frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{4} \frac{1}{2} L I_0^2 \quad \text{ή}$$

$$I = I_0/2 = 0,60\text{ A}$$

ii) Όταν είναι $I = 0,60\text{ A}$, έχουμε

$$V_R = IR = 6,0 \text{ V}$$

οπότε

$$V_L = \mathcal{E} - V_R \quad \text{ή}$$

$$L \frac{\Delta I}{\Delta t} = \mathcal{E} - V_R \quad \text{ή}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\mathcal{E} - V_R}{L} = 12 \frac{\text{A}}{\text{s}}$$

iii) Τη στιγμή που είναι $I = 0,60 \text{ A}$, η πηγή δίνει ενέργεια στο κύκλωμα με ρυθμό

$$P_\varepsilon = \mathcal{E} I = 7,2 \text{ W}$$

Την ίδια στιγμή, ο ρυθμός μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμοδυναμική ενέργεια είναι

$$P_R = I^2 R = 3,6 \text{ W}$$

Από την αρχή διατήρησης της ενέργειας, προκύπτει ότι ο ρυθμός αποθήκευσης ενέργειας στο πηνίο εκείνη τη στιγμή είναι

$$P_L = P_\varepsilon - P_R = 3,6 \text{ W}$$

B) Όταν κλείσει διακόπτης απ' τη θέση 1 στη θέση 2, το ρεύμα μειώνεται σταδιακά από την τιμή $I_0 = 1,2 \text{ A}$ μέχρι την τιμή μηδέν.

i) Την στιγμή κατά την οποία το πηνίο έχει χάσει τα $8/9$ της μέγιστης ενέργειας του, ισχύει.

$$U_L = \frac{1}{9} U_{L_{\max}} \quad \text{ή}$$

$$\frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{9} \frac{1}{2} L I_0^2 \quad \text{ή}$$

$$I = \frac{1}{3} I_0 = 0,40 \text{ A}$$

ii) Κατά τη διακοπή του ρεύματος σε κάθε στιγμή ισχύει

$$V_R + V_L = 0 \quad \text{ή}$$

$$L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -IR \quad \text{ή}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = -\frac{IR}{L}$$

Για $I = 0,40 \text{ A}$ έχουμε

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = -8,0 \frac{\text{A}}{\text{s}}$$

iii) Ο ζητούμενος ρυθμός είναι

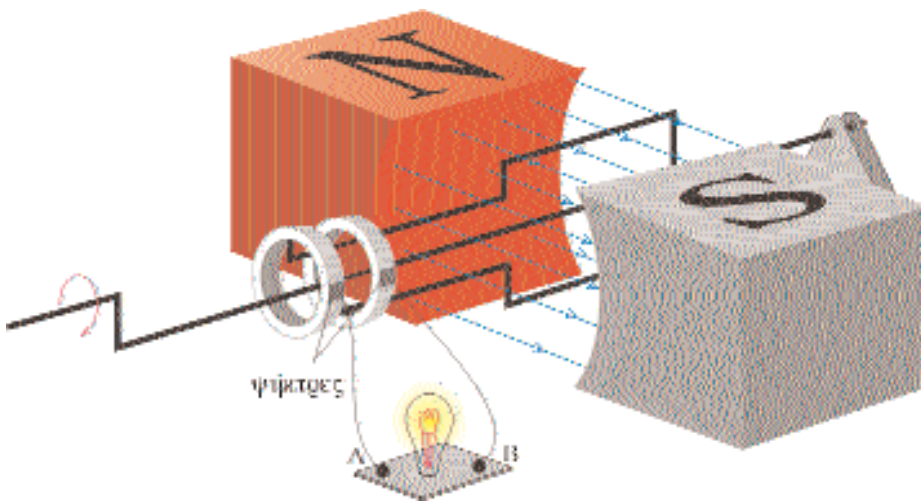
$$P_R = I^2 R = 1,6 \text{ W}$$

Πρέπει να τονίσουμε ότι, από την αρχή διατήρησης της ενέργειας, θα είναι $1,6 \text{ W}$ και ο ρυθμός με τον οποίο χάνει ενέργεια το πηνίο.

ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΟΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ - ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

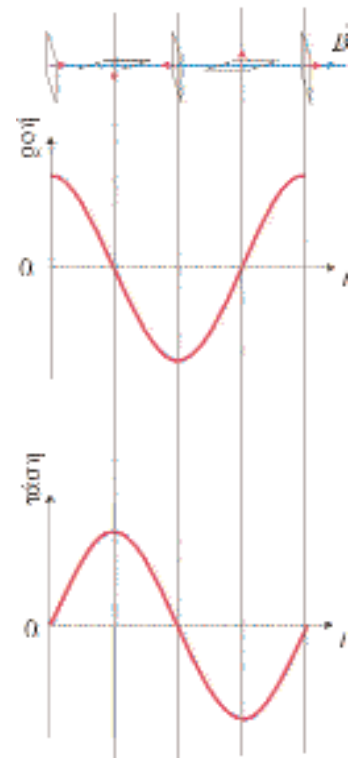
ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Είδαμε ότι η τάση στα άκρα ενός πλαισίου, που στρέφεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, δίνεται από την σχέση (2.64). Αυτή η τάση, επειδή εναλλάσσει περιοδικά τιμή και πολικότητα, ονομάζεται εναλλασσόμενη τάση και μπορεί να ληφθεί στην έξοδο AB της διάταξης του σχήματος 2.137(α). Τα άκρα του πλαισίου εφάπτονται σε δύο



ΣΧΗΜΑ 2.137(α)

Αρχή γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος.



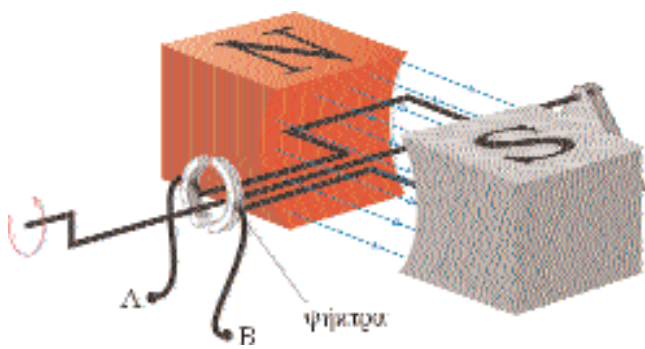
ΣΧΗΜΑ 2.137(β)

Διάγραμμα της διερχόμενης μαγνητικής ροής από το πλαίσιο και της τάσης στα άκρα του, συναρτήσει του χρόνου.

δακτυλίους, οι οποίοι μπορούν να στρέφονται μαζί με το πλαίσιο. Πάνω στους δακτυλίους ολισθαίνουν δύο σταθερές επαφές που ονομάζονται ψήκτρες, και είναι συνδεδεμένες στα άκρα εξόδου A, B. Το πλαίσιο μπορεί να αποτελείται από N σπείρες, αντί για μια που φαίνεται στο σχήμα 2.137(α).

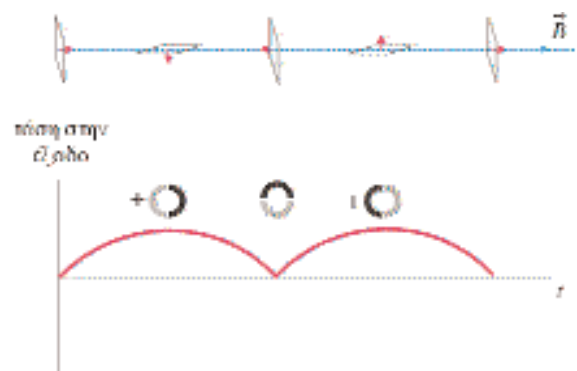
Η διάταξη του σχήματος 2.137(α) δείχνει την αρχή μιας γεννήτριας εναλλασσομένου ρεύματος ac, που λέγεται και εναλλακτήρας. Τα κινούμενα μέρη αποτελούν τον ρότορα και τα ακίνητα του στάτορα.

Αν θέλουμε η τάση να μην αλλάζει πρόσημο, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη διάταξη του σχήματος 2.138(α), που δείχνει την αρχή



ΣΧΗΜΑ 2.138(α)

Αρχή γεννήτριας συνεχούς ρεύματος.

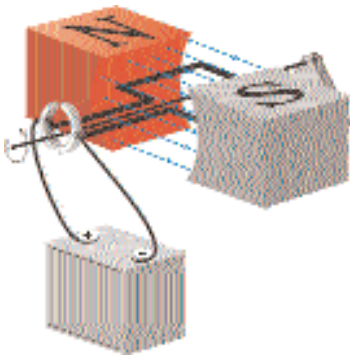


ΣΧΗΜΑ 2.138(β)

Η τάση στην έξοδο, συναρτήσει του χρόνου.

της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος. Σ' αυτή τη διάταξη χρησιμοποιούνται δύο ημιδακτύλιοι και δύο ψήκτρας (εναλλάκτης). Οι δύο ημιδακτύλιοι είναι συνδεδεμένοι με τα δύο άκρα του πλαισίου και στρέφονται μαζί με το πλαίσιο. Η κάθε ψήκτρα έρχεται σε επαφή και με τους δύο δακτυλίους διαδοχικά μια φορά κάθε μισή περιστροφή. Με αυτό τον τρόπο, πετυχαίνουμε να μην αλλάζει η πολικότητα της τάσης στην έξοδο. Για να μη έχουμε μεγάλες διακυμάνσεις στην τάση (άρα και στο ρεύμα), οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος που κυκλοφορούν στο εμπόριο, έχουν πολλά πλαίσια, των οποίων τα διαδοχικά επίπεδα σχηματίζουν ίσες γωνίες και ο δακτύλιος είναι χωρισμένος σε $2N$ ίσα τμήματα, αν N είναι το πλήθος των πλαισίων (πηνίων).

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ



ΣΧΗΜΑ 2.139

Αρχή λειτουργίας κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι διάταξη που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Δηλαδή εκτελεί την αντίστροφη λειτουργία από την γεννήτρια (σχήμα 2.139). Τροφοδοτούμε το πλαίσιο από πηγή συνεχούς τάσης οπότε αυτό στρέφεται ένεκα των δυνάμεων Laplace που ασκούνται πάνω του (σχήμα 2.86). Είναι προφανές ότι σε κάθε μισή περιστροφή πρέπει να αλλάζει φορά το ρεύμα στο πλαίσιο, ώστε η ροπή στρέψης να έχει σταθερή φορά. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διάταξη του εναλλάκτη (ημιδακτύλιοι και ψήκτρας). Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος dc . Κατά την περιστροφή του πλαισίου επάγεται ΗΕΔ, \mathcal{E}' , με πολικότητα αντίθετη από την τάση V , που εφαρμόζεται στα άκρα του πλαισίου, όπως απαιτεί ο κανόνας του Lenz. Η \mathcal{E}' ονομάζεται αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (αντι-ΗΕΔ) του κινητήρα. Αν R η αντίσταση του πλαισίου (πηνίου) και V η τάση στα άκρα του θα ισχύει

$$\begin{aligned} V - \mathcal{E}' &= IR & \text{ή} \\ V &= \mathcal{E}' + IR \end{aligned} \quad (2.73)$$

Τη στιγμή της εκκίνησης η ταχύτητα είναι μηδέν, οπότε $\mathcal{E}' = 0$, άρα

$$I_{\text{εκ}} = \frac{V}{R}$$

Από τη σχέση (2.73) έχουμε

$$VI = \mathcal{E}'I + I^2R$$

Ο παράγοντας (VI) είναι η ισχύς P , που περιέχεται στον κινητήρα και ο παράγοντας (I^2R) είναι ο ρυθμός απώλειας ενέργειας Joule, συνεπώς, από την αρχή διατήρησης της ενέργειας, ο παράγοντας $(\mathcal{E}'I)$ θα είναι η μηχανική ισχύς που παρέχει ο κινητήρας.

$$P_{\text{μηχ}} = \mathcal{E}'I$$

Παράδειγμα 2-36

Πηγή με ΗΕΔ $\mathcal{E} = 150 \text{ V}$ τροφοδοτεί κινητήρα. Όταν κινητήρας εμποδίζεται να περιστραφεί, το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα είναι $I_1 = 10 \text{ A}$, ενώ, όταν ο κινητήρας στρέφεται με τη μέγιστη ταχύτητά του, το ρεύμα είναι $I_2 = 4,0 \text{ A}$. Να βρεθούν

- α) Η (ωμική) αντίσταση R του κυκλώματος
- β) Η μηχανική ισχύς, $P_{μηχ}$, που παρέχει ο κινητήρας, όταν στρέφεται με την μέγιστη ταχύτητά του, καθώς και η αντι-ΗΕΔ.
- γ) Η απόδοση της διάταξης.

Απάντηση

α) Όταν ο κινητήρας εμποδίζεται να περιστραφεί, ισχύει

$$\mathcal{E} = I_1 R \quad \text{ή} \quad R = \frac{\mathcal{E}}{I_1} = 15 \, \Omega$$

β) Η ισχύς της πηγής, όταν ο κινητήρας στρέφεται, είναι

$$P_{\mathcal{E}} = \mathcal{E} I_2 = 600 \, \text{W}$$

Η ισχύς που καταναλώνεται στην R , είναι

$$P_R = I_2^2 R = 240 \, \text{W}$$

οπότε από την αρχή διατήρησης της ενέργειας έχουμε

$$P_{μηχ} = P_{\mathcal{E}} - P_R = 360 \, \text{W}$$

Για την αντι-ΗΕΔ έχουμε

$$P_{μηχ} = \mathcal{E}' I_2 \quad \text{ή} \quad \mathcal{E}' = \frac{P_{μηχ}}{I_2} = 90 \, \text{V}$$

γ) Η απόδοση ισούται με την ωφέλιμη προς τη δαπανώμενη ισχύ, δηλαδή

$$\alpha = \frac{P_{\mu}}{P_{\mathcal{E}}} = \frac{360}{600} = 0,60 \quad \text{ή} \quad \alpha = 0,60 \times 100 \% = 60 \%$$

ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ - ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ (ac ή AC)

ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ

Η τάση που παίρνουμε από τον εναλλακτήρα (σχέση 2.64) εναλλάσσει περιοδικά τιμή και πολικότητα (είναι αρμονική με το χρόνο), γι' αυτό ονομάζεται εναλλασσόμενη τάση.

Αν θέσουμε στη σχέση (2.64)

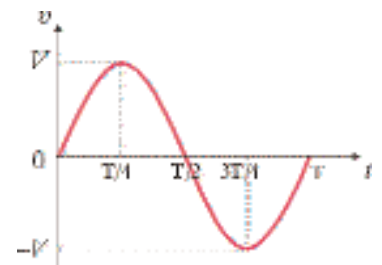
$$V = NB\omega A \tag{2.74}$$

παίρνουμε τη στιγμιαία τιμή v της εναλλασσόμενης τάσης

$$v = V \sin \omega t \tag{2.75}$$

Η μέγιστη τιμή της τάσης V ονομάζεται πλάτος τάσης. Το μέγεθος ω ονομάζεται κυκλική (ή γωνιακή) συχνότητα και ισούται με

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

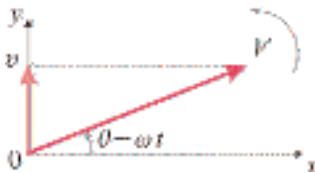


ΣΧΗΜΑ 2.140
Εναλλασσόμενη τάση.

T είναι η περίοδος της εναλλασσόμενης τάσης (δηλαδή ο απαιτούμενος χρόνος για μια πλήρη εναλλαγή της) και f η συχνότητα, (δηλαδή ο αριθμός των εναλλαγών στη μονάδα του χρόνου), ισχύει

$$f = \frac{1}{T}$$

Το όρισμα του ημιτόνου, εδώ το (ωt) , ονομάζεται **φάση της τάσης**. Αν είναι $v = V \sin(\omega t + \varphi)$, ονομάζουμε φάση το $(\omega t + \varphi)$. Το φ ονομάζεται αρχική φάση, δηλαδή είναι η φάση για $t = 0$.



ΣΧΗΜΑ 2.141

Παράσταση της εναλλασσόμενης τάσης με περιστρεφόμενο διάνυσμα.

Η εναλλασσόμενη τάση, όπως και άλλα μεγέθη που μεταβάλλονται αρμονικά με το χρόνο, μπορεί να παρασταθεί και ως εξής. Θεωρούμε σύστημα αξόνων xOy και ένα διάνυσμα \vec{V} , (λέγεται **φάσορας**, *phasor*, ή διάνυσμα τάσης), όπως στο σχήμα 2.141, με μέτρο όσο το πλάτος της τάσης, το οποίο στρέφεται αντίθετα απ' τους δείχτες του ρολογιού με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω . Το διάγραμμα λέγεται φασορικό διάγραμμα ή διανυσματική ενός φάσορα. Έστω ότι την στιγμή $t = 0$ το διάνυσμα V βρίσκεται πάνω στον ημιάξονα Ox , οπότε μέχρι τη στιγμή t , έχει διαγράψει γωνία $\theta = \omega t$. Η (βαθμωτή) προβολή του διανύσματος V πάνω στον άξονα y είναι το μέγεθος v

$$v = V \sin \omega t$$

δηλαδή ισούται με τη στιγμιαία τιμή της τάσης.

Ισοδύναμος τρόπος για την περιγραφή της εναλλασσόμενης τάσης είναι με τη χρήση συνημιτόνου στη θέση του ημιτόνου, δηλαδή $v = V \cos \omega t$, αρκεί να υπάρχει συνέπεια στο συμβολισμό. Σ' αυτή την περίπτωση, η στιγμιαία τιμή της τάσης παριστάνεται με την προβολή του διανύσματος \vec{V} (φάσορα) στον οριζόντιο άξονα.

ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ

Αν εφαρμόσουμε εναλλασσόμενη τάση $v = V \sin \omega t$ (με αρχική φάση $\varphi = 0$) στα άκρα αντιστάτη με αντίσταση R , αυτός θα διαρρέεται από ρεύμα που δε θα έχει σταθερή φορά (σχ. 2.143). Το ρεύμα σύμφωνα με το νόμο του Ohm, είναι

$$i = \frac{v}{R} = \frac{V \sin \omega t}{R}$$

Η μέγιστη τιμή I του ρεύματος i είναι

$$I = \frac{V}{R}$$

και ονομάζεται πλάτος του ρεύματος, άρα

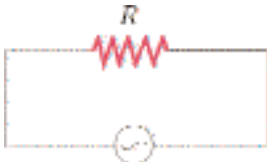
$$i = I \sin \omega t \tag{2.76}$$

Αυτό το ρεύμα που μεταβάλλεται αρμονικά με το χρόνο ονομάζεται **εναλλασσόμενο ρεύμα (ac)**. Παρατηρούμε ότι η τάση και το ρεύμα έχουν την ίδια φάση. Αυτό σημαίνει ότι ταυτόχρονα μηδενίζονται, μεγιστοποιούνται ή ελαχιστοποιούνται.



ΣΧΗΜΑ 2.142

Σύμβολο πηγής εναλλασσόμενης τάσης.



ΣΧΗΜΑ 2.143

Τροφοδοσία αντιστάτη με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Συμπέρασμα:

Το εναλλασσόμενο ρεύμα που διαρρέει έναν αντιστάτη έχει την ίδια φάση με την εναλλασσόμενη τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του. Δηλαδή, αν η σχέση για τη στιγμιαία τάση είναι

$$v = V \sin \omega t$$

η σχέση για το στιγμιαίο ρεύμα είναι

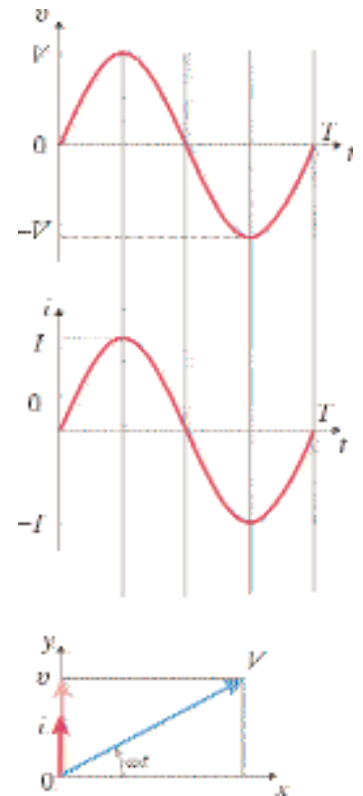
$$i = I \sin \omega t$$

Τέλος, από τον νόμο του Ohm προκύπτει ότι η αντίσταση R του αντιστάτη ισούται με το λόγο των πλατών τάσης-έντασης

$$R = \frac{V}{I}$$

Αν στα άκρα του αντιστάτη εφαρμόσουμε τάση $v = V \sin (\omega t + \varphi)$, το ρεύμα είναι $i = I \sin (\omega t + \varphi)$

Τα εναλλασσόμενα μεγέθη τάση και ρεύμα και τα αντίστοιχα κυκλώματα, χαρακτηρίζονται διεθνώς με το σύμβολο ac ή AC (alternating current).



ΣΧΗΜΑ 2.144

Η τάση και το ρεύμα είναι συμφασικά.

Παράδειγμα 2-37

Εναλλασσόμενη τάση

$$v = 120 \sin 100 \pi t \text{ [} v \text{ σε V και } t \text{ σε s]}$$

εφαρμόζεται στα άκρα αντιστάτη, με αντίσταση $R = 60 \Omega$. Να βρεθούν

- α) Η συχνότητα και η περίοδος της τάσης.
- β) Το στιγμιαίο ρεύμα, ως προς το χρόνο
- γ) Η τιμή της τάσης την στιγμή $t = 1/600 \text{ s}$
- δ) Οι χρονικές στιγμές που το ρεύμα είναι $1,0 \text{ A}$

Απάντηση

α) Από τη δοσμένη σχέση της στιγμιαίας τάσης και την γενική $v = V \sin \omega t$ προκύπτουν

$$V = 120 \text{ V} \quad \text{και} \quad \omega = 100 \pi \text{ rad/s}$$

Αλλά $\omega = 2 \pi f$ ή $f = \frac{\omega}{2 \pi} = 50 \text{ Hz}$

Επίσης

$$T = \frac{1}{f} = 0,02 \text{ s}$$

β) Το πλάτος του ρεύματος είναι

$$I = \frac{V}{R} = 2,0 \text{ A}$$

και αυτό έχει την ίδια φάση με την τάση, άρα $i = I \sin \omega t$ ή

$$i = 2 \sin 100 \pi t \text{ [} i \text{ σε A, } t \text{ σε s]}$$

γ) Τη στιγμή $t = 1/600 \text{ s}$ έχουμε

$$v = \left(120 \sin 100\pi \frac{t}{600} \right) \text{ V} \quad \text{ή}$$

$$v = \left(120 \sin \frac{\pi}{6} \right) \text{ V} \quad \text{ή}$$

$$v = 60 \text{ V}$$

δ) Θέτουμε $i = 1,0 \text{ A}$ στην εξίσωση της στιγμιαίας έντασης του ρεύματος

$$1,0 = 2,0 \sin 100 \pi t \quad \text{ή}$$

$$\sin 100\pi t = \frac{1}{2} = \sin \frac{\pi}{6}$$

άρα

$$100 \pi t = 2k_1\pi + \frac{\pi}{6} \quad \text{ή}$$

$$100 \pi t = 2k_2\pi + \pi - \frac{\pi}{6}$$

$$t = \frac{12k_1 + 1}{600} \text{ s}$$

$$t = \frac{12k_2 + 5}{600} \text{ s}$$

όπου $k_1 = 0, 1, 2 \dots$ και $k_2 = 0, 1, 2, 3 \dots$

Έτσι για $k_1 = 0$ είναι $t = \frac{1}{600} \text{ s}$

για $k_1 = 1$ είναι $t = \frac{13}{600} \text{ s}$

για $k_1 = 2$ είναι $t = \frac{25}{600} \text{ s}$ κ.λπ.

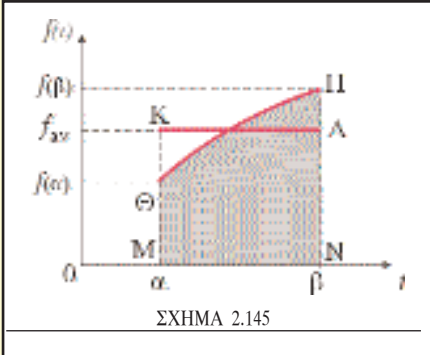
ενώ για $k_2 = 0$ είναι $t = \frac{5}{600} \text{ s}$

για $k_2 = 1$ είναι $t = \frac{17}{600} \text{ s}$

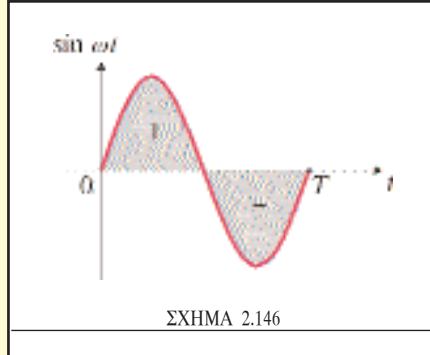
για $k_2 = 3$ είναι $t = \frac{29}{600} \text{ s}$ κ.λπ.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑ

Έστω συνάρτηση $f(t)$ ορισμένη στο διάστημα $[α, β]$, της οποίας το διάγραμμα είναι η καμπύλη ΘΗ στο σχήμα 2.145. Θεωρούμε μια σταθερή συνάρτηση με τιμή f_{av} στο διάστημα $[α, β]$, το



ΣΧΗΜΑ 2.145



ΣΧΗΜΑ 2.146

διάγραμμα της οποίας είναι το ευθύγραμμο τμήμα ΚΛ. Εάν το εμβαδόν του ορθογωνίου (ΚΛΝΜ) ισούται με το σκιασμένο εμβαδόν, η f_{av} ονομάζεται μέση τιμή της $f(t)$, στο διάστημα $[α, β]$. Ο δείκτης (**av**) δηλώνει μέση τιμή και είναι συγκοπή της Αγγλικής λέξης **average**. Ακόμη, αν στο ίδιο διάστημα $[α,β]$ έχουμε τις συναρτήσεις $g(t) = f(t) + C$ και $y(t) = f(t)K$ με C, K σταθερές, θα ισχύει $g_{av} = f_{av} + C$ και $y_{av} = f_{av}K$

Η μέση τιμή του $\sin \omega t$ ή $\sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right)$ σε μια περίοδο ή γενικά σε ακέραιο αριθμό περιόδων είναι μηδέν. (Το “θετικό” εμβαδόν είναι ίσο με το “αρνητικό” εμβαδόν σχ. 2.146). Έχουμε δηλαδή $(\sin \omega t)_{av} = 0$

Παρομοίως μπορούμε να δείξουμε ότι $(\cos \omega t)_{av} = 0$

Προφανώς θα είναι μηδέν η μέση τιμή του συνημιτόνου ή του ημιτόνου, οποιουδήποτε ακέραιου πολλαπλασίου των παραπάνω τόξων, θα είναι π.χ.

$$[\sin(2\omega t)]_{av} = 0 \quad \text{και} \quad [\cos(2\omega t)]_{av} = 0$$

Θα δείξουμε τώρα ότι η μέση τιμή του $\sin^2(\omega t)$ είναι $1/2$.
Ισχύει

$$\sin^2(\omega t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\omega t)$$

οπότε

$$[\sin^2(\omega t)]_{av} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} [\cos 2(\omega t)]_{av} \quad \text{άρα} \quad [\sin^2(\omega t)]_{av} = \frac{1}{2}$$

Επειδή $\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t) = 1$, εύκολα βγαίνει ότι ισχύει και

$$[\cos^2 \omega t]_{av} = \frac{1}{2}$$

ΕΝΕΡΓΟΣ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (rms ή εν)

Η μέση τιμή του εναλλασσομένου ρεύματος σε μια περίοδο (ή σε ακέραιο αριθμό περιόδων) προφανώς είναι μηδέν. Μια άλλη μέση τιμή που θα μας απασχολήσει, είναι η ρίζα της μέσης τιμής του τετραγώνου του

εναλλασσομένου ρεύματος $\sqrt{(i^2)_{av}}$. Αυτή ονομάζεται **ενεργός τιμή του εναλλασσομένου ρεύματος** και συμβολίζεται με I_{rms} (root mean square) ή συνοπτικά I_r ή I_{ev} . Ας δούμε τη σημασία της.

Γνωρίζουμε ότι η ηλεκτρική ισχύς που καταναλίσκεται σε έναν αντιστάτη, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο η ηλεκτρική ενέργεια μετασχηματίζεται σε εσωτερική (θερμοδυναμική) ενέργεια, δίνεται απ' τη σχέση

$$P = i^2 R$$

Αφού το εναλλασσόμενο ρεύμα μεταβάλλεται με το χρόνο, θα μεταβάλλεται και η ισχύς P . Έχουμε για την μέση τιμή της ισχύος (P_{av} ή \bar{P})

$$P_{av} = (i^2)_{av} R = I_r^2 R \quad (2.17)$$

Μπορούμε, συνεπώς, να πούμε ότι **η ενεργός τιμή του εναλλασσομένου ρεύματος ισούται με την τιμή του σταθερού εκείνου ρεύματος, το οποίο, όταν διαρρέει τον ίδιο αντιστάτη που διαρρέει το εναλλασσόμενο ρεύμα και στον ίδιο χρόνο t , παρέχει την ίδια ενέργεια Joule.**

$$Q = I_r^2 R t$$

Θεωρητικά, ο χρόνος t πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της περιόδου, αφού την μέση τιμή $(i^2)_{av}$ την ορίζουμε σε μία περίοδο. Όμως η περίοδος του εναλλασσομένου ρεύματος είναι πολύ μικρή (στο δίκτυο της ΔΕΗ είναι $f = 50 \text{ Hz}$ και $T = 0,020 \text{ s}$), άρα κάθε χρονικό διάστημα, στο οποίο αναφερόμαστε για πρακτικές εφαρμογές, είναι πολύ μεγαλύτερο από την περίοδο, οπότε θεωρείται ακέραιο πολλαπλάσιό της.

Έχουμε:

$$I_r = \sqrt{(i^2)_{av}} = \sqrt{(I^2 \sin^2 \omega t)_{av}} \quad \eta$$

$$I_r = I \sqrt{(\sin^2 \omega t)_{av}}$$

Όμως $(\sin^2 \omega t)_{av} = \frac{1}{2}$ οπότε

$$I_r = \frac{I}{\sqrt{2}} = 0,707 I \quad (2.78)$$

Κατ' αναλογία ορίζεται η ενεργός τιμή της τάσης V_r . Η ενεργός τιμή της εναλλασσόμενης τάσης ισούται με την τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής του τετραγώνου της και ισχύει

$$V_r = \frac{V_0}{\sqrt{2}} = 0,707 V$$

Όταν εφαρμόζουμε εναλλασσόμενη τάση στα άκρα ενός αντιστάτη, αυτός διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα και, όπως δείξαμε, για τα πλάτη ισχύει

$$V = IR \quad \text{ή} \quad \frac{V}{\sqrt{2}} = \frac{I}{\sqrt{2}}R$$

άρα

$$V_r = I_r R \tag{2.79}$$

Μπορούμε συνεπώς να πούμε ότι η ενεργός τιμή μιας εναλλασσόμενης τάσης είναι η σταθερή εκείνη τάση, που όταν εφαρμοστεί στα άκρα ενός αντιστάτη, αυτός θα διαρρέεται από σταθερό ρεύμα με τιμή ίση με την ενεργό τιμή του εναλλασσόμενου ρεύματος, που θα διαρρέει τον ίδιο αντιστάτη, εφόσον στα άκρα του εφαρμοστεί η εναλλασσόμενη τάση.

Από τις σχέσεις (2.77) και (2.79) έχουμε ότι η μέση ισχύς που καταναλώνεται σε αντιστάτη, που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα είναι

$$P_{av} = I_r^2 R = V_r I_r$$

Στα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ac) οι τάσεις και τα ρεύματα αναφέρονται με τις ενεργές τους τιμές. Όταν λέμε π.χ. ότι η τάση τροφοδοσίας των οικιών είναι 220 V, εννοούμε ότι η ενεργός τιμή της είναι 220 V. Επίσης, τα βολτόμετρα και τα αμπερόμετρα ac δείχνουν ενεργές τιμές.

Στην ηλεκτροτεχνία ο συμβολισμός που προτιμάται για το πλάτος του ρεύματος είναι \hat{i} και για την ενεργό τιμή I . Θα μπορούσαμε επίσης να χρησιμοποιούμε για το πλάτος το σύμβολο I_m και για την ενεργό τιμή το I .

ΙΔΑΝΙΚΟ ΠΗΝΙΟ ΣΕ ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Θεωρούμε ιδανικό πηνίο (πηνίο στο οποίο δεν έχουμε απώλειες ενέργειας) με αυτεπαγωγή L , που τροφοδοτείται από εναλλασσόμενη τάση

$$v = V \sin \omega t$$

Η πτώση τάσης v είναι

$$v = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Από τις δύο παραπάνω σχέσεις αποδεικνύεται ότι το ρεύμα i , που διαρρέει το πηνίο, δίνεται απ' τη σχέση

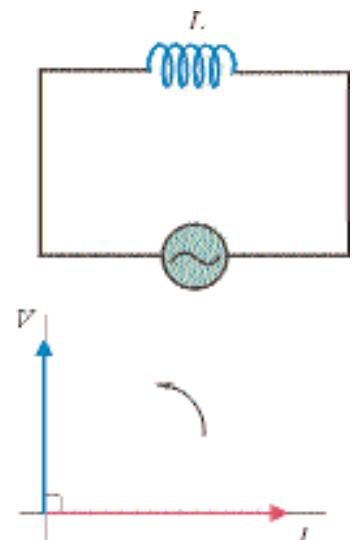
$$i = \frac{V}{\omega L} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

Το πλάτος του ρεύματος είναι

$$I = \frac{V}{\omega L}$$

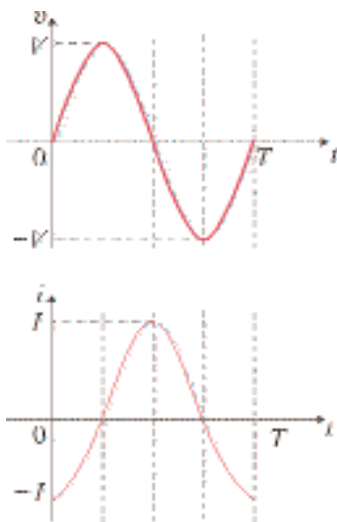
οπότε μπορούμε να γράψουμε

$$i = I \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$



ΣΧΗΜΑ 2.147

Το ρεύμα υστερεί της τάσης κατά $\pi/2$.



ΣΧΗΜΑ 2.148

Η τάση είναι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής του ρεύματος.

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα υστερεί της τάσης κατά $\pi/2$. Η διαφορά φάσης $\pi/2$ εκφράζει χρονική υστέρηση κατά $T/4$, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.148. Όταν δηλαδή η τάση παίρνει τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή της, το ρεύμα είναι μηδέν, ενώ, όταν η τάση παίρνει την τιμή μηδέν, το ρεύμα παίρνει τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή του. Αυτό συμβαίνει, γιατί

η τάση είναι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής του ρεύματος $\left(v = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \right)$,

δηλαδή ανάλογη με την κλίση της καμπύλης $i = f(t)$. Η μέγιστη ή ελάχιστη τιμή της τάσης ($v = \pm V$) είναι τη στιγμή που έχουμε τη μέγιστη ή την ελάχιστη κλίση της καμπύλης $i = f(t)$, δηλαδή, όταν $i = 0$. Η τάση μηδενίζεται τις στιγμές, που η κλίση $\Delta i/\Delta t$ είναι μηδέν, δηλαδή όταν είναι $i = \pm I$.

Ορίζουμε ως επαγωγική αντίσταση X_L το γινόμενο ωL δηλαδή

$$X_L = \omega L$$

και ισχύει για το κύκλωμα του σχήματος 2.147

$$X_L = \frac{V}{I} = \frac{V_r}{I_r}$$

Το μέγεθος X_L εκφράζει τη δυσκολία που συναντούν τα φορτία κατά την κινήσή τους στο πηνίο, λόγω αυτεπαγωγής. Προφανώς αυτή η δυσκολία είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα του εναλλασσομένου ρεύματος και η αυτεπαγωγή L . Γι' αυτό χρησιμοποιούνται πηνία σε ορισμένες εφαρμογές, όπως στα τροφοδοτικά ή σε ηλεκτρικά φίλτρα προκειμένου να εμποδίζεται η διέλευση ρευμάτων υψηλών συχνοτήτων και να επιτρέπεται η διέλευση ρευμάτων με χαμηλότερες συχνότητες. Η X_L είναι άεργη αντίσταση, γιατί, όπως θα δούμε, στο ιδανικό πηνίο δεν έχουμε κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενέργεια που μεταφέρεται από την πηγή στο πηνίο στο $1/4$ της περιόδου, αποθηκεύεται σ' αυτό και επιστρέφει στην πηγή στο επόμενο $1/4$ της περιόδου. Επειδή λοιπόν η X_L είναι άεργη, έπρεπε να έχει επικρατήσει στα ελληνικά ο όρος "επαγωγική αντίδραση", που σπάνια χρησιμοποιείται (inductive reactance ονομάζεται στα Αγγλικά) και όχι "επαγωγική αντίσταση". Τον όρο αντίσταση (resistance) έπρεπε να τον χρησιμοποιούμε στην περίπτωση που το μέγεθος που συνδέεται με μετατροπή σε θερμοδυναμική (εσωτερική) ενέργεια.

ΠΥΚΝΩΤΗΣ ΣΕ ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Θεωρούμε πυκνωτή χωρητικότητας C , στα άκρα του οποίου εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση της μορφής

$$v = V \sin \omega t$$

και έστω ότι η (ωμική) αντίσταση του κυκλώματος είναι αμελητέα. Το φορτίο του πυκνωτή είναι

$$q = C v$$

οπότε η στιγμιαία τιμή του ρεύματος είναι

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = C \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (\Delta t \text{ πάρα πολύ μικρό})$$

Από τα προηγούμενα αποδεικνύεται ότι το ρεύμα είναι της μορφής

$$i = C\omega V \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

Το πλάτος του ρεύματος είναι

$$I = C\omega V$$

άρα

$$i = I \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα προηγείται της τάσης, κατά $\pi/2$. Όταν δηλαδή η τάση παίρνει τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή της, το ρεύμα μηδενίζεται, ενώ όταν η τάση μηδενίζεται το ρεύμα παίρνει τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή του. Αυτό συμβαίνει γιατί το ρεύμα i είναι ανάλογο του ρυθμού μεταβολής της τάσης, δηλαδή ανάλογο της κλίσης της καμπύλης $v = f(t)$. Όταν $v = \pm V$ η κλίση $\Delta v/\Delta t$ είναι μηδέν, άρα μηδέν είναι και το ρεύμα i . Όταν $v = 0$ η κλίση $\Delta v/\Delta t$ είναι μέγιστη ή ελάχιστη, άρα και το ρεύμα i είναι μέγιστο ή ελάχιστο ($i = \pm I$).

Ορίζουμε ως χωρητική αντίσταση X_c το μέγεθος $\frac{1}{\omega C}$, δηλαδή

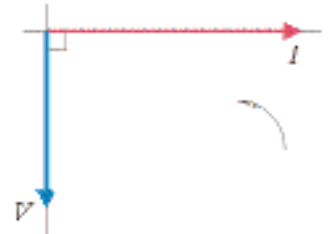
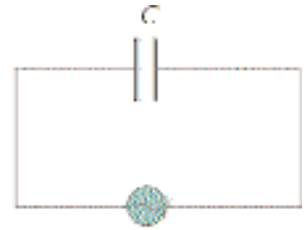
$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

και ισχύει για το κύκλωμα του σχήματος 2.149

$$X_c = \frac{V}{I} = \frac{V_r}{I_r}$$

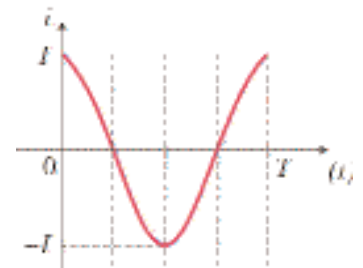
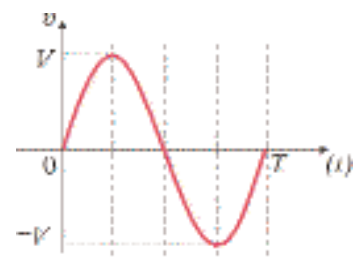
Το μέγεθος X_c εκφράζει τη δυσκολία των φορτίων να κινηθούν, στο κύκλωμα, λόγω των αποθηκευμένων φορτίων στους οπλισμούς του πυκνωτή. Αυτή η δυσκολία είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μικρότερη είναι η συχνότητα του εναλλασσομένου ρεύματος και η χωρητικότητα του πυκνωτή. Οι πυκνωτές επιτρέπουν τη διέλευση ρευμάτων υψηλών συχνοτήτων και εμποδίζουν τη διέλευση ρευμάτων με χαμηλές συχνοτήτες. Κάνουν δηλαδή το εντελώς αντίθετο από τα πηνία.

Η X_c είναι "άεργη" αντίσταση γιατί, όπως θα δούμε, δεν έχουμε δαπάνη ηλεκτρικής ενέργειας στον ιδανικό πυκνωτή. Η ενέργεια που μεταφέρεται σ' αυτόν, κατά τη φόρτισή του στο $1/4$ της περιόδου, αποθηκεύεται και επιστρέφει στην πηγή κατά την εκφόρτισή του, στο αμέσως επόμενο $1/4$ της περιόδου. Στην ελληνική βιβλιογραφία έχει επικρατήσει, για την X_c , ο όρος "χωρητική αντίσταση" και σπάνια εμφανίζεται ο όρος "χωρητική αντίδραση". Επειδή η X_c είναι "άεργη", έπρεπε να έχει επικρατήσει ο όρος "χωρητική αντίδραση".



ΣΧΗΜΑ 2.149

Το ρεύμα προηγείται της τάσης κατά $\pi/2$.



ΣΧΗΜΑ 2.150

Το ρεύμα είναι ανάλογο του ρυθμού μεταβολής της τάσης.

ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ R, L, C ΣΕ ΣΕΙΡΑ

Συνδέουμε σε σειρά αντιστάτη, ιδανικό πηνίο και ιδανικό πυκνωτή και τροφοδοτούμε το σύστημα από εναλλασσόμενη τάση της μορφής

$$v = V \sin \omega t$$

Επειδή τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα σε σειρά διαρρέονται, σε κάθε χρονική στιγμή, από το ίδιο ρεύμα. Σύμφωνα με όσα έχουμε αναφέρει, η τάση στα άκρα του αντιστάτη v_R έχει την ίδια φάση με το ρεύμα, η τάση στα άκρα του ιδανικού πηνίου v_L προηγείται του ρεύματος κατά $\pi/2$, ενώ η τάση v_C στα άκρα του πυκνωτή υστερεί του ρεύματος κατά $\pi/2$.

Σε κάθε χρονική στιγμή είναι

$$v = v_R + v_L + v_C$$

Παριστάνουμε τις τάσεις με περιστρεφόμενα διανύσματα (φάσορες) (σχήμα 2.151) και ονομάζουμε \vec{V} το διανυσματικό άθροισμα (φάσορα) των διανυσμάτων (φασόρων) $\vec{V}_R, \vec{V}_L, \vec{V}_C$. Το διάνυσμα \vec{V} έχει μέτρο όσο το πλάτος της

τάσης V , και είναι το περιστρεφόμενο διάνυσμα, του οποίου η προβολή στον κατακόρυφο άξονα παριστάνει την τάση v . Έχουμε λοιπόν

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} \quad \text{ή}$$

$$V = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L - IX_C)^2} \quad \text{ή}$$

$$V = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Ορίζουμε ως **σύνθετη αντίσταση** ή **εμπέδηση** του κυκλώματος το μέγεθος

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

το οποίο μπορεί να παρασταθεί σε διανυσματική μορφή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.152. Ισχύει

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V_r}{I_r}$$

Το ρεύμα όπως παρατηρούμε από το διανυσματικό διάγραμμα των τάσεων υστερεί της τάσης κατά θ , οπότε έχει εξίσωση

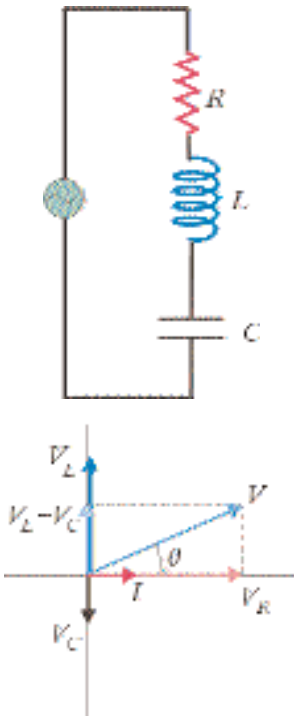
$$i = I \sin(\omega t - \theta)$$

Η γωνία θ υπολογίζεται από τη σχέση

$$\tan \theta = \frac{V_L - V_C}{V_R} = \frac{X_L - X_C}{R}$$

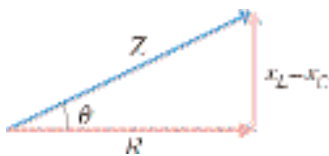
Στο κύκλωμα που εξετάσαμε θεωρήσαμε $X_L > X_C$ (ή $V_L > V_C$). Αν είναι $X_C > X_L$ ($V_C > V_L$) η $\tan \theta$ παίρνει αρνητική τιμή, επομένως προηγείται το ρεύμα της τάσης. Οι σχέσεις που αναφέρθηκαν στη μελέτη του κυκλώματος R-L-C ισχύουν και όταν λείπει ένα από τα τρία στοιχεία, αρκεί να θέσουμε μηδέν την τάση και την αντίσταση του στοιχείου που λείπει.

Ακολουθεί πίνακας με κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος και τις σχέσεις που ισχύουν σε κάθε περίπτωση.



ΣΧΗΜΑ 2.151

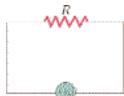
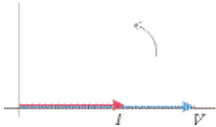
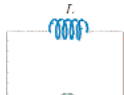
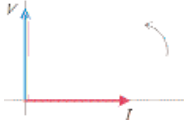

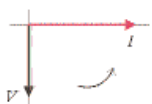
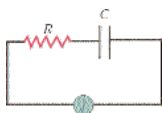
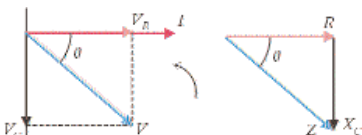
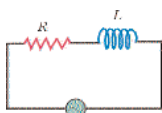
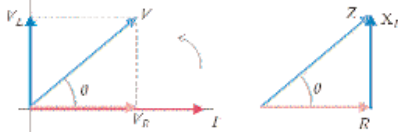
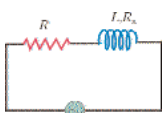
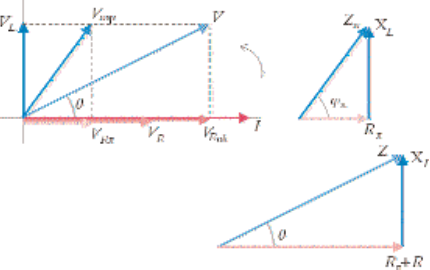
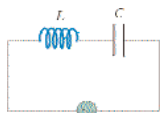
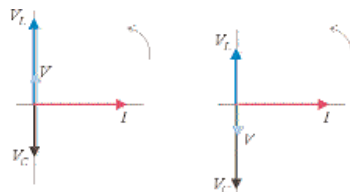
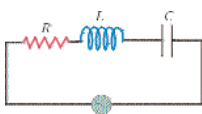
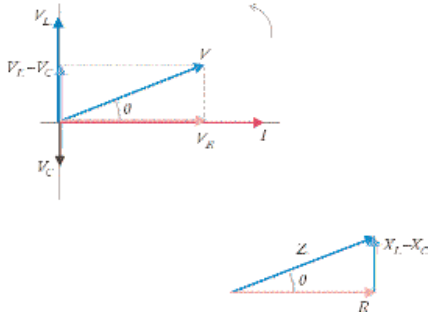
Κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος R-L-C σε σειρά και το αντίστοιχο διανυσματικό (φασοριζό) διάγραμμα



ΣΧΗΜΑ 2.152

Τρίγωνο με το οποίο παριστάνουμε τις αντιστάσεις.

ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

1.		$v = V \sin \omega t$	$R = \frac{V}{I} = \frac{V_r}{I_r}$			
2.		$v = V \sin \omega t$	$X_L = \frac{V}{I} = \frac{V_r}{I_r} = \omega L$			
3.		$v = V \sin \omega t$	$X_C = \frac{V}{I} = \frac{V_r}{I_r} = \frac{1}{\omega C}$			
4.		$v = V \sin \omega t$	$z = \frac{V}{I} = \frac{V_r}{I_r} = \sqrt{R^2 + X_C^2}$	$i = I \sin (\omega t - \theta)$	$\tan \theta = -\frac{V_C}{V_R} = -\frac{X_C}{R}$	
5.		$v = V \sin \omega t$	$z = \frac{V}{I} = \frac{V_r}{I_r} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$	$i = I \sin (\omega t - \theta)$	$\tan \theta = \frac{V_L}{V_R} = \frac{X_L}{R}$	
6.		$v = V \sin \omega t$	$z = \frac{V}{I} = \frac{V_r}{I_r} = \sqrt{R_{ok}^2 + X_L^2}$	$i = I \sin (\omega t - \theta)$	$\tan \theta = \frac{X_L}{R + R_{II}}$	
7.		$v = V \sin \omega t$	$z = \frac{V}{I} = \frac{V_r}{I_r} = X_L - X_C $	$i = I \sin (\omega t - \theta)$	$\text{όπου } \theta = \pm \frac{\pi}{2}$	
8.		$v = V \sin \omega t$	$z = \frac{V}{I} = \frac{V_r}{I_r} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$	$i = I \sin (\omega t - \theta)$	$\tan \theta = \frac{V_L - V_C}{V_R} = \frac{X_L - X_C}{R}$	

ΜΕΣΗ ΙΣΧΥΣ ΤΟΥ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Είδαμε πως υπολογίζουμε την μέση ισχύ του εναλλασσομένου ρεύματος στην περίπτωση που αυτό διαρρέει έναν αντιστάτη. Τώρα θα αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα στην γενική περίπτωση της συνδεσμολογίας των στοιχείων $R-L-C$ σε σειρά. Η στιγμιαία ισχύς είναι

$$P = vi = V \sin \omega t I \sin (\omega t - \theta)$$

Θα υπολογίσουμε σε μια περίοδο την μέση τιμή της P .

Η προηγούμενη σχέση, με χρήση της τριγωνομετρικής ταυτότητας

$$\sin (\omega t - \theta) = \sin \omega t \cos \theta - \cos \omega t \sin \theta$$

γίνεται

$$P = VI \sin^2 \omega t \cos \theta - VI \sin \omega t \cos \omega t \sin \theta$$

Επειδή

$$\sin 2\omega t = 2 \sin \omega t \cos \omega t$$

έχουμε

$$P = VI \sin^2 \omega t \cos \theta - \frac{VI}{2} \sin 2\omega t \sin \theta$$

Η μέση ισχύς είναι

$$P_{av} = VI \cos \theta (\sin^2 \omega t)_{av} - \frac{VI}{2} \sin \theta (\sin 2\omega t)_{av}$$

Όμως $(\sin^2 \omega t)_{av} = \frac{1}{2}$ και $(\sin 2\omega t)_{av} = 0$

άρα

$$P_{av} = \frac{1}{2} VI \cos \theta = \frac{V}{\sqrt{2}} \frac{I}{\sqrt{2}} \cos \theta \quad \eta$$

$$P_{av} = V_r I_r \cos \theta \quad (2.80)$$

Το $\cos \theta$ ονομάζεται συντελεστής ισχύος του κύκλωματος και παίρνει τιμές από 0 έως 1, γιατί $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$

Διερεύνηση:

1. Είναι $\cos \theta = 0$ όταν $\theta = \pm \pi/2$

Αυτό σημαίνει ότι στο κύκλωμα έχουμε μόνο ιδανικό πηνίο ή μόνο πυκνωτή ή συνδεδεμένα σε σειρά ιδανικό πηνίο και πυκνωτή. Στις παραπάνω περιπτώσεις ο τύπος (2.80) δίνει $P_{av} = 0$. Δηλαδή στο ιδανικό πηνίο και στον πυκνωτή δεν έχουμε κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

2. Είναι $\cos \theta = 1$, όταν $\theta = 0$.

Αυτό σημαίνει ότι το κύκλωμα έχει μόνο μόνο ωμική αντίσταση, δηλαδή μόνο αντιστάτη ή ότι είναι κύκλωμα $R-L-C$ σε σειρά με $X_L = X_C$. Αν συμβαίνει το τελευταίο, έχουμε μια κατάσταση στο κύκλωμα, όπου

i) Η εμπέδηση παίρνει την ελάχιστη τιμή της $Z = R$

ii) Η ενεργός τιμή του ρεύματος (και το πλάτος) μεγιστοποιείται

iii) Η τάση και το ρεύμα είναι συμφασικά

iv) Η μέση ισχύς μεγιστοποιείται, δηλαδή το κύκλωμα απορροφά ενέργεια με τον μέγιστο ρυθμό.

Η παραπάνω κατάσταση ονομάζεται **συντονισμός**.

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι στην περίπτωση των κυκλωμάτων $R-L-C$ ή $R-L$ ή $R-C$ δαπάνη ενέργειας συντελείται στον αντιστάτη, οπότε μπορούμε να γράφουμε

$$P_{av} = I_r^2 R \quad (2.81)$$

Πράγματι από το σχήμα 2.152 έχουμε $\cos \theta = \frac{R}{Z}$ και επιπλέον $V_r = I_r Z$, οπότε η (2.80) δίνει την (2.81).

Παράδειγμα 2-38

Αντιστάτης με αντίσταση $R_1 = 20 \Omega$, πηνίο με ωμική αντίσταση $R_\pi = 80 \Omega$

και αυτεπαγωγή $L = \frac{2\sqrt{3}}{5} \text{ H}$ και πυκνωτής συνδέονται σε σειρά. Στα

άκρα του συστήματος εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση, της μορφής

$$v = 240 \sin 200t \quad (v \text{ σε V και } t \text{ σε s})$$

Αν η χωρητική αντίσταση του πυκνωτή είναι $X_C = 180 \cdot \sqrt{3} \Omega$, να βρεθούν

A) Η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος

B) Οι εξισώσεις, σε συνάρτηση με το χρόνο, για το ρεύμα i που διαρρέει το κύκλωμα, για την τάση στα άκρα του πηνίου v_π , για την τάση στα άκρα του πυκνωτή v_C και για την τάση στα άκρα του αντιστάτη.

Γ) Η μέση ισχύς που παρέχει η πηγή στο κύκλωμα.

Απάντηση

A) Η επαγωγική αντίσταση είναι

$$X_L = \omega L = \left(200 \frac{2\sqrt{3}}{5} \right) \Omega = 80\sqrt{3} \Omega$$

Βρίσκουμε τώρα τη σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_\pi)^2 + (X_L - X_C)^2} \quad \text{ή}$$

$$Z = \sqrt{(20 + 80)^2 + (80\sqrt{3} - 180\sqrt{3})^2} \Omega \quad \text{ή}$$

$$Z = 200 \Omega$$

B) Το πλάτος του ρεύματος είναι

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{240 \text{ V}}{200 \Omega} = 1,2 \text{ A}$$

Το πλάτος της τάσης στα άκρα του αντιστάτη είναι

$$V_{R_1} = IR_1 = 1,2 \text{ A} \times 20 \Omega = 24 \text{ V}$$

Το πλάτος της τάσης στα άκρα του πυκνωτή είναι

$$V_C = I X_C = 1,2 \text{ A} \times 180 \sqrt{3} \ \Omega = 216 \sqrt{3} \text{ V}$$

Η σύνθετη αντίσταση του πηνίου είναι

$$Z_\pi = \sqrt{R_\pi^2 + X_L^2} = \sqrt{80^2 + (80 \sqrt{3})^2} \ \Omega = 160$$

οπότε το πλάτος της τάσης στα άκρα του πηνίου είναι

$$V_\pi = I Z_\pi = 1,2 \text{ A} \times 160 \ \Omega = 192 \text{ V}$$

Παριστάνουμε κατόπιν τις τάσεις με στρεφόμενα διανύσματα (φάσορες) (σχήμα 2.153). Η μια συνιστώσα, V_L , της V_π (πλάτος επαγωγικής τάσης) είναι

$$V_L = I X_L = 1,2 \text{ A} \times 80 \sqrt{3} \ \Omega = 96 \sqrt{3} \text{ V}$$

ενώ η άλλη συνιστώσα της είναι

$$V_{R_\pi} = I R_\pi = 1,2 \text{ A} \times 80 \ \Omega = 96 \text{ V}$$

Παρατηρούμε, από το διανυσματικό διάγραμμα των τάσεων ότι

i) Η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης στα άκρα του πηνίου και του ρεύματος i είναι φ , με

$$\tan \varphi = \frac{V_L}{V_{R_\pi}} = \frac{96 \sqrt{3} \text{ V}}{96 \text{ V}} = \sqrt{3}$$

άρα $\varphi = \pi/3$

ii) Το ρεύμα i προηγείται της τάσης v που εφαρμόζεται στα άκρα του κυκλώματος κατά θ , με

$$\tan \theta = \frac{V_C - V_L}{V_{R_1} + V_{R_\pi}} = \frac{120 \sqrt{3} \text{ V}}{96 \text{ V}} = \sqrt{3}$$

άρα $\theta = \pi/3$.

Μπορούμε, πλέον, να γράψουμε στο S.I. τις ζητούμενες εξισώσεις

$$i = 1,2 \sin\left(200t + \frac{\pi}{3}\right), \quad v_\pi = 192 \sin\left(200t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_C = 216 \sqrt{3} \sin\left(200t - \frac{\pi}{6}\right), \quad v_{R_1} = 24 \sin\left(200t + \frac{\pi}{3}\right)$$

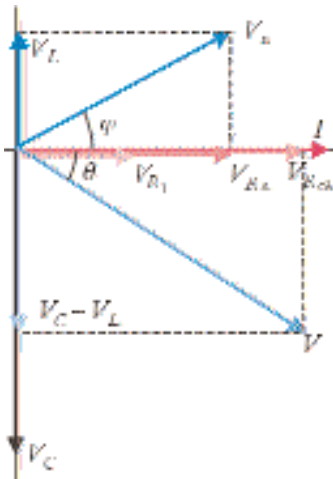
Γ) Η μέση ισχύς είναι

$$P_{\text{av}} = V_r I_r \cos \theta = \frac{V}{\sqrt{2}} \frac{I}{\sqrt{2}} \frac{1}{2} \quad \text{ή}$$

$$P_{\text{av}} = \frac{VI}{4} = \frac{240 \times 1,2}{4} \text{ W} = 72 \text{ W}$$

Μπορούσαμε να γράψουμε και

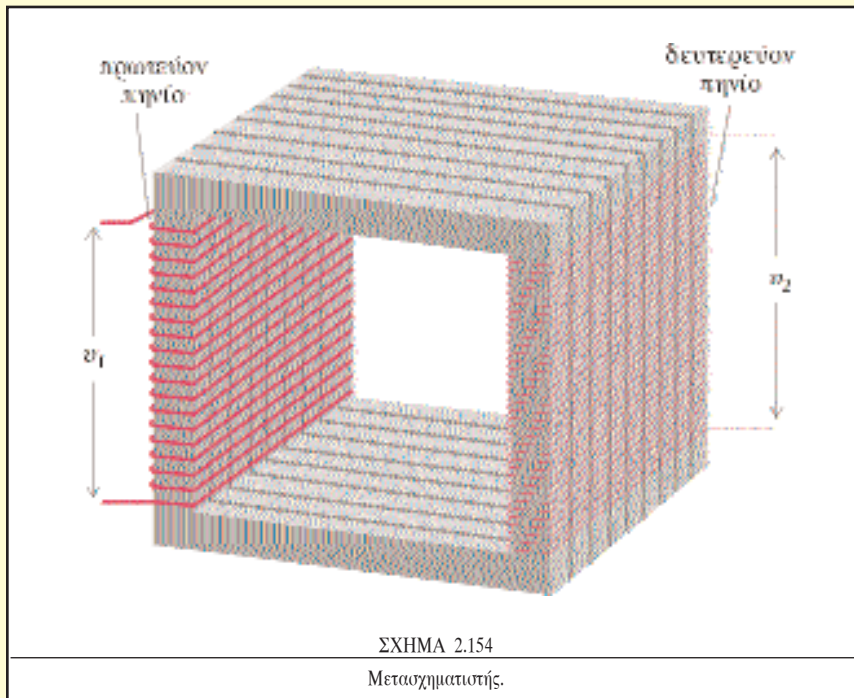
$$P_{\text{av}} = I_r^2 (R_1 + R_\pi) = 72 \text{ W}$$



ΣΧΗΜΑ 2.153

Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων.

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ



Μετασχηματιστές είναι διατάξεις, με τις οποίες ανυψώνουμε ή υποβιβάζουμε την εναλλασσόμενη τάση και των οποίων η λειτουργία στηρίζεται στο φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής.



Ένας μετασχηματιστής αποτελείται από δύο πηνία, το πρωτεύον και το δευτερεύον, τυλιγμένα γύρω από ένα πυρήνα με μαγνητικές ιδιότητες (σίδηρος). Το πρωτεύον πηνίο τροφοδοτείται από την τάση v_1 , που θέλουμε να μετασχηματίσουμε και στο δευτερεύον λαμβάνουμε την μετασχηματισμένη τάση v_2 .

Όταν το κύκλωμα του δευτερεύοντος πηνίου είναι ανοιχτό, λέμε ότι ο μετασχηματιστής λειτουργεί στο κενό και τότε δεν έχουμε ρεύμα στο δευτερεύον πηνίο. Θεωρώντας αμελητέα την ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος πηνίου, έχουμε ότι η τάση v_1 έχει ίδια τιμή και αντίθετη πολικότητα με την επαγόμενη ΗΕΔ, άρα

$$v_1 = N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

όπου N_1 ο αριθμός των σπειρών του πρωτεύοντος πηνίου και Φ η ροή που περνά από κάθε σπείρα του. Υποθέτοντας ότι η ίδια ροή Φ περνά από κάθε σπείρα του δευτερεύοντος πηνίου έχουμε ότι η τάση v_2 είναι

$$v_2 = N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

όπου N_2 ο αριθμός των σπειρών του δευτερεύοντος πηνίου.

Εύκολα φθάνουμε στο συμπέρασμα, ότι

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Οι τάσεις v_1 , v_2 έχουν την ίδια φάση, άρα ο λόγος τους ισούται με το λόγο των πλατών, άρα και των ενεργών τιμών

$$\frac{V_{1,r}}{V_{2,r}} = \frac{N_1}{N_2}$$

Αν $N_2 > N_1$, έχουμε $V_{2,r} > V_{1,r}$, δηλαδή ο μετασχηματιστής ανυψώνει την τάση.

Αν $N_2 < N_1$, έχουμε $V_{2,r} < V_{1,r}$, δηλαδή ο μετασχηματιστής υποβιβάζει την τάση.

Στην παραπάνω περίπτωση, που το κύκλωμα του δευτερεύοντος πηνίου είναι ανοιχτό και αμελητέα η ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος πηνίου, ο μετασχηματιστής δεν καταναλώνει ενέργεια. Αυτό δικαιολογείται απ' το γεγονός ότι ο συντελεστής ισχύος $\cos\varphi_1$ του πρωτεύοντος πηνίου, είναι μηδέν, διότι αυτό έχει μόνο επαγωγική αντίσταση. Όταν όμως κλείσει το κύκλωμα του δευτερεύοντος πηνίου έχουμε σ' αυτό ρεύμα I_2 , που, με τη σειρά του, επάγει ρεύμα στο πρωτεύον. Τότε δεν είναι $\cos\varphi_1 = 0$, οπότε έχουμε δαπάνη ενέργειας.

Αν το δευτερεύον πηνίο τροφοδοτεί έναν αντιστάτη, έχουμε ότι η μέση καταναλισκόμενη ισχύς είναι

$$P_{2,av} = V_{2,r} I_{2,r}$$

Αποδεικνύεται σε αυτή την περίπτωση ότι ο συντελεστής ισχύος στο κύκλωμα του πρωτεύοντος πηνίου ($\cos\varphi_1$) είναι περίπου 1, άρα η μέση ισχύς, με την οποία τροφοδοτείται ο μετασχηματιστής, είναι

$$P_{1,av} = V_{1,r} I_{1,r}$$

Αν ο μετασχηματιστής είναι ιδανικός, δηλαδή δεν έχουμε σ' αυτόν απώλεια ενέργειας, ισχύει

$$P_{1,av} = P_{2,av}$$

Στην πράξη η απόδοση του μετασχηματιστή

$$a = \frac{P_{2,av}}{P_{1,av}}$$

είναι από 90 % έως 99 %. Οι απώλειες οφείλονται στην ωμική αντίσταση των πηνίων, στο φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης* και τα δινορεύματα. Για τη μείωση των δινορευμάτων δεν χρησιμοποιείται ολόσωμος πυρήνας αλλά πυρήνας αποτελούμενος από λεπτά μεταλλικά φύλλα, ηλεκτρικώς μονωμένα μεταξύ τους. Στην πράξη οι μετασχηματιστές έχουν ωμικές αντιτάσεις, αλλά οι επαγωγικές τους αντιτάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες, οπότε οι απώλειες γίνονται σχετικά μικρές.

* Μαγνητική υστέρηση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η μεταβολή της μαγνήτισης ενός υλικού δεν ακολουθεί την μεταβολή του εξωτερικού πεδίου, με την βοήθεια του οποίου μαγνητίζεται το υλικό.

ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

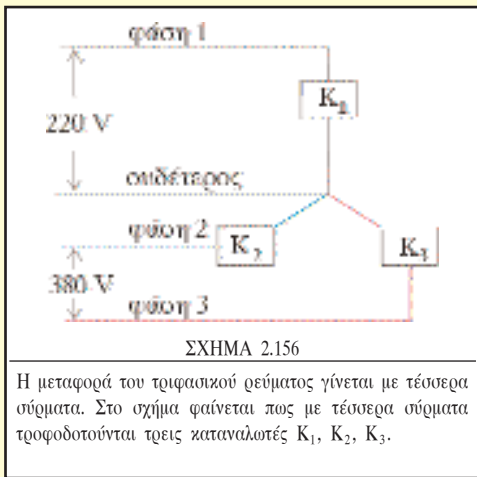
Για να μεταφέρουμε ηλεκτρική ενέργεια με μικρές απώλειες, πρέπει η μεταφορά να γίνεται με υψηλή τάση. Πράγματι, αν μεταφέρουμε ισχύ $P_{av} = V_r I_r$, οι απώλειες λόγω φαινομένου Joule είναι

$$P_{απ} = I_r^2 R$$

άρα
$$P_{απ} = \left(\frac{P_{av}}{V_r} \right)^2 R$$

Δηλαδή οι απώλειες είναι αντιστρόφως ανάλογες του τετραγώνου της τάσης, έτσι, αν δεκαπλασιάσουμε την τάση, υποεκατονταπλασιάζονται οι απώλειες.

Με τους μετασχηματιστές μπορούμε να ανυψώνουμε την εναλλασσόμενη τάση στον τόπο παραγωγής της, προκειμένου να μεταφερθεί η ηλεκτρική



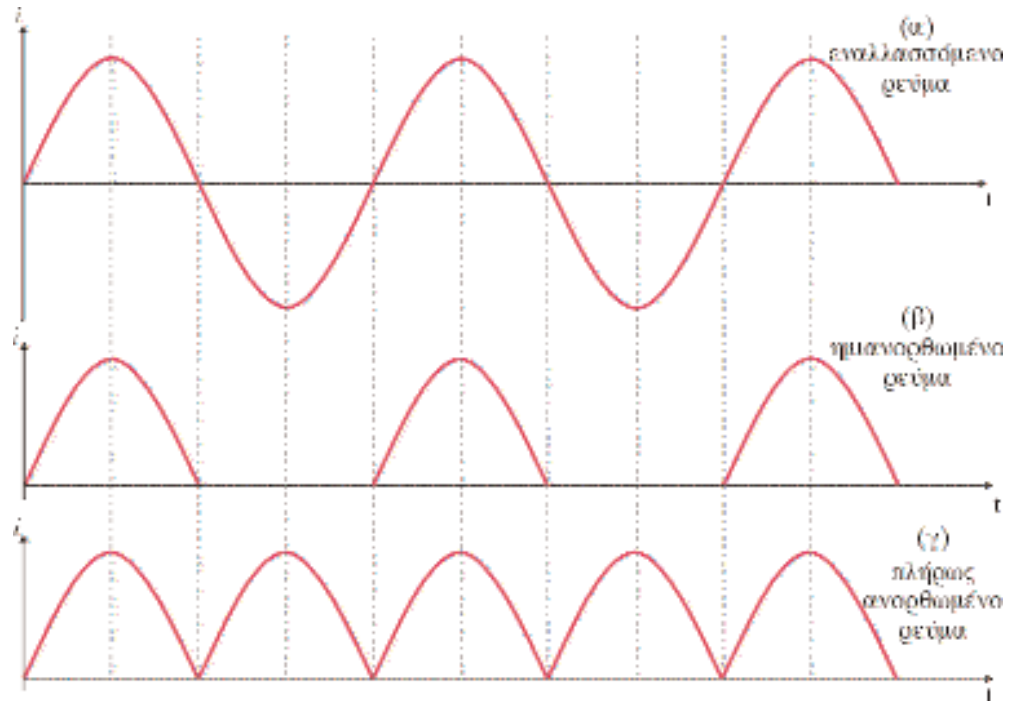
Η μεταφορά του τριφασικού ρεύματος γίνεται με τέσσερα σύρματα. Στο σχήμα φαίνεται πως με τέσσερα σύρματα τροφοδοτούνται τρεις καταναλωτές K_1, K_2, K_3 .

μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια με μικρές απώλειες και να την υποβιβάζουμε πάλι στον τόπο κατανάλωσης. Η ευκολία ανύψωσης ή υποβιβασμού της εναλλασσόμενης τάσης είναι ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα του εναλλασσόμενου ρεύματος, σε σχέση με το συνεχές.

Στην πράξη χρησιμοποιούμε το λεγόμενο τριφασικό ρεύμα, που είναι σύστημα τριών εναλλασσομένων ρευμάτων. Για τη μεταφορά του τριφασικού ρεύματος απαιτούνται τέσσερα σύρματα, οι τρεις φάσεις και ο ουδέτερος αγωγός, ο οποίος πρακτικά δεν διαρρέεται από ρεύμα. Η ενεργός τιμή της τάσης μεταξύ μιας φάσης και του ουδέτερου αγωγού είναι (στην Ελλάδα) 220V, ενώ μεταξύ δύο φάσεων είναι 380V. Συνήθως, με την τάση των 220V τροφοδοτούνται οι οικιακές συσκευές και με την τάση των 380V διάφορες βιομηχανικές, όπως κινητήρες κ.τ.λ.

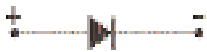
ΑΝΟΡΘΩΣΗ ΤΟΥ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Σε διάφορες εφαρμογές, π.χ. στις συσκευές ραδιοφώνων και άλλες διατάξεις ή στη φόρτιση μιας μπαταρίας, χρειαζόμαστε συνεχές και όχι εναλλασσόμενο ρεύμα. Συνεπώς, προκύπτει η ανάγκη μετατροπής του εναλλασσομένου ρεύματος σε συνεχές. Η λειτουργία αυτή επιτελείται από κάποιες διατάξεις που ονομάζονται ανορθωτές.



ΣΧΗΜΑ 2.157

Ημιανορθωμένο και πλήρως ανορθωμένο ρεύμα.



ΣΧΗΜΑ 2.158

Συμβολισμός διόδου.

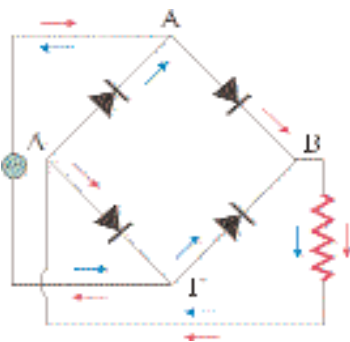


ΣΧΗΜΑ 2.159

Ο αντιστάτης διαρρέεται από ημιανορθωμένο ρεύμα.

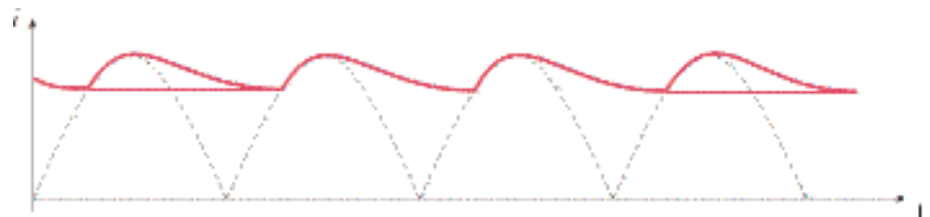
Ένας ημιαγωγός (κρυσταλλοδιόδος, διόδιο) ή μια διόδος ηλεκτρονική λυχνία, μπορούν να παίζουν το ρόλο βαλβίδας και να επιτρέπουν τη διόδο του ρεύματος προς τη μια φορά. Αν παρεμβληθεί σε κύκλωμα τροφοδοσίας αντιστάτη με εναλλασσόμενο ρεύμα μία διόδος (σχ. 2.159), ο αντιστάτης, θα διαρρέεται από ημιανορθωμένο ρεύμα (σχ. 2.157(β)).

Υπάρχουν διατάξεις, (όπως κατάλληλος συνδυασμός διοδίων σχ. 2.160) με τις οποίες πετυχαίνουμε την λεγόμενη πλήρη ανόρθωση του εναλλασσομένου ρεύματος (σχ. 2.157(γ)). Δηλαδή καταφέρνουμε στο δεύτερο μισό της περιόδου, που κατά την ημιανόρθωση δεν έχουμε ρεύμα, να πετύχουμε την αναστροφή της φοράς του. Αυτό οδηγεί σε καλύτερη απόδοση της διάταξης.



ΣΧΗΜΑ 2.160

Με τον παραπάνω συνδυασμό διοδίων πετυχαίνουμε να διαρρέεται ο αντιστάτης από ρεύμα σταθερής φοράς.



ΣΧΗΜΑ 2.161

Πλήρως ανορθωμένο ρεύμα μετά την εξομάλυνσή του.

Τις διακυμάνσεις του ανορθωμένου ρεύματος μπορούμε να τις εξομαλύνουμε με κάποιες διατάξεις, που ονομάζονται εξομαλυντές (φίλτρα). Συνδέοντας π.χ πυκνωτή κατάλληλης χωρητικότητας στα άκρα του αντιστάτη του σχήματος 2.160, αυτός θα διαρρέεται από ρεύμα της μορφής του σχήματος 2.161. Αυτό συμβαίνει, γιατί στη χρονική διάρκεια που το ανορθωμένο ρεύμα παίρνει μικρές τιμές, ο αντιστάτης διαρρέεται από μεγαλύτερο ρεύμα, λόγω της εκφόρτισης του πυκνωτή.

Η ΕΝΟΠΟΙΗΤΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΑΣΗ ΤΟΥ MAXWELL



James Clerk Maxwell (1831-1879)

Θεωρείται από τους μεγαλύτερους θεωρητικούς φυσικούς και μαθηματικούς του 19ου αι. Από την αρχή της επιστημονικής του καριέρας άρχισε να αναπτύσσει την ηλεκτρομαγνητική θεωρία και την κινητική θεωρία των αερίων. Έδωσε, ακόμη, ερμηνεία για τη φύση των δακτυλίων του Κρόνου. Πέθανε στην ακμή της επιστημονικής του σταδιοδρομίας, λίγο πριν τα 50 του χρόνια.

Το 1873 ο Maxwell δημοσίευσε την ηλεκτρομαγνητική του θεωρία στο βιβλίο “Treatise on Electricity and Magnetism”. Κατάφερε να συμπεριλάβει, μέσα σε τέσσερις εξισώσεις, το σύνολο των νόμων του ηλεκτρομαγνητισμού και να ανακαλύψει θεωρητικά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, που διαδίδονται στο χώρο με την ταχύτητα του φωτός. Η σύνθεση του Maxwell για τον ηλεκτρομαγνητισμό αποτελεί κορυφαίο πνευματικό επίτευγμα συγκρίσιμο με τους νόμους της κίνησης του Newton, και τη θεωρία της σχετικότητας του Einstein. Ο Γερμανός φυσικός Boltzmann, αναφερόμενος στις εξισώσεις του Maxwell, παρέθεσε ένα στίχο από τον Γκαίτε “τις γραμμές αυτές τις έγραψε ένας θεός”.

Τις τέσσερις εξισώσεις του Maxwell αποτελούν

- Ο νόμος του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο
 - Ο νόμος της μαγνητικής ροής (ο αντίστοιχος με το νόμο του Gauss)
 - Ο νόμος της επαγωγής με τη γενικότερη διατύπωσή του και
 - Ο νόμος του Ampere γενικευμένος από τον Maxwell, με την εισαγωγή του ρεύματος μετατόπισης.
- Ο Maxwell επεξεργάστηκε αυτούς τους νόμους μαθηματικά και πρότεινε τέσσερις εξισώσεις, που περιγράφουν το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο, κάθε χρονική στιγμή, σε κάθε σημείο του χώρου. Αυτές οι εξισώσεις στη διαφορική τους μορφή δεν είναι δυνατόν να αναφερθούν εδώ. Θα αναφερθούμε όμως στα συμπεράσματα που προκύπτουν από κάθε εξίσωση και στην επέκταση του νόμου του Ampere με την εισαγωγή του ρεύματος μετατόπισης.

1. Ο Νόμος του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο

$$\Phi_E = \sum E_i \Delta A_i \cos \theta_i = \frac{Q_{\text{εστ}}}{\epsilon_0} \tag{I}$$

- Συνδέει τα περικλειόμενα από μια κλειστή επιφάνεια φορτία, με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια
- εμπεριέχει το νόμο του Coulomb

2. Ο νόμος της μαγνητικής ροής (ο αντίστοιχος με το νόμο του Gauss)

$$\Phi = \sum B_i \Delta A_i \cos \theta_i = 0 \tag{II}$$

- Εκφράζει την ανυπαρξία μαγνητικών μονόπολων και το ότι οι

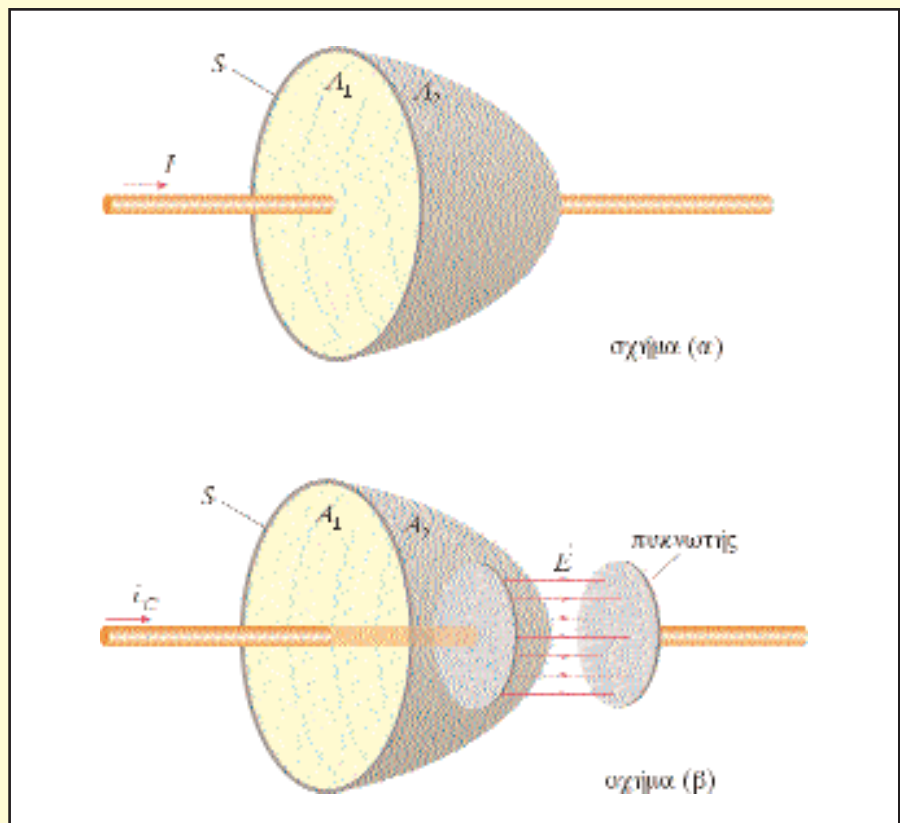
δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου δεν έχουν αρχή και τέλος.

Οι εξισώσεις (I) και (II) παρουσιάζουν μια αναλογία στο πρώτο, όχι όμως και στο δεύτερο μέλος. Αυτό οφείλεται στην ανυπαρξία μαγνητικών μονόπολων. Στην περίπτωση που είχαν βρεθεί μαγνητικά μονόπολα, οι δύο εξισώσεις θα παρουσίαζαν συμμετρία.

3. Ο νόμος της επαγωγής του Faraday στη γενικότερη μορφή

$$\sum E_{\parallel} \Delta l = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (\text{III})$$

- Συνδέει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, κατά μήκος μιας κλειστής



γραμμής, με το ρυθμό μεταβολής της (περικλειόμενης απ' τη γραμμή) μαγνητικής ροής.

4. Ας δούμε πώς ο Maxwell γενίκευσε το νόμο του Ampere με την εισαγωγή του ρεύματος μετατόπισης.

Διατυπώσαμε το νόμο του Ampere στην μορφή.

$$\sum B_{\parallel} \Delta l = \mu_0 i_{\text{εσ}}$$

Στην περίπτωση του σχήματος (α) εφαρμόζοντας τον παραπάνω νόμο για την καμπύλη γραμμή S, έχουμε ότι το $I_{\text{εσ}}$ είναι το ρεύμα I , που διέρχεται από οποιαδήποτε επιφάνεια, με κατάληξη την

γραμμή S. Το ρεύμα I τέμνει π.χ. την επίπεδη επιφάνεια A_1 , αλλά και την εξογκωμένη επιφάνεια A_2 . Έχουμε τώρα την περίπτωση του σχήματος (β), όπου το ρεύμα i_C (ρεύμα αγωγιμότητας) φορτίζει έναν πυκνωτή. Το $\Sigma B_{//} \Delta \ell$ για την γραμμή S, ισούται με $(\mu_0 i_C)$ αν θεωρήσουμε το ρεύμα που τέμνει την επιφάνεια A_1 και ισούται με μηδέν, αν θεωρήσουμε το ρεύμα που διέρχεται από την επιφάνεια A_2 . Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο νόμος του Ampere δεν έχει γενική ισχύ. Ο Maxwell, για να γενικεύσει το νόμο, επινόησε ένα ρεύμα μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή, που το ονόμασε ρεύμα μετατόπισης i_D . Αυτό το ρεύμα ισούται με το i_C και σχετίζεται με τη μεταβολή της ηλεκτρικής ροής, που διέρχεται απ' την εξογκωμένη επιφάνεια A_2 .

Αν σε χρόνο Δt αυξηθεί το φορτίο του πυκνωτή, χωρητικότητας C , κατά Δq και η τάση μεταξύ των οπλισμών αυξηθεί κατά Δv_C , έχουμε:

$$i_D = i_C = \frac{\Delta q}{\Delta t} = C \frac{\Delta v_C}{\Delta t}$$

Το μέτρο της έντασης E του ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή και η απόσταση αυτών ℓ , σχετίζονται με την σχέση

$$E = \frac{v_C}{\ell} \quad \text{ή} \quad v_C = E \ell$$

άρα

$$\frac{\Delta v_C}{\Delta t} = \ell \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

Ακόμα αν A το εμβαδόν κάθε οπλισμού, ισχύει

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{\ell}$$

οπότε

$$i_D = \epsilon_0 \frac{A}{\ell} \ell \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad \text{ή}$$

$$i_D = \epsilon_0 A \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

Η ηλεκτρική ροή, που διέρχεται απ' τη εξογκωμένη επιφάνεια είναι

$$\Phi_E = EA$$

άρα

$$\frac{\Delta \Phi_E}{\Delta t} = A \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

οπότε τελικά

$$i_D = \epsilon_0 \frac{\Delta \Phi_E}{\Delta t}$$



**HEINRICH RUDOLF
HERTZ
(1857 - 1894)**

Πρώτος παρήγαγε και ανίχνευσε πειραματικά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Η ποσότητα i_D δεν είναι ακριβώς όπως το ρεύμα, ένεκα ροής φορτίων (ρεύμα αγωγιμότητας), έχει όμως τα ίδια αποτελέσματα, όσον αφορά στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου. Άρα **το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο αποτελεί πηγή για το μαγνητικό πεδίο.**

Στην γενική περίπτωση, που συνυπάρχει ρεύμα αγωγιμότητας και ρεύμα μετατόπισης (δηλαδή μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο) ο νόμος του Ampere γράφεται

$$\sum B_{//} \Delta l = \mu_0 (i_C + i_D) \quad \eta$$

$$\sum B_{//} \Delta l = \mu_0 i_C + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\Delta \Phi_E}{\Delta t} \quad (IV)$$

- Η τελευταία εξίσωση μας περιγράφει τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου από το σύνθετο ηλεκτρικό ρεύμα αγωγιμότητας και από μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

- Εμπεριέχει το νόμο των Biot-Savart

Οι εξισώσεις (III) και (IV) παρουσιάζουν συμμετρία. Η απουσία από το δεύτερο μέλος της (III) του αντίστοιχου όρου με τον $(\mu_0 i_C)$, που υπάρχει στην (IV), οφείλεται στην ανυπαρξία των μαγνητικών μονόπολων.

Από την εξίσωση (III) έχουμε ότι το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο στην γενική περίπτωση (εκτός αν είναι $\Delta \Phi / \Delta t = \text{σταθ.}$) είναι μεταβαλλόμενο. Το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο με τη σειρά του (σύμφωνα με την εξίσωση IV) δημιουργεί μαγνητικό πεδίο κ.ο.κ. Δηλαδή το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο συνυπάρχει πάντα με το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο, ανεξάρτητα απ' την ύπαρξη φορτίων και ρεύματων.

Ο Maxwell με τις εξισώσεις του, πρόβλεψε θεωρητικά την εκπομπή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 2,997\ 924\ 58 \times 10^8 \text{ m/s}$$

η οποία ισούται με την ταχύτητα του φωτός*. Οδηγήθηκε έτσι στο συμπέρασμα ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα παρήγαγε και τα ανίχνευσε πειραματικά πρώτος ο Hertz, λίγα χρόνια μετά το θάνατο του Maxwell. (Η ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δεν θα προβλεπόταν χωρίς την προσθήκη του ρεύματος μετατόπισης).

Τελειώνοντας, επισημαίνουμε ότι όλα τα φαινόμενα του ηλεκτρομαγνητισμού περιγράφονται από τις εξισώσεις του Maxwell και τη δύναμη Lorentz

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

που δέχεται ένα φορτισμένο σωματίδιο μέσα σε ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο.

* Σήμερα η ταχύτητα c ορίζεται ως μια σταθερά χωρίς σφάλμα με (ακριβώς) εννέα σημαντικά ψηφία.

Α Ν Α Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ω Σ Η

□ Ο νόμος της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (νόμος του Faraday) αναφέρει ότι η επαγόμενη ΗΕΔ σ' ένα κύκλωμα ισούται με το αντίθετο του ρυθμού μεταβολής, της διερχόμενης από το κύκλωμα, μαγνητικής ροής

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

□ Σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz το επαγόμενο ρεύμα έχει τέτοια φορά, ώστε να αντιδρά στην αιτία που το προκαλεί.

□ Όταν μια ευθύγραμμη μεταλλική ράβδος μήκους ℓ κινείται με ταχύτητα \vec{v} μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο \vec{B} , επάγεται σ' αυτή ΗΕΔ

$$\mathcal{E} = B v \ell \sin \varphi$$

όπου φ γωνία που σχηματίζουν τα διανύσματα \vec{B} και \vec{v} , τα οποία είναι κάθετα στη ράβδο.

□ Όταν ένα μεταλλικό ορθογώνιο πλαίσιο εμβαδού A στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο B , γύρω από άξονα κάθετο στις μαγνητικές γραμμές, ο οποίος διέρχεται από τα μέσα δύο απέναντι πλευρών, επάγεται σ' αυτό ΗΕΔ

$$\mathcal{E} = B \omega A \sin \omega t$$

εφόσον θεωρήσουμε $t = 0$ την στιγμή που το πλαίσιο είναι κάθετο με το \vec{B} .

□ Η επαγόμενη ΗΕΔ σε μια μεταλλική ράβδο μήκους ℓ , η οποία στρέφεται, γύρω από άξονα κάθετο σ' αυτή και διερχόμενο από το ένα άκρο της, με συχνότητα f μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο \vec{B} , παράλληλο με τον άξονα περιστροφής, είναι:

$$\mathcal{E} = B \pi f \ell^2 = \frac{B \omega \ell^2}{2}$$

□ Η επαγόμενη ΗΕΔ μεταξύ του κέντρου ενός στρεφόμενου μεταλλικού δίσκου και της περιφέρειας του, στην περίπτωση που αυτός είναι κάθετα τοποθετημένος στις γραμμές του

μαγνητικού πεδίου \vec{B} , είναι

$$\mathcal{E} = \frac{B \omega R^2}{2}$$

όπου ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και R η ακτίνα του δίσκου.

□ Το άθροισμα των επαπτομενικών συνιστωσών $E_{//}$ του ηλεκτρικού πεδίου, που δημιουργείται από μεταβολές της μαγνητικής ροής, κατά μήκος ενός κλειστού δρόμου, επί τα αντίστοιχα στοιχειώδη τμήματα $\Delta\ell$, στα οποία διαιρείται αυτός ο δρόμος, ισούται με το αντίθετο του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής

$$\sum \mathcal{E}_{//} \Delta\ell = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Αυτή η σχέση αποτελεί τη γενικότερη διατύπωση του νόμου της επαγωγής του Faraday.

□ Το φαινόμενο της εμφάνισης επαγόμενης ΗΕΔ \mathcal{E}_2 σ' ένα πηνίο, όταν μεταβάλλεται το ρεύμα I_1 που διαρρέει κάποιο γειτονικό του πηνίο, ονομάζεται αμοιβαία επαγωγή και ισχύει

$$\mathcal{E}_2 = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

όπου M ένας συντελεστής, που ονομάζεται συντελεστής της αμοιβαίας επαγωγής.

□ Το φαινόμενο της εμφάνισης ΗΕΔ \mathcal{E} σ' ένα πηνίο, λόγω της μεταβολής του ρεύματος I , που διαρρέει το ίδιο το πηνίο, ονομάζεται αυτεπαγωγή και ισχύει

$$\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

όπου L ένας συντελεστής, που ονομάζεται συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου (ή απλά αυτεπαγωγή).

□ Η αποθηκευμένη ενέργεια σ' ένα πηνίο με αυτεπαγωγή L , που διαρρέεται από ρεύμα I είναι

$$U = \frac{1}{2}LI^2$$

□ Εναλλασσόμενη τάση και εναλλασσόμενο ρεύμα ονομάζουμε, αντίστοιχα, την τάση και το ρεύμα της μορφής

$$v = V \sin(\omega t + \varphi)$$

$$i = I \sin(\omega t + \varphi)$$

□ Η ενεργός τιμή του εναλλασσόμενου ρεύματος ισούται με την τιμή του σταθερού ρεύματος, που παρέχει την ίδια ενέργεια Joule με το εναλλασσόμενο ρεύμα, στον ίδιο χρόνο και στον ίδιο αντιστάτη. Ισχύει

$$I_r = \frac{I}{\sqrt{2}} = 0,707 I$$

□ Η ενεργός τιμή μιας εναλλασσόμενης τάσης ισούται με τη σταθερή τάση, η οποία όταν εφαρμοστεί στα άκρα αντιστάτη αυτός διαρρέεται από σταθερό ρεύμα ίσο με την ενεργό τιμή του αντίστοιχου εναλλασσόμενου ρεύματος. Ισχύει

$$V_r = \frac{V}{\sqrt{2}}$$

□ Όταν εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση $v = V \sin \omega t$

στα άκρα συστήματος στοιχείων R, L, C σε σειρά, έχουμε ότι:

Το ρεύμα είναι

$$i = I \cos(\omega t - \theta)$$

όπου $\tan \theta = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$

Η εμπέδηση του κυκλώματος είναι

$$Z = \frac{V}{I} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

□ Η μέση ισχύς του εναλλασσόμενου ρεύματος δίνεται απ' τη σχέση

$$P_{av} = V_r I_r \cos \theta$$

όπου θ η διαφορά φάσης τάσης - έντασης.

□ Μετασχηματιστής είναι μια διάταξη που ανυψώνει ή υποβιβάζει την εναλλασσόμενη τάση.

□ Ανόρθωση του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι η μετατροπή του σε συνεχές ρεύμα.

Δ Ρ Α Σ Τ Η Ρ Ι Ο Τ Η Τ Ε Σ

1. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ

Συνδέστε ένα πηνίο 1200 σπειρών με ένα δεύτερο πηνίο 300 σπειρών, στο οποίο έχει προσαρμοσθεί γαλβανόμετρο μηδενός.

Εισάγετε απότομα στο πηνίο των 1200 σπειρών ένα ραβδόμορφο μαγνήτη. Τί παρατηρείτε;

Τί συμβαίνει αν εξαχθεί απότομα ο μαγνήτης από το πηνίο;

Επαναλάβετε την εισαγωγή και εξαγωγή του μαγνήτη στο πηνίο των 1200 σπειρών με αντίθετη πολικότητα. Τί παρατηρείτε. Δώστε ερμηνεία.

Αποσυνδέστε κατόπιν τα πηνία και συνδέστε το πηνίο των 1200 σπειρών στα πλακίδια y ενός παλμογράφου. Ρυθμίστε

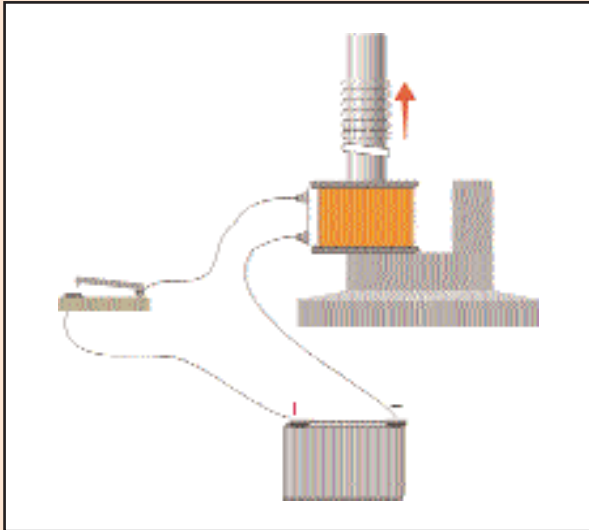
ώστε η κηλίδα να είναι στο κέντρο της οθόνης. Επαναλάβετε πάλι την εισαγωγή (και εξαγωγή) του μαγνήτη στο πηνίο. Τι παρατηρείτε στην οθόνη του παλμογράφου.

2. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ - ΚΑΝΟΝΑΣ LENZ

(I) Πάρτε ένα χάλκινο σωλήνα μήκους περίπου 1,5 m και κρατήστε τον κατακόρυφο. Αφήστε να πέσει ελεύθερα μέσα στο σωλήνα ένα μικρό ραβδόμορφο κομμάτι σιδήρου και ύστερα ένας ραβδόμορφος μαγνήτης ίδιων περίπου διαστάσεων με το σιδερένιο κομμάτι. Ποιά διαφορά παρουσιάζει η πτώση των δύο παραπάνω αντικειμένων μέσα στο σωλήνα; Δώστε ερμηνεία.

(II) Πραγματοποίησε το πείραμα που περιγράφηκε στην παράγραφο για τον κανόνα του Lenz (σχήμα 2.109).

(III) Τοποθετήστε ένα πηνίο 300 σπειρών στο ένα σκέλος ενός πυρήνα, όπως φαίνεται στο σχήμα. Στο σκέλος που υπάρχει το πηνίο



περάστε ένα δακτύλιο από αλουμίνιο. Τροφοδοτείτε το πηνίο από συνεχή τάση περίπου 30 V, μέσω διακόπτη μπουτόν.

Τί παρατηρείτε μόλις κλείστε το διακόπτη; Επαναλάβετε ύστερα το πείραμα με δακτύλιο που έχει εγκοπή (να μην εφάπτονται τα άκρα της εγκοπής). Τί παρατηρείτε; Δώστε ερμηνεία.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΗΣ

Προσπαθείστε να πραγματοποιήσετε τα πειράματα που περιγράφηκαν στην παράγραφο για την αυτεπαγωγή (σχήματα 2.132 και 2.133) με χρήση των παρακάτω

- Μπαταρίες 4,5 V
- Λαμπτήρες 3,5 V.
- Διακόπτες μπουτόν
- Πηνία 300 σπειρών με πυρήνα
- Ροοστάτες (10 Ω, 5 A)

4. ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ

(I) Θέστε σε λειτουργία τον ηλεκτρικό κινητήρα του εργαστηρίου του σχολείου σας. Πειραματιστείτε αλλάζοντας την πολικότητα του πεταλοειδή μαγνήτη και την πολικότητα της τάσης τροφοδοσίας.

(II) Με τα παρακάτω υλικά (και ότι άλλο νομίζετε) μπορείτε να κατασκευάσετε έναν απλό κινητήρα;

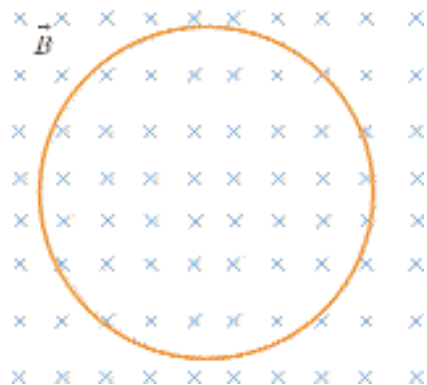
- Δύο μαγνήτες σχήματος ορθογωνίου με πόλους τις επιφάνειες μεγάλου εμβαδού.
- Σύρμα μονόκλωνο (μονωμένο) διαμέτρου 0,3 mm.
- Ένα καρφί μήκους 10 cm και διαμέτρου 3 mm
- 50 cm μεταλλικό τσέρκι συσκευασίας.
- Ένα κυλινδρικό κομμάτι ξύλου διαμέτρου περίπου 20 mm και μήκους 1,5 cm.
- Δύο κομμάτια αλουμινόχαρτο.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1

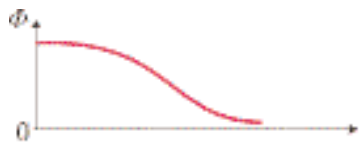
Ένας μεταλλικός δακτύλιος βρίσκεται τοποθετημένος μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με το επίπεδο του κάθετο στις μαγνητικές γραμμές, όπως φαίνεται στο σχήμα. Το πεδίο B αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο. Ποιά (ποιές) από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή (σωστές).

- (α) Η επαγόμενη ΗΕΔ στο δακτύλιο έχει σταθερή τιμή
- (β) Το επαγόμενο ρεύμα στο δακτύλιο έχει τη φορά κίνησης των δεικτών του ρολογιού.

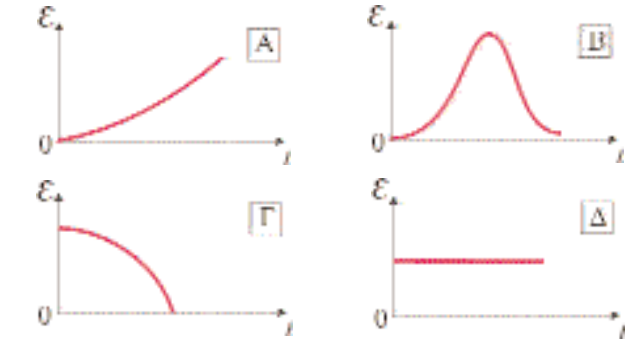


(γ) Στο δακτύλιο καταναλίσκεται ενέργεια (λόγω φαινομένου Joule) με σταθερό ρυθμό.

2



Στο σχήμα φαίνεται η μεταβολή της μαγνητικής ροής, που διέρχεται από ένα μεταλλικό πλαίσιο, με το χρόνο. Ποιό από τα παρακάτω διαγράμματα παριστάνει καλύτερα την επαγόμενη ΗΕΔ στο πλαίσιο, συναρτήσει του χρόνου;

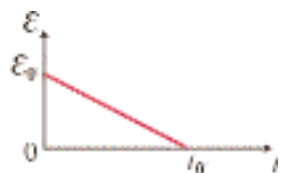


3

Ο κανόνας του Lenz είναι συνέπεια της αρχής διατήρησης

- (α) της ορμής
- (β) της μάζας
- (γ) της ενέργειας
- (δ) του φορτίου

4



Στο διάγραμμα παριστάνεται η επαγόμενη ΗΕΔ σ' ένα πλαίσιο, συναρτήσει του χρόνου. Η μεταβολή της διερχόμενης απ' το πλαίσιο ροής $|\Delta\Phi|$, στο χρονικό διάστημα από 0 έως t_0 είναι:

- (α) $\frac{\epsilon_0 t_0}{2}$
- (β) ϵ
- (γ) $\frac{\epsilon_0}{t_0}$
- (δ) $2\epsilon_0 t_0$

5

Αυτοκίνητο κινείται σε οριζόντιο δρόμο στο βόρειο ημισφαίριο, όπου το πεδίο \vec{B} της Γης έχει δύο συνιστώσες, την οριζόντια \vec{B}_0 και την κατακόρυφη \vec{B}_x με φορά προς τα κάτω. Το κατακόρυφο επίπεδο στο οποίο ανήκει ο φορέας του \vec{B} , ονομάζεται μαγνητικός μεσημβρινός. Ποιά (ποιές) από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή (σωστές).

(α) Κατά μήκος του προφυλακτήρα του αυτοκινήτου επάγεται ΗΕΔ, η οποία δεν εξαρτάται από τη γεωγραφική διεύθυνση κίνησης.

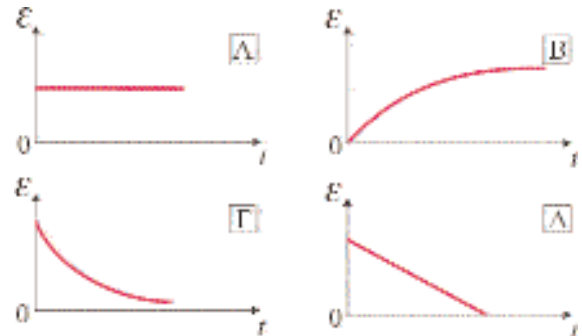
(β) Κατά μήκος της (κατακόρυφης) κεραίας του αυτοκινήτου επάγεται ΗΕΔ, η οποία δεν εξαρτάται από τη γεωγραφική διεύθυνση κίνησης.

(γ) Η επαγόμενη ΗΕΔ σ' ένα οριζόντιο κυκλικό μεταλλικό πλαίσιο, που βρίσκεται πάνω σε κάθισμα του αυτοκινήτου είναι μηδέν.

6



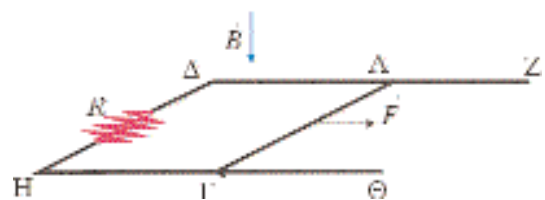
Μεταλλική ράβδος κινείται με σταθερή ταχύτητα \vec{v} , απομακρυνόμενη από ένα ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό απείρου μήκους, όπως στο σχήμα. Η ράβδος είναι συνεχώς παράλληλη με το ρευματοφόρο αγωγό. Ποιό από τα παρακάτω διαγράμματα παριστάνει την ΗΕΔ στη ράβδο, συναρτήσει του



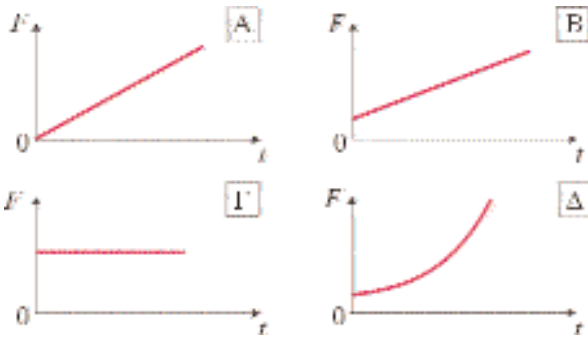
χρόνου;

7

Δύο παράλληλα οριζόντια σύρματα ΔΖ, ΗΘ με αμελητέα αντίσταση, ενώνονται στα Δ, Η με σύρμα

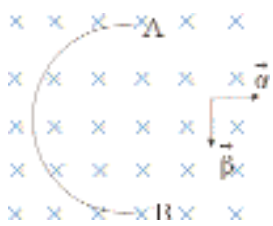


αντίστασης R . Πάνω στα σύρματα ΔΖ και ΗΘ τοποθετείται αγωγός ΑΓ, όπως στο σχήμα. Το επίπεδο της διάταξης είναι οριζόντιο και αυτή βρίσκεται μέσα σε κατακόρυφο ομογενές μαγνητικό πεδίο. Ο αγωγός ΑΓ αρχικά είναι ακίνητος. Τη στιγμή $t = 0$ αρχίζουμε να ασκούμε δύναμη \vec{F} , όπως στο σχήμα, ώστε ο αγωγός ΑΓ να ολισθαίνει με σταθερή επιτάχυνση. Οι τριβές είναι αμελητέες και ο αγωγός ΑΓ μετατοπίζεται παράλληλα προς τον εαυτό του, ευρισκόμενος σε επαφή συνεχώς με τα σύρματα ΔΖ και ΗΘ. Ποιό απ' τα παρακάτω



διαγράμματα παριστάνει το μέτρο της δύναμης \vec{F} , συναρτήσει του χρόνου.

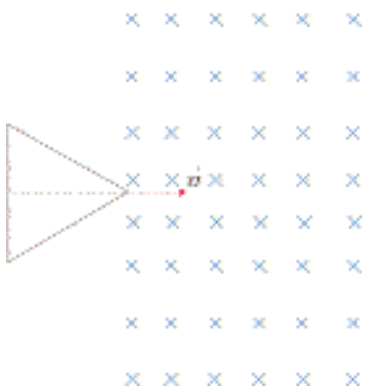
8



Συρμάτινο ημικύκλιο κινείται με σταθερή ταχύτητα μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, έχοντας το επίπεδό του συνεχώς κάθετο στις μαγνητικές γραμμές, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η επαγόμενη ΗΕΔ μεταξύ των Α, Β είναι μεγαλύτερη, όταν η ταχύτητα έχει την κατεύθυνση του διανύσματος \vec{a} ή του $\vec{\beta}$ και γιατί;

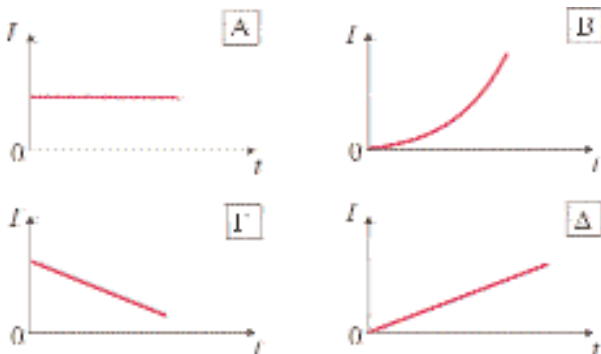
Η επαγόμενη ΗΕΔ μεταξύ των Α, Β είναι μεγαλύτερη, όταν η ταχύτητα έχει την κατεύθυνση του διανύσματος \vec{a} ή του $\vec{\beta}$ και γιατί;

9

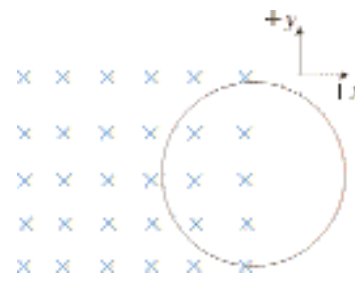


Συρμάτινο πλαίσιο σχήματος ισοπλευρού τριγώνου αρχίζει τη στιγμή $t = 0$ να εισέρχεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο. Η ταχύτητα του πλαισίου είναι συνεχώς σταθερή

και έχει την διεύθυνση ενός ύψους του τριγώνου. Ποιά απ' τα παρακάτω διαγράμματα παριστάνει το ρεύμα που διαρρέει το πλαίσιο, συναρτήσει του χρόνου;



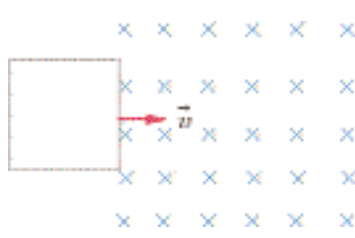
10



Ένα κυκλικό μεταλλικό πλαίσιο βρίσκεται εν μέρει μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, όπως φαίνεται στο σχήμα. Το επαγόμενο ρεύμα στο πλαίσιο θα έχει τη φορά κίνησης των δεικτών του ρολογιού, εφόσον αυτό κινηθεί προς την κατεύθυνση

- (α) +x (γ) -y
- (β) +y (δ) -x

11



Συρμάτινο τετραγωνικό πλαίσιο κινείται συνεχώς με σταθερή ταχύτητα \vec{v} και τη στιγμή $t = 0$ αρχίζει να εισέρχεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο,

έχοντας το επίπεδό του κάθετο στις μαγνητικές γραμμές. Το φορτίο που θα περάσει από μια διατομή του πλαισίου, από τη στιγμή $t = 0$ έως τη στιγμή που θα βρεθεί ολόκληρο μέσα στο μαγνητικό πεδίο, είναι:

- (α) Ανάλογο της αντίστασης του πλαισίου
- (β) Ανάλογο της ταχύτητας v
- (γ) Ανεξάρτητο από το εμβαδόν του πλαισίου
- (δ) Ανεξάρτητο από το χρόνο εισόδου

12

Ποιά (ποιές) από τις παρακάτω προτάσεις που αναφέρονται στον δίσκο του Faraday (ομοπολική γεννήτρια) του σχήματος 2.122 είναι σωστή (σωστές).

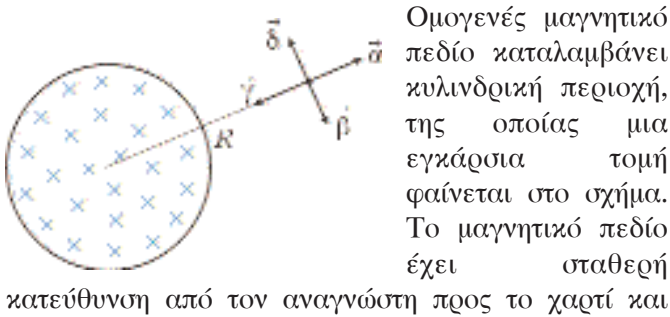
- (α) Αν αντιστραφεί η φορά περιστροφής του δίσκου, αντιστρέφεται και η φορά του ρεύματος.
- (β) Αν αυξηθεί η συχνότητα περιστροφής του δίσκου, το ρεύμα μειώνεται.
- (γ) Στο δίσκο αναπτύσσεται μαγνητική δύναμη, η οποία αντιτίθεται στην κίνησή του.
- (δ) Αν αντιστραφεί η φορά του μαγνητικού πεδίου, χωρίς να αντιστραφεί η φορά περιστροφής του δίσκου, θα αντιστραφεί η φορά της μαγνητικής δύναμης, που ασκείται στο δίσκο.

13

Λεπτή ράβδος είναι η μισή πλαστική και η μισή μεταλλική. Η ράβδος στρέφεται γύρω από άξονα, κάθετο σ' αυτή, με σταθερή συχνότητα, κόβοντας κάθετα τις γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου. Η επαγόμενη

ΗΕΔ στο μεταλλικό τμήμα είναι μεγαλύτερη, όταν ο άξονας περιστροφής περνά από το πλαστικό ή από το μεταλλικό άκρο της ράβδου.
Δικαιολογείτε την απάντησή σας.

14

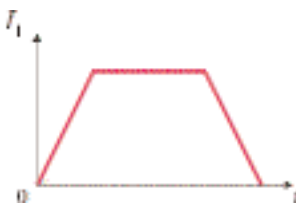


Ομογενές μαγνητικό πεδίο καταλαμβάνει κυλινδρική περιοχή, της οποίας μια εγκάρσια τομή φαίνεται στο σχήμα. Το μαγνητικό πεδίο έχει σταθερή κατεύθυνση από τον αναγνώστη προς το χαρτί και

μειώνεται με σταθερό ρυθμό $\frac{\Delta B}{\Delta t} < 0$.

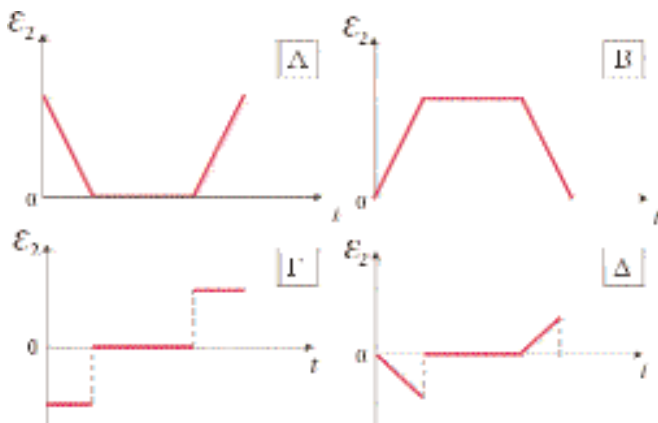
Ποιά από τα διανύσματα \vec{a} , $\vec{\beta}$, $\vec{\gamma}$, $\vec{\delta}$, παριστάνει την ένταση του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου, σε απόσταση R από τον άξονα της κυλινδρικής περιοχής;

15



Δύο πηνία βρίσκονται σε επαγωγική σύζευξη. Το ένα πηνίο διαρρέεται από ρεύμα I_1 , που μεταβάλλεται με το χρόνο σύμφωνα με το δοσμένο διάγραμμα.

Ποιά από τα παρακάτω διαγράμματα παριστάνει την ΗΕΔ που επάγεται στο δεύτερο πηνίο, συναρτήσει του χρόνου;



16

Δύο πηνία Π_1 , Π_2 βρίσκονται σε επαγωγική σύζευξη. Το Π_1 έχει αντεπαγωγή $L_1 = 33 \text{ mH}$. Όταν το Π_1 διαρρέεται από ρεύμα, διέρχεται απ' αυτό μαγνητική

ροή Φ_1 , ενώ από το Π_2 διέρχεται ροή $\Phi_2 = \Phi_1/3$. Ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής των πηνίων είναι:

- (α) 99 mH
- (β) 11 mH
- (γ) 33 mH
- (δ) 66 mH

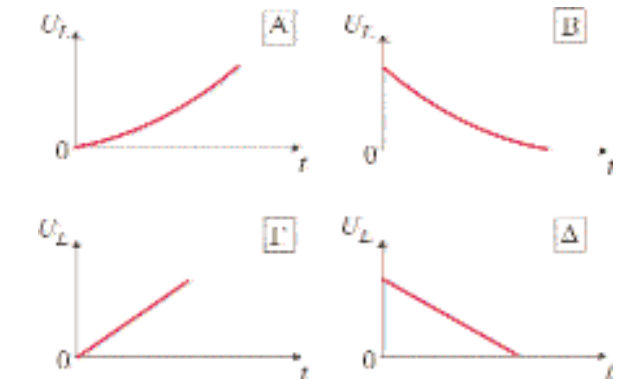
17

Σωληνοειδές πηνίο, μήκους ℓ , έχει συντελεστή αντεπαγωγής L . Κόβουμε ένα κομμάτι μήκους $\ell' = \ell/3$ από το αρχικό σωληνοειδές. Ο συντελεστής αντεπαγωγής του κομματιού μήκους ℓ' είναι:

- (α) $\frac{L}{3}$
- (β) $3L$
- (γ) $\frac{L}{9}$
- (δ) $9L$

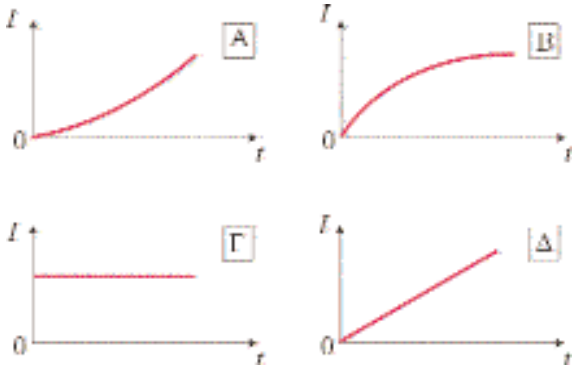
18

Στο διάγραμμα παριστάνεται το ρεύμα που διαρρέει ένα πηνίο συναρτήσει του χρόνου. Ποιά από τα παρακάτω διαγράμματα παριστάνει την ενέργεια U_L , που είναι αποθηκευμένη στο πηνίο, συναρτήσει του χρόνου;



19

Στα άκρα ιδανικού πηνίου εφαρμόζουμε τη στιγμή $t = 0$ σταθερή τάση. Ποιά απ' τα παρακάτω διαγράμματα παριστάνει το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο, συναρτήσει του χρόνου;



20

Η τάση που λαμβάνουμε από μια γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος έχει τη μορφή

$$v = 110 \sin(157t) \text{ [} v \text{ σε V και } t \text{ σε s]}$$

Αν διπλασιαστεί η συχνότητα περιστροφής του πλαισίου της γεννήτριας, η τάση (σε V), συναρτήσει του χρόνου (σε s) θα δίνεται απ' τη σχέση:

- (α) $v = 11 \sin 157t$
- (β) $v = 110 \sin 314t$
- (γ) $v = 220 \sin 314t$
- (δ) $v = 220 \sin 157t$

21

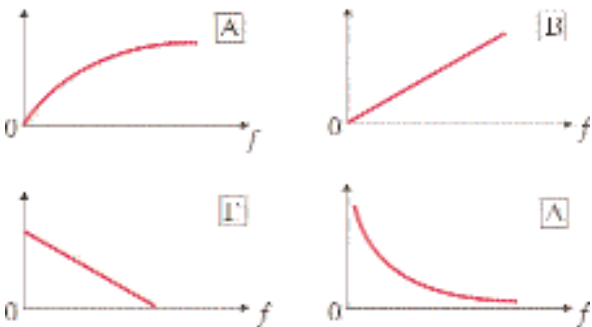
Σε ένα αντιστάτη, που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, καταναλώνεται σε 1h ενέργεια W . Η ίδια ενέργεια καταναλώνεται στον ίδιο αντιστάτη, αν αυτός διαρρέεται από σταθερό ρεύμα, ίσο με το πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος, σε χρόνο

- (α) 1h (β) 2h
- (γ) $\frac{1}{4}$ h (δ) $\frac{1}{2}$ h

22

Ιδανικό πηνίο τροφοδοτείται από εναλλασσόμενη τάση $v = V \sin(2\pi ft)$

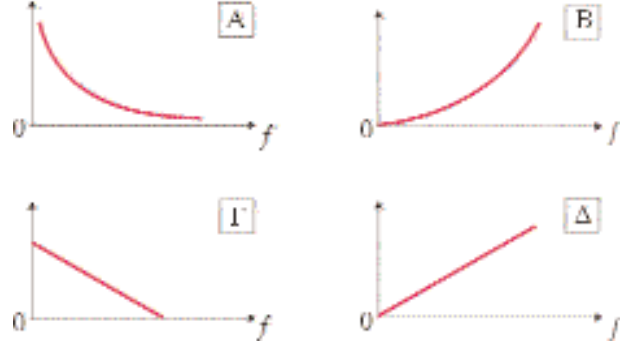
της οποίας το πλάτος V παραμένει σταθερό, ενώ η συχνότητα f μεταβάλλεται. Ποιό απ' τα παρακάτω διαγράμματα παριστάνει την επαγωγική αντίσταση



X_L του πηνίου και ποιό το πλάτος I του ρεύματος, που το διαρρέει, συναρτήσει της συχνότητας f ;

23

Ιδανικός πυκνωτής τροφοδοτείται από τάση $v_C = V \sin \omega t$. Ποιό απ' τα παρακάτω διαγράμματα παριστάνει την



χωρητική αντίσταση X_C του πυκνωτή και ποιό το πλάτος του ρεύματος I , συναρτήσει της συχνότητας f ;

24

Αντιστάτης, πηνίο και πυκνωτής συνδέονται σε σειρά και τροφοδοτούνται από τάση

$$v = V \sin \omega t$$

Το πλάτος V παραμένει σταθερό, ενώ η κυκλική συχνότητα ω μεταβάλλεται. Να γίνουν στο ίδιο σύστημα αξόνων τα διαγράμματα των συναρτήσεων

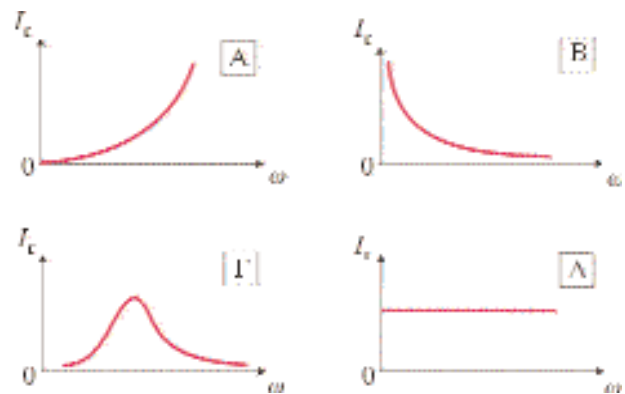
$$R = f_1(\omega), X_L = f_2(\omega), Z_C = f_3(\omega), Z = f(\omega),$$

όπου R η ωμική, X_L η επαγωγική, Z_C η χωρητική και Z η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος.

25

Αντιστάτης, πηνίο και πυκνωτής συνδέονται σε σειρά και τροφοδοτούνται από τάση $v = V \sin \omega t$.

Το πλάτος V παραμένει σταθερό, ενώ η κυκλική συχνότητα ω μεταβάλλεται. Ποιό απ' τα παρακάτω διαγράμματα παριστάνει την ενεργό τιμή του ρεύματος, συναρτήσει της ω ;



26

Ένα εργοστάσιο, εκτός από λυχνίες πυρακτώσεως με ωμικές αντιστάσεις, χρησιμοποιεί και κινητήρες και γενικώς συσκευές με αυτεπαγωγή. Υποθέστε ότι ένα συγκρότημα κατοικιών έχει μόνο συσκευές με ωμική εσωτερική αντίσταση. Ποιά εγκατάσταση από τις δύο “επιβαρύνει” περισσότερο την ΔΕΗ, που τους παρέχει “ρεύμα”;
Υποθέστε ότι η κατανάλωση του εργοστασίου και του συγκροτήματος κατοικιών είναι ίδια. Επίσης οι “τάσεις” είναι ίδιες.

27

Σε κύκλωμα εναλλασσομένου ρεύματος $R-L-C$ σε σειρά, το ρεύμα υστερεί της τάσης. Για να πετύχουμε συντονισμό, πρέπει
(α) Να ελαττωθεί η R
(β) Να αυξηθεί η C
(γ) Να ελαττωθεί η συχνότητα f
(δ) Να αυξηθεί η αυτεπαγωγή L

28

Κύκλωμα εναλλασσομένου ρεύματος $R-L-C$ σε σειρά βρίσκεται σε συντονισμό. Δείξτε ότι το άθροισμα των αποθηκευμένων ενεργειών στο πηνίο και τον πυκνωτή είναι σταθερό με το χρόνο.

29

Στα άκρα πυκνωτή εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση με εξίσωση

$$v = V \sin \omega t$$

Ποιά (ποιές) από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή (σωστές)

- (α) Ο ρυθμός μεταβολής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου του πυκνωτή είναι μηδέν, την στιγμή κατά την οποία είναι και το ρεύμα μηδέν

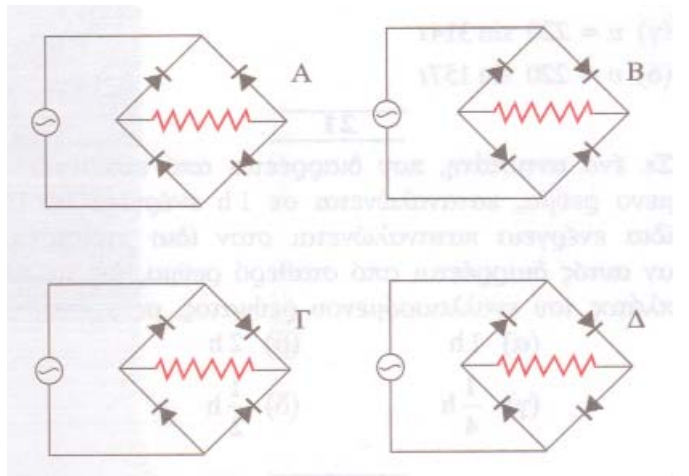
- (β) Η ενέργεια που αποταμιεύεται στον πυκνωτή από την στιγμή $t = 0$, έως την στιγμή $T/4$ είναι μηδέν
(γ) Η μέση ισχύς, που καταναλώνει ο πυκνωτής, είναι μηδέν
(δ) Η εμπέδηση του πυκνωτή είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας

30

Σε κύκλωμα εναλλασσομένου ρεύματος $R-L-C$ σε σειρά έχουμε δύο τιμές της κυκλικής συχνότητας ω_1, ω_2 , για τις οποίες η ενεργός τιμή του ρεύματος παίρνει τη μισή τιμή αυτής που παίρνει κατά το συντονισμό. Η διαφορά $|\omega_1 - \omega_2|$ ονομάζεται εύρος συντονισμού. Δείξτε ότι το εύρος συντονισμού είναι ανάλογο της R .

31

Ποιά απ' τις παρακάτω διατάξεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για να πάρουμε πλήρως ανορθωμένο ρεύμα στον αντιστάτη;



ΑΣΚΗΣΕΙΣ - ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

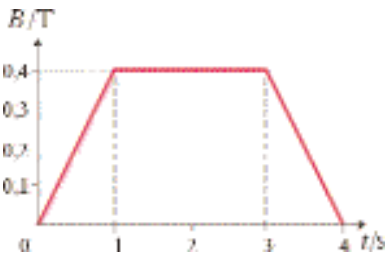
1

Συρμάτινο πλαίσιο αποτελείται από 100 σπείρες εμβαδού $0,40 \text{ m}^2$. Το πλαίσιο είναι τοποθετημένο μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο μέτρου $B = 0,50 \text{ T}$, με το επίπεδό του κάθετο στις μαγνητικές γραμμές. Ποιά η μέση επαγόμενη ΗΕΔ στο πλαίσιο, αν στραφεί σε χρόνο $0,80 \text{ s}$, γύρω από μία διάμετρό του, κατά 90° .

2

Συρμάτινο τετραγωνικό πλαίσιο, πλευράς $a = 0,30 \text{ m}$, βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, με το επίπεδό του κάθετο στις μαγνητικές γραμμές. Το πεδίο \vec{B} έχει σταθερή κατεύθυνση, ενώ το μέτρο του αυξάνεται με σταθερό ρυθμό $2,0 \text{ T/s}$. Αν η αντίσταση του πλαισίου είναι $3,0 \Omega$, να βρεθεί το επαγόμενο ρεύμα στο πλαίσιο.

3



Μεταλλικό πλαίσιο, εμβαδού $0,40 \text{ m}^2$ και αντίστασης $0,50 \Omega$, βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, το οποίο έχει σταθερή κα-

τεύθυνση και το μέτρο του μεταβάλλεται με το χρόνο, όπως φαίνεται στο διάγραμμα.

Το επίπεδο του πλαισίου σχηματίζει με τις μαγνητικές γραμμές γωνία 30° . Να γίνει το διάγραμμα $I = f(t)$ για $0 \leq t \leq 4,0 \text{ s}$, όπου I το ρεύμα που διαρρέει το πλαίσιο.

4

Πηνίο αποτελείται από 500 σπείρες, που η κάθε μία έχει εμβαδόν 10 cm^2 . Το πηνίο έχει αντίσταση $4,0 \Omega$ και συνδέεται με βαλυστικό γαλβανόμετρο αντίστασης $2,0 \Omega$. Το πηνίο βρίσκεται ανάμεσα στους πόλους ηλεκτρομαγνήτη με το επίπεδο των σπειρών κάθετο στις μαγνητικές γραμμές. Να βρεθεί το πεδίο \vec{B} του ηλεκτρομαγνήτη, αν με περιστροφή του πηνίου κατά 90° (ώστε το επίπεδο των σπειρών να γίνει παράλληλο με τις γραμμές), από το γαλβανόμετρο διέρχεται φορτίο $0,030 \text{ C}$.

5

Σωληνοειδές πηνίο έχει 100 σπείρες, μήκος 10 cm και διαρρέεται από ρεύμα 20 A . Στο εσωτερικό του σωληνοειδούς υπάρχει κυκλικό πλαίσιο με το επίπεδό του κάθετο στον άξονα του σωληνοειδούς. Το κυκλικό πλαίσιο έχει διάμετρο $2,0 \text{ cm}$, αντίσταση $5,0 \Omega$ και 10 σπείρες. Αν διακοπεί το ρεύμα στο σωληνοειδές να βρεθεί το φορτίο που θα περάσει από μια διατομή του σύρματος του πλαισίου. ($\pi^2 \approx 10$)

6

Το ορθογώνιο συρμάτινο πλαίσιο ΑΚΓΔ του σχήματος έχει διαστάσεις $(ΑΚ) = 1 \text{ m}$ (ακριβώς),



(ΚΓ) = $4,25 \text{ m}$ και παρουσιάζει αντίσταση $1 \Omega/\text{m}$ (ακριβώς). Το επίπεδο του πλαισίου είναι κάθετο στις γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου $B = 1 \text{ T}$ (ακριβώς). Το σύρμα (ΖΘ) είναι όμοιο με το σύρμα του πλαισίου και κινείται, όπως φαίνεται στο σχήμα, με σταθερή ταχύτητα $v = 1 \text{ m/s}$ (ακριβώς). Να βρεθούν τα ρεύματα που διαρρέουν τους κλάδους του κυκλώματος, τη στιγμή που είναι $(ΚΖ) = 1,25 \text{ m}$.

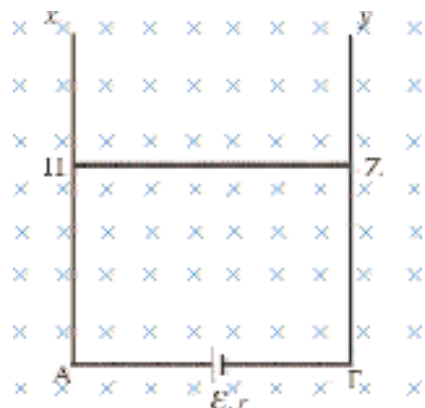
7

Δύο παράλληλες σιδερένιες ράβδοι απέχουν μεταξύ τους απόσταση $\ell = 1,0 \text{ m}$ και σχηματίζουν με τον οριζόντια γωνία $\theta = 30^\circ$. Οι δύο ράβδοι έχουν αμελητέα αντίσταση και συνδέονται στο κάτω άκρο τους με σύρμα αντίστασης $R_1 = 2,0 \Omega$. Από το πάνω άκρο των ράβδων αφήνουμε να ολισθήσει, χωρίς τριβή, κατά μήκος τους ένας πρισματικός αγωγός μήκους $\ell = 1,0 \text{ m}$ με μάζα $0,1 \text{ kg}$ και αντίσταση $R_2 = 0,50 \Omega$. Τα άκρα του αγωγού εφάπτονται συνεχώς στις ράβδους. Η διάταξη βρίσκεται μέσα σε οριζόντιο ομογενές μαγνητικό πεδίο $B = 1,0 \text{ T}$, του οποίου οι γραμμές είναι κάθετες στον αγωγό. Να βρεθούν:

- (α) Η σταθερή ταχύτητα που θα αποκτήσει ο αγωγός.
- (β) Η τάση στα άκρα του αγωγού όταν έχει αποκτήσει σταθερή ταχύτητα ($g = 10 \text{ m/s}^2$).

8

Δύο κατακόρυφοι παράλληλοι αγωγοί Αx, Γy αμελητέας αντίστασης ενώνονται στα Α, Γ με τους πόλους πηγής με ΗΕΔ $\mathcal{E} = 10 \text{ V}$ και εσωτερική αντίσταση $r = 1,0 \Omega$, όπως φαίνεται στο σχήμα. Ο αγωγός ΗΖ έχει μήκος $\ell = 1,0 \text{ m}$, μάζα $m = 0,10 \text{ kg}$, αντίσταση $R = 4,0 \Omega$ και μπορεί να ολισθαίνει, χωρίς τριβές, με τα άκρα του σε επαφή με τους αγωγούς Αx και Γy. Το επίπεδο της διάταξης είναι κάθετο



στις γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου με $B = 1,0 \text{ T}$. Δίνεται ακόμα $g = 10 \text{ m/s}^2$. Ο αγωγός ΗΖ κρατείται ακίνητος. Αν αφαιρεθεί, δείξτε ότι θα κινηθεί προς τα πάνω και ότι θα αποκτήσει σταθερή ταχύτητα, την οποία να υπολογίσετε. Να γίνει ακόμα το διάγραμμα $F_L = f(v)$, όπου F_L το μέτρο της δύναμης Laplace, που ασκείται στον αγωγό ΗΖ και v το μέτρο της ταχύτητάς του.

9

Ορθογώνιο μεταλλικό πλαίσιο με διαστάσεις $a = 1,0 \text{ m}$, $b = 2,0 \text{ m}$, συνολικής αντίστασης $R = 10 \Omega$, κινείται συνεχώς με σταθερή ταχύτητα $v = 10 \text{ m/s}$, παράλληλη προς τη διάσταση b .

Τη στιγμή $t = 0$ το πλαίσιο αρχίζει να εισέρχεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο $B = 1,0 \text{ T}$, με το επίπεδό του κάθετο στις γραμμές. Το πεδίο εκτείνεται σε μήκος $4,0 \text{ m}$ κατά τη διεύθυνση της ταχύτητας.

- (α) Να βρεθούν οι συναρτήσεις $\Phi = f(t)$ και $I = g(t)$ και να γίνουν τα αντίστοιχα διαγράμματα, απ' τη στιγμή $t = 0$ ως τη στιγμή που το πλαίσιο εξέρχεται ολόκληρο από το πεδίο. Με Φ συμβολίζουμε τη μαγνητική ροή που διέρχεται από το πλαίσιο και με I το ρεύμα που το διαρρέει.
- (β) Να βρεθούν στη διάρκεια της εισόδου του πλαισίου στο πεδίο το έργο της δύναμης Laplace που ασκείται στο πλαίσιο και η ενέργεια Joule (Τζουλ).

10

Μεταλλική ράβδος μήκους $\ell = 1,00 \text{ m}$, περιστρέφεται γύρω από άξονα κάθετο σ' αυτή, που διέρχεται από ένα σημείο της, το οποίο τη διαιρεί σε δύο τμήματα με μήκη ℓ_1 , ℓ_2 , ώστε $\frac{\ell_1}{\ell_2} = \frac{2}{3}$. Η ράβδος βρί-

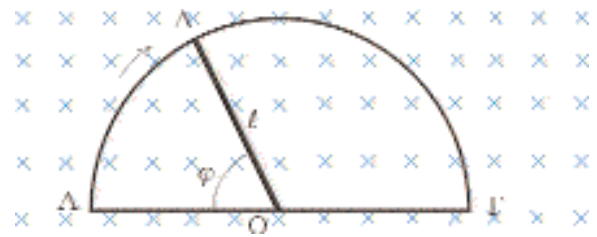
σκεται συνεχώς ολόκληρη μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με $B = 1,00 \text{ T}$, του οποίου οι γραμμές σχηματίζουν γωνία 60° με τον άξονα περιστροφής. Αν η συχνότητα περιστροφής είναι $f = 50,0 \text{ Hz}$, να βρεθεί η διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων της ράβδου.

11

Ράβδος ΟΓ στρέφεται γύρω από άξονα κάθετο σ' αυτή, που περνά απ' το Ο, με συχνότητα $50,0 \text{ Hz}$ μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με $B = 1,00 \text{ T}$. Οι γραμμές του πεδίου είναι παράλληλες με τον άξονα περιστροφής της ράβδου. Η ράβδος είναι κατά τμήμα (ΟΑ) = $40,0 \text{ cm}$ πλαστική και κατά τμήμα (ΑΓ) = $60,0 \text{ cm}$ μεταλλική. Να βρεθεί επαγόμενη ΗΕΔ στο μεταλλικό τμήμα.

12

Η συρμάτινη ημπεριφέρεια του σχήματος παρουσιάζει αντίσταση $2,0 \Omega/\text{m}$, ενώ το διαμετρικό σύρμα ΑΓ έχει αμελητέα αντίσταση. Μια μεταλλική ράβδος ΟΔ με



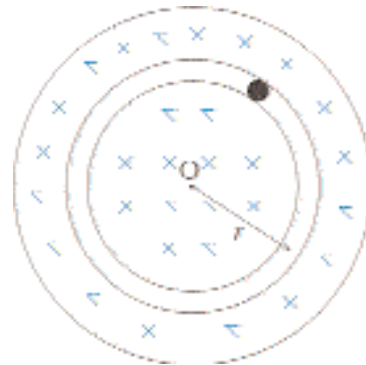
μήκος $\ell = 0,50 \text{ m}$ και αμελητέα αντίσταση στρέφεται γύρω από το κέντρο Ο της ημπεριφέρειας έχοντας το άλλο άκρο της Δ συνέχεια σε επαφή με αυτή. Η συχνότητα περιστροφής της ράβδου είναι $3,0 \text{ Hz}$ και το επίπεδο της διάταξης είναι κάθετο στις γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου με $B = 1,0 \text{ T}$. Να βρεθεί το ρεύμα που διαρρέει τη ράβδο ΟΔ, τη στιγμή κατά την οποία η γωνία φ είναι 30° .

13

Σωληνοειδές έχει 20 σπείρες/cm, η ακτίνα κάθε σπείρας είναι $1,0 \text{ cm}$ και διαρρέεται από ρεύμα που αυξάνεται με ρυθμό 50 A/s . Γύρω από το κέντρο του σωληνοειδούς τοποθετείται κυκλικός αγωγός, ακτίνας $4,0 \text{ cm}$ με το επίπεδό του παράλληλο με το επίπεδο των σπειρών και το κέντρο του επί του άξονα του σωληνοειδούς. Η αντίσταση του κυκλικού αγωγού είναι $0,50 \Omega$. Να υπολογισθεί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε κάποιο σημείο του κυκλικού αγωγού και το ρεύμα που τον διαρρέει. Να κατασκευάσετε σχήμα, στο οποίο να φαίνεται η φορά των ρευμάτων στο σωληνοειδές και στον αγωγό.

14

Ένα καρακόρυφο ομογενές μαγνητικό πεδίο καλύπτει μια κυλινδρική περιοχή. Το πεδίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό $\frac{\Delta B}{\Delta t} = \lambda$, $\lambda > 0$.



Ένας οριζόντιος κούφιος δακτύλιος, ακτίνας r , βρίσκεται με το επίπεδό του κάθετο στις μαγνητικές γραμμές και το κέντρο του να ταυτίζεται με το κέντρο μιας οριζόντιας τομής της κυλινδρικής περιοχής. Στο εσωτερικό του δακτυλίου βρίσκεται μικρή σφαίρα, που φέρει αρνητικό φορτίο q και μπορεί να κινείται χωρίς τριβές.

- (α) Εξηγήστε, γιατί η σφαίρα επιταχύνεται.
- (β) Σημειώστε τη φορά προς την οποία θα κινηθεί η σφαίρα.
- (γ) Υπολογίστε την ενέργεια που κερδίζει σε κάθε περιστροφή η σφαίρα, συναρτήσει των r , λ , q .

15

Δύο πηνία Π_1 , Π_2 βρίσκονται σε επαγωγική σύζευξη. Το Π_1 διαρρέεται από ρεύμα 5,0 A. Το Π_2 έχει αντίσταση 80 Ω και στα άκρα του συνδέεται βαλλιστικό γαλβανόμετρο, αντίστασης 20 Ω . Αν διακοπεί το ρεύμα στο Π_1 , από το γαλβανόμετρο διέρχεται φορτίο 200 μC . Να βρεθεί ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής των πηνίων.

16

Σωληνοειδές πηνίο έχει 500 σπείρες και διατομή 5,0 cm^2 . Όταν διαρρέεται από ρεύμα 0,25 A, το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του είναι 0,20 T. Να βρεθεί ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου.

17

Ιδανικό πηνίο, με συντελεστή αυτεπαγωγής $L = 1,0 \text{ H}$, συνδέεται σε σειρά με αντιστάτη αντίστασης 4,0 Ω και το σύστημα αρχίζει να τροφοδοτείται τη στιγμή $t = 0$ από πηγή με ΗΕΔ $\mathcal{E} = 6,0 \text{ V}$ και αμελητέα εσωτερική αντίσταση. Να βρεθούν

- (α) Η τελική τιμή I_0 του ρεύματος
- (β) Ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος, την στιγμή που αυτό είναι $I = I_0/3$.

18

Κινητήρας γερανού τροφοδοτείται από τάση 200 V. Όταν ο γερανός ανυψώνει ογκόλιθο 10^3 kg (ακριβώς) με ταχύτητα 7,2 m/min, ο ρότορας του κινητήρα του διαρρέεται από ρεύμα 12 A. Να βρεθεί η απόδοση του γερανού ($g = 10 \text{ m/s}^2$).

19

Ανεμιστήρας τροφοδοτείται από μπαταρία 12 V και ο ρότοράς του έχει αντίσταση 6,0 Ω . Όταν ο ανεμιστήρας στρέφεται με τη μέγιστη ταχύτητά του, το ρεύμα που διαρρέει το ρότορα είναι 0,50 A. Να βρεθούν

- (α) Το ρεύμα, που διαρρέει το ρότορα, τη στιγμή της εκκίνησης
- (β) Η αντιΗΕΔ του ανεμιστήρα

20

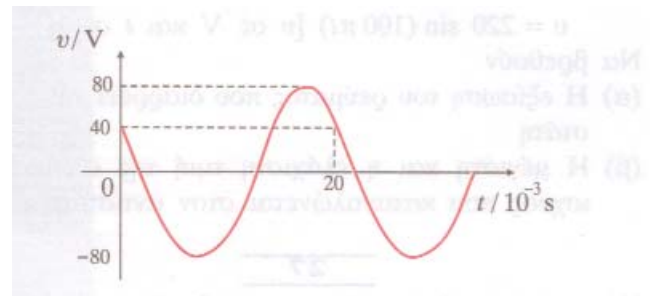
Το πλαίσιο μιας γεννήτριας εναλλασσομένου ρεύματος αποτελείται από 10 σπείρες, εμβαδού 0,10 m^2 και στρέφεται με συχνότητα 50 Hz μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο $B = 0,50 \text{ T}$. Να βρεθεί η μέγιστη τιμή της επαγόμενης ΗΕΔ.

21

Μεταλλικό τετραγωνικό πλαίσιο, πλευράς $a = 0,20 \text{ m}$, αποτελείται από 50 σπείρες και στρέφεται γύρω από κατακόρυφο άξονα, που ενώνει τα μέσα των δύο απέναντι πλευρών του, οι οποίες παραμένουν συνεχώς οριζόντιες. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής είναι σταθερή $\omega = 300 \text{ rad/s}$ και το πλαίσιο βρίσκεται μέσα σε οριζόντιο ομογενές μαγνητικό πεδίο με $B = 0,40 \text{ T}$. Τη στιγμή $t = 0$ το επίπεδο του πλαισίου είναι κάθετο στις μαγνητικές γραμμές. Να υπολογισθεί η επαγόμενη ΗΕΔ στο πλαίσιο, συναρτήσει του χρόνου.

22

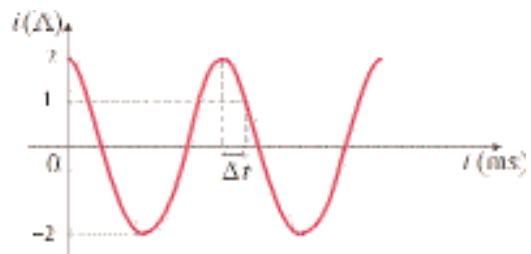
Στο διάγραμμα παριστάνεται η μεταβολή μιας εναλλασσόμενης τάσης συναρτήσει του χρόνου. Να βρεθεί η αντίστοιχη συνάρτηση $v = f(t)$



23

Στο διάγραμμα παριστάνεται ένα εναλλασσόμενο ρεύμα συναρτήσει του χρόνου. Αν $\Delta t = 1,0 \text{ ms}$, να βρεθούν

- (α) Η περίοδος T του ρεύματος

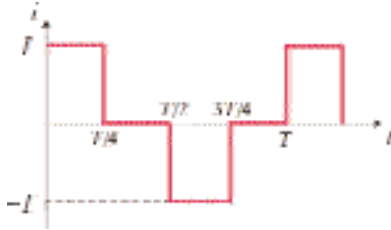


- (β) Η εξίσωση του ρεύματος
- (γ) Η τιμή του ρεύματος την στιγμή 25 ms

24

Δείξτε ότι το ρεύμα, που παριστάνεται στο διάγραμμα, έχει ίδια ενεργό τιμή με ένα ρεύμα της μορφής

$$i = I \sin \frac{2\pi}{T} t$$



25

Δίνεται ένα εναλλασσόμενο ρεύμα της μορφής

$$i = I \sin 100\pi t$$

Να βρεθεί η πρώτη χρονική στιγμή, μετά τη στιγμή $t = 0$, που ισχύει $i = I_r$.

26

Αντιστάτης με αντίσταση $R = 100 \Omega$ τροφοδοτείται από εναλλασσόμενη τάση της μορφής

$$v = 220 \sin (100\pi t) \text{ [} v \text{ σε V και } t \text{ σε s]}$$

Να βρεθούν

- (α) Η εξίσωση του ρεύματος που διαρρέει τον αντιστάτη
- (β) Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της στιγμιαίας ισχύος που καταναλώνεται στον αντιστάτη.

27

Η ενεργός τιμή της τάσης τροφοδοσίας των οικιών από το δίκτυο της ΔΕΗ είναι 220 V.

- (α) Ποιό το πλάτος της τάσης;
- (β) Πόση ενέργεια σε J και kWh καταναλώνει ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως, με αντίσταση 400Ω , όταν τροφοδοτείται από το δίκτυο της ΔΕΗ για 5,0 h

28

Πρόκειται να ζεστάνουμε 500 g νερού για να αυξήσουμε τη θερμοκρασία του κατά 50°C , με ένα ηλεκτρικό μπρίκι, το οποίο λειτουργεί κανονικά στο δίκτυο της ΔΕΗ ($V_r = 220 \text{ V}$). Το 80 % της ενέργειας, που καταναλώνει το μπρίκι προσφέρεται στο νερό. Αν ο απαιτούμενος χρόνος για τη θέρμανση του νερού είναι 10 min, να υπολογισθεί η τιμή της αντίστασης του μπρικιού. Δίνονται: $1 \text{ J} = 0,24 \text{ cal}$ και για το νερό $c = 1 \text{ cal/g K}$.

29

Ιδανικό πηνίο με αυτεπαγωγή $L=0,10 \text{ H}$ τροφοδοτείται από τάση $v = 200 \sin 500t$ [v σε V και t σε s].

Ποιά η τιμή του ρεύματος, που διαρρέει το πηνίο, τις χρονικές στιγμές που η τάση είναι 100 V;

30

Ιδανικό πηνίο τροφοδοτείται από τάση

$$v = 100\sqrt{2} \sin 200t \text{ [} v \text{ σε V, } t \text{ σε s]}$$

και η ενεργός τιμή του ρεύματος, που το διαρρέει, είναι 10 A. Να βρεθούν:

- (α) Η συνάρτηση $i = f(t)$, όπου i το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο.
- (β) Ο συντελεστής αυτεπαγωγής L του πηνίου.

31

Πυκνωτής χωρητικότητας $C = 10^{-4} \text{ F}$ (ακριβώς) τροφοδοτείται από τάση

$$v = V \sin 400t \text{ [S.I.]}$$

Μια στιγμή κατά την οποία είναι $v = 100 \text{ V}$, το ρεύμα είναι $i = 3,00 \text{ A}$. Να βρεθεί το πλάτος V της τάσης και η συνάρτηση $i = f(t)$.

32

Λαμπτήρας πυρακτώσεως, με αντίσταση $R_\lambda = 40 \Omega$, συνδέεται σε σειρά με πηνίο και το σύστημα τροφοδοτείται από εναλλασσόμενη τάση με $V_r = 117 \text{ V}$ και $\omega = 400 \text{ rad/s}$. Η ενεργός τιμή της τάσης στα άκρα του λαμπτήρα είναι 80 V και στα άκρα του πηνίου 50 V.

- (α) Να δεχθεί ότι το πηνίο δεν είναι ιδανικό και να βρεθούν η ωμική του αντίσταση R_Π και η αυτεπαγωγή του L
- (β) Να βρεθεί ο συντελεστής ισχύος του πηνίου και του κυκλώματος.
- (γ) Να υπολογισθεί η μέση ισχύς που δαπανάται στο λαμπτήρα, στο πηνίο και στο κύκλωμα.

33

Λαμπτήρας πυρακτώσεως αναγράφει τα στοιχεία “160 V, 320 W” και πρόκειται να τροφοδοτηθεί από εναλλασσόμενη τάση με $V_r = 200 \text{ V}$ και $\omega = 400 \text{ rad/s}$. Να βρεθεί

- (α) Η τιμή της αντίστασης ενός αντιστάτη ή
- (β) Ο συντελεστής αυτεπαγωγής ενός ιδανικού πηνίου ή
- (γ) Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή που πρέπει να συνδεθεί σε σειρά με τον λαμπτήρα, ώστε αυτός να λειτουργεί κανονικά.

34

Σε ένα αδιαφανές κουτί μπορεί να υπάρχουν συνδεδεμένα σε σειρά τα στοιχεία R, L, C ή δύο μόνο απ' αυτά ή να υπάρχει ένα μόνο στοιχείο. Το σύστημα, που είναι μέσα στο κουτί, συνδέεται σε σειρά με πηνίο ωμικής αντίστασης 100Ω και αυτεπαγωγής $0,2 \text{ H}$ (ακριβώς). Στα άκρα του συστήματος κουτί-πηνίο εφαρμόζουμε

(α) Σταθερή τάση $V_1 = 160 \text{ V}$ και τότε το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα $I = 1 \text{ A}$ (ακριβώς)

(β) Εναλλασσόμενη τάση

$$v = 300\sqrt{2} \sin 400t \quad [v \text{ σε V}, t \text{ σε s}]$$

οπότε το κύκλωμα διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα με ενεργό τιμή $1,5 \text{ A}$. Να βρεθεί το είδος και η τιμή των στοιχείων που περιέχει το κουτί.

35

Πηνίο, με χαρακτηριστικά $R = 20,0 \Omega$ και $L = 0,200 \text{ H}$, συνδέεται σε σειρά με πυκνωτή χωρητικότητας $C = 20,0 \mu\text{F}$ και το σύστημα τροφοδοτείται από εναλλασσόμενη τάση με $V_r = 197 \text{ V}$ και $\omega = 400 \text{ rad/s}$.

(α) Να βρεθεί η μέση ισχύς που δαπανάται στο κύκλωμα.

(β) Να υπολογισθεί χωρητικότητα C_x ενός πυκνωτή που πρέπει να αντικαταστήσει τον αρχικό, ώστε να έχουμε συντονισμό. Ποιά η μέση ισχύς στο συντονισμό;

36

Πηνίο, πυκνωτής και αντιστάτης είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Στα άκρα του συστήματος εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση v , οπότε το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα είναι

$$i = 2,50 \sin 314t \quad [i \text{ σε A}, t \text{ σε s}]$$

Το πλάτος της τάσης στα άκρα του πηνίου είναι $50,0 \text{ V}$, στα άκρα του πυκνωτή $5,00 \text{ V}$ και στα άκρα του αντιστάτη $5,00 \text{ V}$. Στο πηνίο δαπανάται ενέργεια με μέσο ρυθμό $37,5 \text{ W}$. Να βρεθούν

(α) Η εμπέδηση του κυκλώματος

(β) Η συνάρτηση $v = f(t)$

(γ) Η τάση στα άκρα του πηνίου, του αντιστάτη και του πυκνωτή, συναρτήσει του χρόνου.

37

Να υπολογισθεί η ενεργός τιμή

(α) του ημιανορθωμένου

(β) του πλήρως ανορθωμένου, εναλλασσόμενου ρεύματος πλάτους I .

ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ ΟΡΩΝ

Αδιαβατική μεταβολή: Η μεταβολή ενός συστήματος κατά την οποία αυτό δεν ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον του.

Αμοιβαία επαγωγή: Το φαινόμενο της εμφάνισης ΗΕΔ σε ένα πηνίο όταν μεταβάλλεται το ρεύμα που διαρρέει κάποιο γειτονικό του πηνίο.

Ανόρθωση του εναλλασσόμενου ρεύματος: Η μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές.

Αντιστρεπτή μεταβολή: Η μεταβολή κατά την οποία επικρατεί συνεχώς κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας και η οποία μπορεί να διαγραφεί και κατά την αντίθετη φορά εκτελώντας τους εντελώς αντίστροφους χειρισμούς.

Αυτεπαγωγή: Το φαινόμενο κατά το οποίο επάγεται ΗΕΔ σε ένα πηνίο επειδή μεταβάλλεται το ρεύμα που διαρρέει το ίδιο το πηνίο.

Γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος: Διάταξη παραγωγής εναλλασσόμενης τάσης, που στηρίζεται στην περιστροφή πλαισίου μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος: Διάταξη παραγωγής τάσης με σταθερή πολικότητα.

Διηλεκτρικό: Ένα μονωτικό υλικό που μπορεί να παρεμβάλλεται μεταξύ των οπλισμών πυκνωτών. Δεν έχει ελεύθερα φορτία.

Δινορεύματα ή ρεύματα Foucault: Ρεύματα που δημιουργούνται στο εσωτερικό μεταλλικών πλακών οι οποίες βρίσκονται ακίνητες μέσα σε μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία ή κινούνται μέσα σε χρονικά αμετάβλητα ανομοιογενή μαγνητικά πεδία, ή συμβαίνουν και τα δύο παραπάνω.

Δύναμη του Laplace: Η δύναμη που ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό, ο οποίος βρίσκεται εντός μαγνητικού πεδίου.

Δυναμική ενέργεια φορτίου (ή μάζας): Η ενέργεια του φορτίου (ή της μάζας) λόγω της θέσης του (της) μέσα σε ηλεκτρικό (ή βαρυτικό) πεδίο.

Δυναμικό ηλεκτρικό (ή βαρυτικό): Ισούται με τη δυναμική ενέργεια ανά μονάδα φορτίου (ή μάζας) σε ένα σημείο του ηλεκτρικού (ή βαρυτικού) πεδίου.

Ειδική γραμμομοριακή θερμότητα ή γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα: Ισούται αριθμητικά με τη θερμότητα που πρέπει να απορροφήσει ένα mol από το υλικό, ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά ένα Κέλβιν.

Ειδική θερμοχωρητικότητα (θερμότητα) ενός υλικού: Ισούται αριθμητικά με τη θερμότητα που πρέπει να απορροφήσει η μονάδα μάζας ενός σώματος, ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία της κατά ένα Κέλβιν.

Εναλλασσόμενη τάση: Η τάση της οποίας η τιμή είναι αρμονική συνάρτηση του χρόνου.

Εναλλασσόμενο ρεύμα: Το ρεύμα του οποίου η τιμή είναι αρμονική συνάρτηση του χρόνου.

Ενεργός τιμή του εναλλασσόμενου ρεύματος: Ισούται με την τιμή του σταθερού ρεύματος, το οποίο όταν διαρρέει τον ίδιο αντιστάτη με το εναλλασσόμενο ρεύμα και στον ίδιο χρόνο, παρέχει την ίδια ενέργεια Joule. **Ενεργός τιμή της εναλλασσόμενης τάσης:** Ισούται με τη σταθερή τάση, η οποία όταν εφαρμοστεί στα άκρα ενός αντιστάτη αυτός θα διαρρέεται από σταθερό ρεύμα με τιμή ίση με την ενεργό τιμή του

εναλλασσόμενου ρεύματος, που θα διαρρέει τον αντιστάτη, εφόσον στα άκρα του εφαρμοστεί η εναλλασσόμενη τάση.

Εντροπία: Το μέτρο της αταξίας ενός συστήματος. Αυξάνεται όσο μειώνεται η ικανότητα του συστήματος για παραγωγή έργου. Είναι συνάρτηση της κατάστασης του συστήματος.

Εξισώσεις Maxwell: Οι εξισώσεις που περιγράφουν όλα τα φαινόμενα του ηλεκτρομαγνητισμού.

Επαγόμενα ηλεκτρικά πεδία: Τα ηλεκτρικά πεδία που οφείλονται σε μεταβολές της μαγνητικής ροής. Είναι μη συντηρητικά πεδία.

Εσωτερική ενέργεια συστήματος: Το άθροισμα όλων των κινητικών και δυναμικών ενεργειών των σωματίων που αποτελούν το σύστημα.

Ηλεκτρικός κινητήρας: Διάταξη μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική.

Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή: Το φαινόμενο της εμφάνισης ΗΕΔ σε ένα κύκλωμα όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από αυτό.

Θερμική μηχανή: Η μηχανή που μετατρέπει θερμότητα σε ωφέλιμο μηχανικό έργο.

Θερμοδυναμικά αξιώματα:

Πρώτο: Η αρχή διατήρησης της ενέργειας, όπως εφαρμόζεται σε θερμοδυναμικά συστήματα.

Δεύτερο: Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί θερμική μηχανή με απόδοση 100%, ή ισοδύναμα, δεν είναι δυνατόν να μεταφερθεί θερμότητα από ένα σώμα σε ένα άλλο θερμότερο σώμα χωρίς δαπάνη ενέργειας.

Θερμοδυναμική: Το κεφάλαιο της Φυσικής που μελετά τις ενεργειακές σχέσεις που περιλαμβάνουν θερμότητα, έργο, και άλλες

έννοιες που σχετίζονται με ενέργεια και τη διάδοσή της.

Θεώρημα ισοκατανομής της ενέργειας: Το θεώρημα που αναφέρει ότι η μέση ενέργεια ενός μορίου ισοκατανέμεται στους βαθμούς ελευθερίας.

Ιδανικό αέριο: Ένα θεωρητικό αέριο στο οποίο αποδίδονται ορισμένες ιδιότητες σε μικροσκοπική κλίμακα, ώστε με εφαρμογή της Νευτώνειας Μηχανικής, να είναι δυνατή η πρόβλεψη της μακροσκοπικής του συμπεριφοράς. Ένα πραγματικό αέριο θεωρείται ιδανικό όταν έχει πολύ μικρή πυκνότητα.

Κανόνας Lenz: Κανόνας προσδιορισμού της φοράς του επαγόμενου ρεύματος. Είναι συνέπεια της αρχής διατήρησης της ενέργειας.

Κατανομή Maxwell - Boltzmann: Η κατανομή των ταχυτήτων των μορίων μιας ποσότητας αερίου, σε ορισμένη θερμοκρασία.

Καταστατική εξίσωση των αερίων: Η εξίσωση που συνδέει την πίεση, τον όγκο και τη θερμοκρασία ορισμένης ποσότητας αερίου.

Κίνηση Brown: Η τυχαία (άτακτη) κίνηση μικροσκοπικών σωματίων που αιωρούνται σε ένα αέριο ή σε ένα υγρό.

Κινητική θεωρία των αερίων: Η θεωρία που εξάγει τις σχέσεις ανάμεσα στις μακροσκοπικές και τις μικροσκοπικές μεταβλητές, που περιγράφουν την συμπεριφορά μιας ποσότητας αερίου.

Κυκλοτρόνιο: Επιταχυντής φορτισμένων σωματιδίων.

Μετασχηματιστής: Η διάταξη με την οποία μπορούμε να ανυψώνουμε ή να υποβιβάζουμε την εναλλασσόμενη τάση.

Νόμος Ampere: Ο νόμος που δίνει το μαγνητικό πεδίο το οποίο οφείλεται σε ρευματοφόρους αγωγούς.

Νόμος Biot - Savart: Ο νόμος με τη βοήθεια του οποίου υπολογίζουμε το πεδίο ΔB , σ' ένα σημείο του μαγνητικού πεδίου, που οφείλεται σε ένα στοιχειώδες τμήμα ενός ρευματοφόρου αγωγού.

Νόμος Gauss: Ο νόμος που συνδέει την ποσότητα φορτίου που περικλείεται από μια κλειστή επιφάνεια με την ροή του ηλεκτρικού πεδίου που περνά από την επιφάνεια αυτή.

Νόμος μαγνητικής ροής: Αναφέρει ότι η ολική μαγνητική ροή που διέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια είναι μηδέν. Μας πληροφορεί ότι οι μαγνητικές γραμμές δεν έχουν αρχή και τέλος και ότι δεν υπάρχουν απομονωμένα μαγνητικά μονόπολα.

Πυκνωτής: Σύστημα αγωγών που βρίσκονται κοντά ο ένας στον άλλο και ανάμεσά τους μπορεί να παρεμβάλλεται μονωτικό υλικό. Ο πυκνωτής αποτελεί αποθήκη φορτίου και ενέργειας.

Ροή ηλεκτρικού πεδίου: Δίνει το πλήθος των δυναμικών γραμμών που περνούν από μια επιφάνεια, η οποία βρίσκεται μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο.

Ροή μαγνητικού πεδίου: Δίνει το πλήθος των

μαγνητικών γραμμών που διέρχονται από μια επιφάνεια, η οποία είναι τοποθετημένη μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

Τάση κορεσμένων ατμών: Η πίεση που ασκούν οι ατμοί ενός υγρού, όταν το υγρό και οι ατμοί βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία.

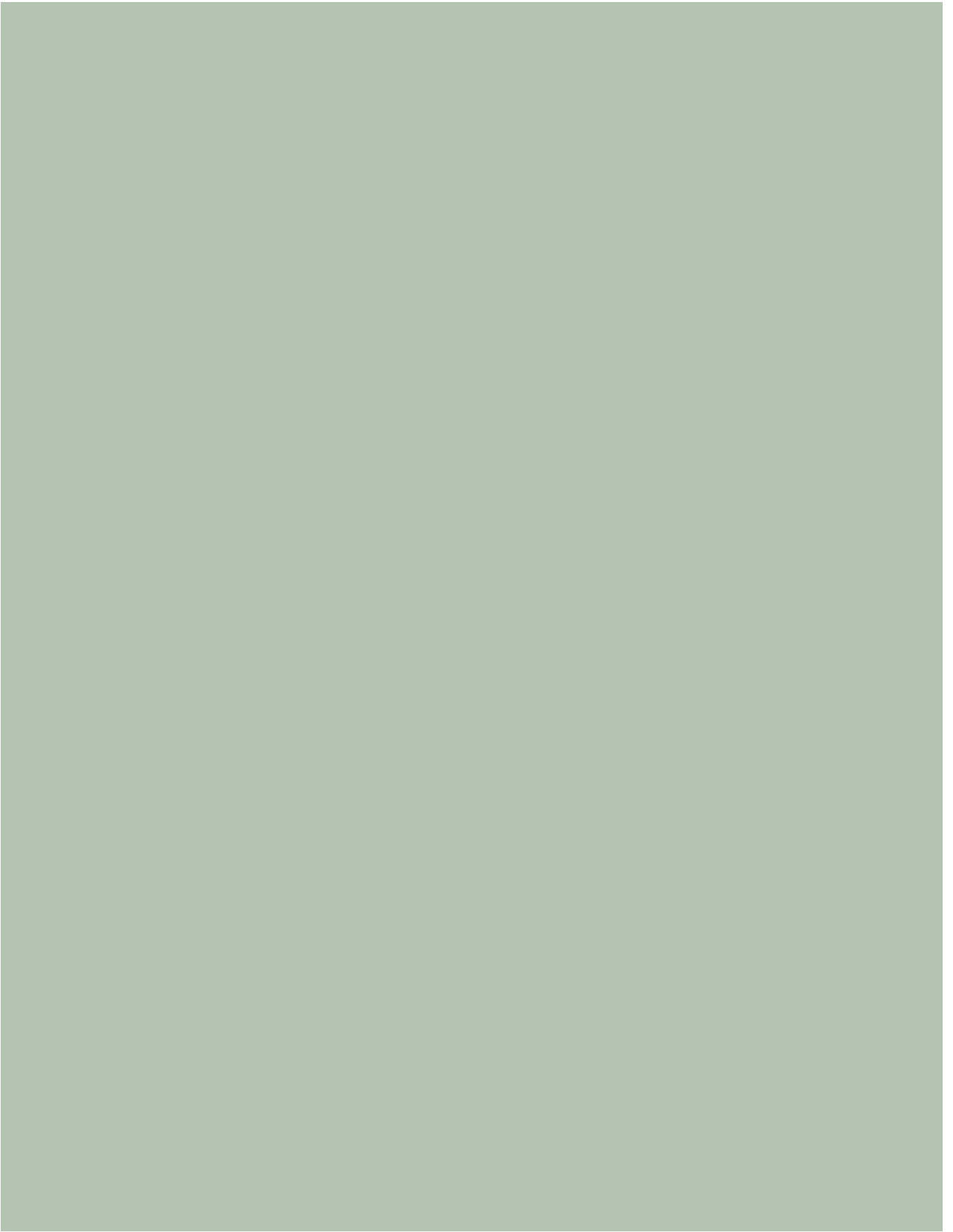
Ταχύτητα διαφυγής από την επιφάνεια της Γης: Η ελάχιστη ταχύτητα με την οποία πρέπει να εκτοξευθεί ένα σώμα από την επιφάνεια της Γης, ώστε να διαφύγει από την έλξη της.

Φαινόμενο Hall: Το φαινόμενο της εμφάνισης διαφοράς δυναμικού σε ένα πλακίδιο, που διαρρέεται από ρεύμα, ενώ βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

Φασματογράφος μάζας: Διάταξη διαχωρισμού ιόντων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του ειδικού φορτίου (φορτίο/μάζα) ενός ιόντος.

Χωρητικότητα πυκνωτή: Το μέτρο της ικανότητας του πυκνωτή να αποθηκεύει φορτία. Ισούται με το πηλίκο του φορτίου του πυκνωτή προς τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των οπλισμών του.

Ψυκτική μηχανή: Η μηχανή που μεταφέρει θερμότητα από ένα σώμα σε ένα άλλο σώμα ψηλότερης θερμοκρασίας, δαπανώντας ενέργεια.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

ΓΕΝΙΚΑ

Τα φυσικά μεγέθη (ποσότητες) έχουν γενικά αριθμητική τιμή και μονάδα μέτρησης. Το φυσικό μέγεθος εκφράζεται ως γινόμενο μιας αριθμητικής τιμής (καθαρός αριθμός) θετικής ή αρνητικής, επί τη μονάδα μέτρησής του. Αυτή η σχέση παριστάνεται στη μορφή

$$A = \{A\} [A]$$

Για τους διάφορους συνδυασμούς φυσικών ποσοτήτων ισχύουν οι γνωστοί κανόνες αριθμητικής για τις αριθμητικές τιμές και τις μονάδες.

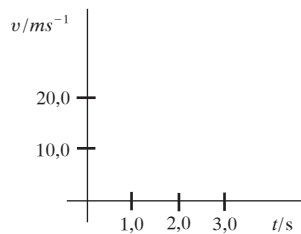
$$AB = \{A\}\{B\} [A][B] = \{AB\}[AB]$$

$\{AB\}$ είναι η αριθμητική τιμή του μεγέθους AB και $[AB]$ οι μονάδες (μονάδα) μέτρησής του

$$\frac{A}{B} = \frac{\{A\}[A]}{\{B\}[B]} = \left\{ \frac{A}{B} \right\} \left[\frac{A}{B} \right]$$

όπου $\left\{ \frac{A}{B} \right\}$ είναι η αριθμητική τιμή του μεγέθους $\frac{A}{B}$ και $\left[\frac{A}{B} \right]$ η μονάδα μέτρησής του. Σύμφωνα με

ανωτέρω υπάρχει διαφορά στους συμβολισμούς μιας φυσικής ποσότητας και της αριθμητικής της τιμής εκφρασμένης ως προς συγκεκριμένες μονάδες. Για την αριθμητική τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σύμβολο του φυσικού μεγέθους μέσα σε $\{ \}$ (μύστακες) με δείκτη έξω από την παρένθεση - μύστακα την



I_F/mA	V_F/V
0,0	0,0
0,5	0,2
1,0	0,4
10	0,6

μονάδα μέτρησης. Προτιμάται να εκφράζεται η αριθμητική τιμή ως πηλίκο της φυσικής ποσότητας δια της μονάδας.

Παράδειγμα : $\frac{v}{\text{m} \cdot \text{s}^{-1}}$ (ταχύτητα/μέτρο επί δευτερόλεπτο)

Αυτός ο συμβολισμός είναι χρήσιμος και προτείνεται να χρησιμοποιείται σε γραφικές παραστάσεις στους άξονες, καθώς και σε πίνακες.

Ο ανωτέρω συμβολισμός είναι καλύτερος από τον άλλο που έχει ευρεία χρήση και σύμφωνα με τον οποίο γράφουμε, $v(\text{m s}^{-1})$, $t(\text{s})$, $I_F(\text{mA})$, $V_F(\text{V})$.

ΣΧΕΣΕΙΣ (ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ) ΜΕΤΑΞΥ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΞΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ

Εξίσωση φυσικών μεγεθών

$$v = \frac{l}{t} \quad (\text{ταχύτητα} = \text{μήκος}/\text{χρόνος})$$

Εξίσωση αριθμητικών τιμών

Αν το v μετρείται σε km/h ,το t σε s, και το l σε m έχουμε την εξίσωση των αριθμητικών τιμών:

$$\{v\}_{\text{km/h}} = 3,6 \{l\}_m / \{t\}_s$$

Το 3,6 είναι ένας εμπειρικός πολλαπλασιαστής.

Τέτοιες εξισώσεις εξαρτώνται απο τις ειδικές μονάδες. Συνήθως παραλείπονται οι δείκτες-μονάδες και γράφονται στο κείμενο.

Λέμε ότι έχουμε αυτοσυνεπές η σύμφωνο (coherent) σύστημα μονάδων, αν η επιλογή των μονάδων είναι τέτοια που οι εξισώσεις μεταξύ των αριθμητικών τιμών και οι αντίστοιχες εξισώσεις μεταξύ φυσικών μεγεθών είναι ίδιες. Έτσι είναι τα διάφορα συστήματα που ξέρομε (π.χ. το S.I)

ΔΙΑΣΤΑΣΗ (ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ) ΦΥΣΙΚΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ

Σε κάθε σύστημα φυσικών μεγεθών και αντίστοιχων μονάδων, ένα πλήθος μεγεθών, έστω τα A, B, C, \dots λαμβάνονται ως θεμελιώδη φυσικά μεγέθη ή φυσικά μεγέθη αναφοράς. Κάθε άλλο φυσικό μέγεθος Q του συστήματος λέγεται παράγωγο φυσικό μέγεθος και μπορεί να γραφεί ως συνδυασμός των θεμελιωδών φυσικών μεγεθών ως γινόμενα σύμφωνα με τη σχέση

$$Q = \xi A^\alpha B^\beta C^\gamma \dots + \dots$$

το ξ είναι αριθμητικός συντελεστής (παράγοντας). Προφανώς μπορεί να έχουμε αθροίσματα γινομένων της παραπάνω μορφής.

Διάσταση (dimension) ή διαστάσεις του Q είναι : $\dim Q = A_\delta^\alpha B_\delta^\beta C_\delta^\gamma \dots$ (χωρίς τον αριθμητικό παράγοντα ξ) όπου $A_\delta, B_\delta, C_\delta, \dots$ είναι οι διαστάσεις των θεμελιωδών μεγεθών A, B, C, \dots . Τα $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ είναι οι διαστατικοί εκθέτες .

Στο S.I. (Διεθνές Σύστημα Μονάδων, *Système International d' unités*) παίρνουμε για διάφορους λόγους (που είναι ιστορικοί αλλά και σχετίζονται με την ευκολία στις διαδικασίες μέτρησης) ως θεμελιώδεις, 7 φυσικές ποσότητες που είναι: το μήκος, η μάζα, ο χρόνος, το ρεύμα, η θερμοδυναμική (δηλαδή η απόλυτη) θερμοκρασία, η ποσότητα ύλης και η φωτεινή ένταση. Αυτά τα θεμελιώδη μεγέθη είναι διαστατικά ανεξάρτητα μεταξύ τους (δηλαδή δεν καθορίζεται πλήρως το ένα από τα άλλα). Οι μονάδες των θεμελιωδών μεγεθών είναι αντίστοιχα τα, m (μέτρο), kg (χιλιόγραμμα), s (δευτερόλεπτο), A (αμπέρ), K(κέλβιν), mol (μολ, γραμμομόριο) και cd (καντήλα).

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

ποσότητα	διάσταση
ταχύτητα	LT^{-1}
γωνιακή ταχύτητα	T^{-1}
δύναμη	LMT^{-2}
Γραμμομοριακή (molar) εντροπία	$L^2MT^{-2}\Theta^{-1}N^{-1}$
σχετική πυκνότητα	1

Οι διαστάσεις τους είναι αντίστοιχα: L, M, T, I, Θ, N, J.

Αδιάστατη είναι μια ποσότητα που έχει διαστατικούς εκθέτες $\alpha = \beta = \gamma = \dots = 0$. Αυτή έχει διάσταση $= A^0 B^0 \dots = 1$.

Στο S.I. έχουμε επομένως

$$\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta$$

Στην πράξη επιτυγχάνεται αυτοσυνεπές (ή σύμφωνο) σύστημα με τον καθορισμό της μονάδας μέτρησης παράγωγου μεγέθους από την εξίσωση για τις διαστάσεις της (δηλαδή χωρίς τους αριθμητικούς παράγοντες) π.χ.

$$E = \frac{1}{2}mv^2, \quad \dim E = M L^2 T^{-2}$$

άρα η μονάδα κινητικής ενέργειας είναι, $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = 1 \text{ J} = 1 \text{ joule}$ (τζούλ).

Υπάρχουν ομοειδή μεγέθη που προφανώς έχουν την ίδια μονάδα, π.χ η διάμετρος και το ύψος μετρούνται σε μέτρα (m). Η κινητική ενέργεια ,η θερμοδυναμική ενέργεια,η δυναμική ενέργεια μετρούνται σε τζούλ (J).

Οι (σωστές) σχέσεις φυσικών μεγεθών κάποιου αυτοσυνεπούς συστήματος όπως είναι το Διεθνές Σύστημα (S.I.) είναι ανεξάρτητες από την επιλογή των θεμελιωδών μονάδων. Αυτό σχετίζεται με την λεγόμενη ομογένεια των τύπων του συστήματος μεγεθών. Μιά απλή έκφραση της ομογένειας είναι ότι το αριστερό και το δεξιό μέλος των τύπων (εξισώσεων) έχουν ίδιες διαστάσεις. Προφανώς αθροίζονται και αφαιρούνται μεγέθη με ίδιες διαστάσεις. Οι εκθέτες πρέπει να είναι αδιάστατα μεγέθη.

Την ιδέα αυτή τη χρησιμοποιούμε ως ερευνητικό εργαλείο για εξαγωγή τύπων όταν δεν έχουμε μια θεωρία που να μας δίνει τους τύπους ή για έλεγχο σφαλμάτων σχέσεων μεταξύ φυσικών μεγεθών. Αυτό αποτελεί ειδικό κλάδο της επιστήμης που ονομάζεται Διαστατική Ανάλυση. Η Διαστατική Ανάλυση χρησιμοποιείται σε δύσκολα προβλήματα όπως είναι η ρευστομηχανική και σε προχωρημένα θέματα φυσικής (όπως αστροφυσική, φυσική σωματιδίων, κ.λπ.) όταν δεν γνωρίζουμε καλά τους φυσικούς νόμους που τα διέπουν ή είναι δύσκολη η εφαρμογή τους.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΔΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΤΟΥ S.I.

Το όνομα Διεθνές Σύστημα Μονάδων (Système International d'unités) με την διεθνή συντομογραφία S.I., υιοθετήθηκε από την 11η Γενική Συνδιάσκεψη Μέτρων και Σταθμών το 1960 (Conférence Générale des Poids et Mesures, C.G.P.M.). Το S.I. έχει επτά θεμελιώδη μεγέθη και αντίστοιχες θεμελιώδεις μονάδες που ορίζονται στα Ελληνικά, Αγγλικά και Γαλλικά αντίστοιχα, ως εξής:

1. μέτρο, metre, mètre

α) Το μέτρο (m) είναι το μήκος που διανύει το φως στο κενό σε χρονικό διάστημα $1/299\,792\,458$ του δευτερολέπτου

β) The metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of $1/299\,792\,458$ of a second

γ) Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde. (17th CGPM 1983 Resolution 1)

2. χιλιόγραμμα, kilogram, kilogramme

α) Το χιλιόγραμμα (kg) είναι η μονάδα μάζας και ισούται με τη μάζα του διεθνούς προτύπου του χιλιογράμμου.

β) The kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram.

γ) Le kilogramme est l'unité de masse; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme. (1st CGPM 1889 and 3rd CGPM 1901)

3. δευτερόλεπτο, second, seconde

α) Το δευτερόλεπτο (s) είναι η διάρκεια $9\,192\,631\,770$ περιόδων της ακτινοβολίας που εκπέμπεται κατά την μετάβαση μεταξύ των δύο υπέρλεπτων σταθμών της κατώτατης (θεμελιώδους) στάθμης του ατόμου του κασίου-133.

β) The second is the duration of $9\,192\,631\,770$ periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the cesium - 133 atom.

γ) La seconde est la durée de $9\,192\,631\,770$ périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de cesium - 133. (13th CGPM, 1967, Resolution 1).

4. αμπέρ, ampere, ampère

α) Το αμπέρ (A) είναι εκείνο το σταθερό ρεύμα το οποίο, όταν διέρχεται από δύο ευθύγραμμους παράλληλους αγωγούς απείρου μήκους αμελητέας κυκλικής διατομής οι οποίοι βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους 1 μέτρο στο κενό, εξασκείται δύναμη μεταξύ τους ίση με 2×10^{-7} νιούτον ανα μέτρο μήκους τους.

β) The ampere is that constant current which, if maintained in two straight parallel conductors of infinite length, of negligible circular cross section, and placed 1 meter apart in a vacuum, would produce between these conductors a force equal to 2×10^{-7} newton per metre of length.

γ) L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable, et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} newton par mètre

de longueur. (9th CGPM, 1948, Resolutions 2 and 7).

5. κέλβιν, kelvin, kelvin

α) Το κέλβιν (K), η μονάδα της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας, είναι το κλάσμα $1/273,16$ της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας του τριπλού σημείου του νερού

Η 13η C G P M (1967, Απόφαση 3) αποφάσισε επίσης ότι τη μονάδα κέλβιν και το σύμβολό της K πρέπει να χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν και τη θερμοδυναμική θερμοκρασία και το διάστημα ή διαφορά θερμοκρασίας.

Εκτός απο τη θερμοδυναμική θερμοκρασία (σύμβολο T) υπάρχει επίσης η θερμοκρασία Κελσίου (Celsius), σύμβολο t ή θ , που ορίζεται απο την εξίσωση

$$t = T - T_0$$

όπου $T_0 = 273,15$ K. Η θερμοκρασία Κελσίου εκφράζεται σε βαθμούς Κελσίου (σύμβολο $^{\circ}\text{C}$). Η μονάδα βαθμός “Κελσίου” ισούται με τη μονάδα “κέλβιν” και κάθε διάστημα θερμοκρασίας ή διαφορά θερμοκρασίας είναι δυνατόν να εκφράζεται και σε βαθμούς Κελσίου.

β) The kelvin, unit of thermodynamic temperature, is the fraction $1/273,16$ of the thermodynamic temperature of the triple point of water.

γ) Le kelvin, unité de temperature thermodynamique, est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l' eau. (13th CGPM 1967, Resolution 4).

6. μολ (γραμμομόριο), mole, mole

α) Το μολ η γραμμομόριο (mol) είναι η ποσότητα ύλης συστήματος το οποίο περιέχει τόσες στοιχειώδεις οντότητες όσα άτομα υπάρχουν σε $0,012$ χιλιόγραμμα άνθρακα - 12.

Όταν χρησιμοποιείται το μολ, πρέπει να καθορίζονται οι στοιχειώδεις οντότητες που μπορεί να είναι άτομα, μόρια, ιόντα, ηλεκτρόνια η άλλα σωματίδια η καθορισμένες ομάδες τέτοιων σωματιδίων.

Σημείωση: Στον ορισμό εξυπακούεται ότι τα άτομα του άνθρακα - 12 είναι ελεύθερα ,σε ηρεμία και στη κατώτατη (θεμελιώδη) ενεργειακή κατάσταση τους.

β) The mole is the amount of substance of a system which contains as many elementary entities as there are atoms in $0,012$ kilogram carbon 12.

When the mole is used, the elementary entities must be specified and may be atoms, molecules, ions, electrons, other particles or specified groups of such particles.

γ) La mole est la quantité de matière d' une système contenant autant d' entités élémentaires qu' il y a d' atomes dans $0,012$ kilogramme de carbone 12.

Lorsqu' on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d' autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules. (14th CGPM 1971, Resolution 3).

7. καντήλα, candela, candela

α) Η καντήλα (cd) είναι η φωτεινή ένταση σε δεδομένη κατεύθυνση, πηγής που εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία συχνότητας 540×10^{12} χερτζ (Hz) και έχει ένταση ακτινοβολίας σε αυτή τη κατεύθυνση ίση με το $1/683$ βατ ανά στερακίνιο (W/sr).

β) The candela is the luminous intensity, in a given direction, of a source that emits monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} hertz and that has a radiant intensity in that direction of $(1/683)$ watt per steradian.

γ) La candela est l' intensité lumineuse, dans une direction donnée, d' une source qui emet une radiation monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l' intensité energetique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian. (16th CGPM 1979, Resolution 3).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

ΟΔΗΓΟΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΟΝΑΔΩΝ (SI)

Το εκσυγχρονισμένο μετρικό σύστημα είναι γνωστό ως Διεθνές Σύστημα Μονάδων (Système International d' Unités), με τη διεθνή συντομογραφία SI. Στηρίζεται σε επτά θεμελιώδεις μονάδες που δίνονται στον Πίνακα 1, οι οποίες συμβατικά θεωρούνται ως διαστατικά ανεξάρτητες.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 Θεμελιώδεις μονάδες του S.I.

Μέγεθος (Ποσότητα)	Μονάδα		Σύμβολο
	Όνομα		
Μήκος	meter	μέτρο	m
Μάζα	kilogram	χιλιόγραμμα	kg
Χρόνος	second	δευτερόλεπτο	s
ηλεκτρικό ρεύμα	ampere	αμπέρ	A
Θερμοδυναμική θερμοκρασία	kelvin	κέλβιν	K
Ποσότητα ύλης	mole	μολ (γραμμομόριο)	mol
Φωτεινή ένταση	candela	καντήλα	cd

Όλες οι άλλες μονάδες είναι παράγωγες μονάδες και σχηματίζονται κατά συνεπή τρόπο (coherently) με πολλαπλασιασμό και διαίρεση, μονάδων του συστήματος, χωρίς αριθμητικούς παράγοντες. Αυτό οδηγεί στο να έχουν ακριβώς την ίδια μορφή οι εξισώσεις αριθμητικών τιμών με τις εξισώσεις μεγεθών. Παραδείγματα παράγωγων μονάδων, όπου περιλαμβάνονται και μερικές με ειδικά ονόματα, δίνονται στον Πίνακα 2.

Τα πολλαπλάσια και υποπολλαπλάσια των μονάδων του SI παράγονται με τη χρήση των προθεμάτων που αναγράφονται στον Πίνακα 3.

Το SI έχει πάρει τη διεθνή αναγνώριση του από τη Meter Convention (Συνθήκη του μέτρου), που υπογράφηκε στο Παρίσι από τους αντιπροσώπους 17 χωρών στις 20 Μαΐου 1875 και τροποποιήθηκε το 1921. Σήμερα μέλη της είναι 47 χώρες. Αυτή η συνθήκη δημιούργησε την Γενική Συνδιάσκεψη Μέτρων και Σταθμών (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM), ως το επίσημο διπλωματικό όργανο υπεύθυνο για την επικύρωση νέων προτάσεων που σχετίζονται με τις μετρικές μονάδες. Οι επιστημονικές αποφάσεις λαμβάνονται από την Διεθνή Επιτροπή Μέτρων και Σταθμών (Comité International des Poids et Mesures, CIPM). Αυτή υποβοηθείται με τις υποδείξεις οκτώ Συμβουλευτικών Επιτροπών (Consultative Committees, CC), που είναι εξειδικευμένες σε ειδικούς τομείς της μετρολογίας. Οι δραστηριότητες των εθνικών εργαστηρίων προτύπων των διαφόρων χωρών κατευθύνονται από το Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM), του οποίου τα κεντρικά γραφεία είναι στις Sèvres στη Γαλλία και το οποίο βρίσκεται υπό την επίβλεψη της CIPM. Το SI καθιερώθηκε με την 11η CGPM το 1960, τότε που οι ορισμοί των μετρικών μονάδων, τα σύμβολα και η ορολογία τροποποιήθηκαν σημαντικά και απλοποιήθηκαν. Το BIPM με την καθοδήγηση της Συμβουλευτικής Επιτροπής η οποία είναι ειδική για τις μονάδες (Consultative Committee for Units, CCU), και με την έγκριση της Διεθνούς Επιτροπής Μέτρων και Σταθμών (CIPM), δημοσιεύει κατά διαστήματα ένα κείμενο όπου αναφέρονται περιληπτικά οι ιστορικές αποφάσεις της CGPM (Γενικής Συνδιάσκεψης Μέτρων και Σταθμών) και της CIPM και δίνει μερικές τυποποιήσεις για τη χρήση του SI. Κάποιες άλλες συστάσεις δίνονται από την Επιτροπή Συμβόλων Μονάδων Ονοματολογίας, Ατομικών Μαζών και Θεμελιωδών Σταθερών της Διεθνούς Ένωσης για Καθαρή και Εφαρμοσμένη Φυσική (Commission for Symbols, Units, Nomenclature, Atomic Masses and Fundamental Constants of the International Union of Pure and Applied Physics,

IUPAP). Στην Ελλάδα υπεύθυνη υπηρεσία για θέματα τυποποίησης είναι ο ΕΛΟΤ (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης) που υπάγεται στο Υπουργείο Βιομηχανίας Ενέργειας και Τεχνολογίας. Αυτή η μικρή περίληψη συνοψίζει τις πιο σημαντικές συμβάσεις αλλά για πλήρη εξοικείωση με το SI πρέπει να ανατρέξει κάποιος στις αρχικές πηγές.

Από το 1995 η 20η CGPM έπαψε να θεωρεί τις λεγόμενες “συμπληρωματικές μονάδες” ως ειδική κατηγορία παράγωγων μονάδων με διάσταση 1 (με τον τίτλο αδιάστατες παράγωγες μονάδες), έτσι, αυτές οι μονάδες, που είναι το ακτίνιο (rad) και το στερακτίνιο (sr) συμπεριλαμβάνονται στις παράγωγες μονάδες στον Πίνακα 2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 Παραδείγματα παράγωγων μονάδων του S.I.

Μέγεθος		Μονάδα		
	Ειδικό όνομα		Σύμβολο	Ισοδύναμη (διαστατικά)
Επίπεδη γωνία	radian	ακτίνιο	rad	m/m=1
Στερεά γωνία	steradian	στερακτίνιο	sr	m ² /m ² =1
ταχύτητα				m/s
επιτάχυνση				m/s ²
γωνιακή ταχύτητα				rad/s
γωνιακή επιτάχυνση				rad/s ²
συχνότητα	hertz	χερτζ	Hz	s ⁻¹
κυκλική συχνότητα				rad/s
δύναμη	newton	νιούτον	N	kg·m/s ²
πίεση, τάση(δυναμης)	pascal	πασκάλ	Pa	N/m ²
έργο, ενέργεια, θερμότητα	joule	τζουλ	J	N·m, kg·m ² /s ²
ώθηση, ορμή				N·s, kg·m/s
ισχύς	watt	βατ	W	J/s
ηλεκτρικό φορτίο	coulomb	κουλόμπ	C	A·s
ηλεκτρική τάση, ΗΕΔ	volt	βολτ	V	J/C, W/A
αντίσταση	ohm	ωμ	Ω	V/A
αγωγιμότητα	siemens	ζήμενς	S	A/V, Ω ⁻¹
μαγνητική ροή	weber	βεμπερ	Wb	V·s
(αμοιβαία ή αυτ) επαγωγή	henry	χένρυ	H	Wb/A
χωρητικότητα	farad	φαράντ	F	C/V
ένταση ηλεκτρικού πεδίου				V/M, N/C
πυκνότητα μαγνητικ. ροής	tesla	τέσλα	T	Wb/m ² , N/(A·m)
ηλεκτρική μετατόπιση				C/m ²
ένταση μαγνητικού πεδίου				A/m
θερμοκρασία Κελσίου	degree	βαθμός	°C	K
	Celsius	Κελσίου		
φωτεινή ροή(ισχύς)	lumen	λούμεν	lm	cd·sr
φωτισμός(φωτεινότητα)	lux	λουξ	lx	lm/m ²
ραδιενέργεια	becquerel	μπεκερέλ	Bq	s ⁻¹

ΠΙΝΑΚΑΣ 3 Προθέματα του S.I.

Παράγοντας πολλαπλασιασμού	Προθέμα	Σύμβολο
10^{24}	yotta γυότα	Y
10^{21}	zetta ζέτα	Z
10^{18}	exa έξα	E
10^{15}	peta πέτα	P
10^{12}	tera τέρα	T
10^9	giga γίγα	Z
10^6	mega μέγα	M
10^3	kilo κίλο (χιλιο)	k
10^2	hecto έκτο	h
10^1	deca δέκα	da
10^{-1}	deci ντέσι (δέκατο)	d
10^{-2}	centi σέντι (εκατοστό)	c
10^{-3}	milli μίλι (χιλιοστό)	m
10^{-6}	micro μίκρο	μ
10^{-9}	nano νάνο	n
10^{-12}	pico πίκο	p
10^{-15}	fempto φέμπτο	f
10^{-18}	atto άτο	a
10^{-21}	zepto ζέπτο	z
10^{-24}	yocto γυόκτο	y

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ

Σύμβολα (με γράμματα) παριστάνουν μεγέθη (ποσότητες), δηλαδή αριθμητική τιμή και μονάδα μέτρησης. Ως σύμβολα για τα μεγέθη χρησιμοποιούνται πλάγια γράμματα (*italics*), ενώ τα γράμματα για τις μονάδες είναι όρθια (*roman*), π.χ. $F = 15 \text{ N}$.

Σύμβολα για ονόματα μονάδων που παράγονται από κύρια ονόματα έχουν το πρώτο γράμμα κεφαλαίο. Αν δεν παράγονται από κύρια ονόματα είναι εξ ολοκλήρου με πεζά γράμματα. Τα ίδια τα ονόματα των μονάδων είναι με πεζά γράμματα, π.χ. tesla, (T), meter (m). Τα σύμβολα των μονάδων είναι μαθηματικά μεγέθη (όχι απλές συντομογραφίες) και συνήθως παριστάνονται με το πρώτο γράμμα του ονόματος της μονάδας, π.χ. το σύμβολο για το γραμμάριο, gram, είναι g, όχι gm, το σύμβολο για το δευτερόλεπτο, second, είναι s, όχι sec, υπάρχουν μερικές εξαιρέσεις, π.χ. mol, cd και Hz. Το σύμβολο της μονάδας δεν ακολουθείται από κουνίδα και ο πληθυντικός συμβόλου μονάδων δεν παίρνει το “s” του πληθυντικού, π.χ. 3 kg, όχι 3 kgs. Στα Ελληνικά δεν γράφουν τις μονάδες στον πληθυντικό όταν χρησιμοποιούν το ξενόγλωσσο όνομα παρόλο που στα Αγγλικά κείμενα τις γράφουν στον πληθυντικό, π.χ. μερικοί προτιμούν το 3 meter αντί του 3 meters, ενώ χρησιμοποιούν το 3 μέτρα.

Η λέξη “βαθμός” (“degree”) και το σχετικό σύμβολο, °, δεν χρησιμοποιούνται με τη μονάδα της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας T (δηλαδή χρησιμοποιείται το kelvin ή K, όχι βαθμός kelvin, όχι °K). Αυτά όμως διατηρούνται στη μονάδα θερμοκρασίας Κελσίου t, που ορίζεται ως $t = T - T_0$ όπου $T = 273,15 \text{ K}$ ακριβώς, (δηλαδή λέμε βαθμός Κελσίου (Celsius), °C).

Τα σύμβολα για προθέματα στο SI που παριστάνουν 10^6 και περισσότερο είναι με κεφαλαία. Όλα τα άλλα είναι με πεζά. Δεν υπάρχει κενό μεταξύ προθέματος και της μονάδας. Να αποφεύγονται συνδυασμοί προθεμάτων (π.χ. pF, όχι μμF). Ο εκθέτης δρα σε όλη τη μονάδα συμπεριλαμβανομένου του προθέματος

(π.χ. $1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$ άρα $(1 \text{ cm})^3 = 1 \text{ cm}^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$). Όταν κάποιο πολλαπλάσιο ή υποπολλαπλάσιο μονάδας γράφεται με το πλήρες όνομά της, το πρόθεμα πρέπει να γράφεται πλήρες με το πρώτο γράμμα, όπως και τα άλλα, πεζό (π.χ. megahertz, όχι Megahertz, όχι Mhertz).

Το kilogram (χιλιόγραμμα) είναι η μόνη θεμελιώδης μονάδα της οποίας το όνομα, για ιστορικούς λόγους, περιέχει πρόθεμα. Ονόματα πολλαπλασίων και υποπολλαπλασίων του kilogram ή τα σύμβολά τους σχηματίζονται βάζοντας προθέματα στη λέξη “gram” ή στο αντίστοιχο σύμβολο “g”.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4 Μονάδες εκτός S.I. που χρησιμοποιούνται με το S.I.

Μέγεθος		Μονάδα		
	Όνομα	Σύμβολο	Ισοδύναμη	
χρόνος	minute	λεπτό	min	1 min = 60 s
	hour	ώρα	h	1 h = 60 min = 3600 s
	day	ημέρα	d	1 d = 24 h = 86 400 s
επίπεδη γωνία	degree	μοίρα	°	1° = (π/180) rad
	minute	λεπτό	'	1' = (1/60)° = (π/10 800) rad
	second	δευτερόλεπτο	''	1'' = (1/60)' = (π/648 800) rad
όγκος	liter	λίτρο	L	1 L = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
μάζα	metric ton	μετρικός τόνος	t	1 t = 1000 kg
εξασθένιση (attenuation), στάθμη (level)	neper		Np	1 Np = 1
	bel		B	1 B = 0,5 (ln 10) Np

Ο πολλαπλασιασμός μονάδων συμβολίζεται με τη χρήση (ανυψωμένης) τελείας ή αφήνοντας ένα διάκενο μεταξύ των μονάδων (π.χ. N·m ή N m). Η διαίρεση μπορεί να σημειώνεται με τη χρήση πλάγιας ευθείας, με την οριζόντια ευθεία του κλάσματος ή με αρνητικό εκθέτη (π.χ. m/s, ή m·s⁻¹), δεν επιτρέπεται η χρήση της πλάγιας σε σύμπλεγμα συμβόλων περισσότερο από μία φορά (π.χ. m/s, όχι m/s/s). Για την αποφυγή σύγχυσης όταν υπάρχουν περισσότερες από μία μονάδες στον παρονομαστή, η πρακτική που προτιμάται είναι η χρήση παρένθεσης ή αρνητικών εκθετών (π.χ. W/(m²·K⁴) ή W·m⁻²·K⁻⁴). Η παράσταση των μονάδων μπορεί να περιλαμβάνει μονάδες με πρόθεμα (π.χ. kJ/mol, W/cm²).

Ονόματα μονάδων να μην αναμιγνύονται με σύμβολα μαθηματικών πράξεων (π.χ. μπορεί κάποιος να γράψει “meter ανά second” αλλά όχι “meter/second”, όχι “meter·second”, ανάλογα μπορεί να πει κάποιος για τα ελληνικά). Όταν κάποιος γράφει με τα ονόματα δύο μονάδων το γινόμενο τους, συνιστάται να μπαίνει ένα κενό μεταξύ τους (επιτρέπεται και ενωτική παύλα), δεν πρέπει να χρησιμοποιείται (ανυψωμένη) τελεία (π.χ. γράφουμε “newton meter” ή “newton - meter”, όχι όμως “newton·meter”).

Ομάδες τριών ψηφίων σε αριθμούς με περισσότερα από τέσσερα ψηφία διαχωρίζονται με μικρά κενά αντί τελείες (π.χ. 299 792 458, όχι 299.792.458) για να αποφεύγεται σύγχυση με την τελεία που χρησιμοποιείται σε κείμενα στα Αγγλικά ως δεκαδικό σύμβολο (ανάλογο ισχύει για το κόμμα για τα κείμενα στα Αγγλικά). Σημειώνουμε ότι ο ISO (Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης) συνιστά τη χρήση κόμματος ως δεκαδικού συμβόλου ακόμη και όταν γράφονται κείμενα στα Αγγλικά. Όλες οι χώρες της Ευρώπης εκτός της Αγγλίας χρησιμοποιούν το κόμμα σε κείμενα στη γλώσσα τους.

Η αριθμητική τιμή και το σύμβολο της μονάδας πρέπει να διαχωρίζονται με κενό, ακόμη και αν χρησιμοποιούνται ως επίθετο (π.χ. για το “τρίμετρο” γράφουμε 3 m, όχι 3m ούτε 3-m). Να μπαίνει πάντα το μηδέν μπροστά από το δεκαδικό σύμβολο σε δεκαδικούς. Αριθμός δεν πρέπει να αρχίζει ή να τελειώνει με το δεκαδικό σύμβολο (,) π.χ. πρέπει να γράφεται 0,3 J και όχι ,3 J επίσης, να γράφεται 3,0 J και όχι 3, J. Το πρόθεμα κάποιας μονάδας να επιλέγεται έτσι ώστε η αριθμητική τιμή του μεγέθους να είναι μέσα σε λογικά πρακτικά όρια, συνήθως μεταξύ 0,1 και 1000 (π.χ. 200 kN, 0,5 mA).

ΜΟΝΑΔΕΣ ΕΚΤΟΣ SI ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΜΑΖΙ ΜΕ ΤΟ SI

Ένας σημαντικός ρόλος του SI είναι να αποθαρρύνει την εξάπλωση μη αναγκαίων μονάδων. Εν τούτοις, υπάρχουν τρεις κατηγορίες μονάδων εκτός SI που μπορεί να χρησιμοποιούνται. Στον πίνακα 4 φαίνονται τέτοιες μονάδες που χρησιμοποιούνται μαζί με το SI. Εξαιρέσεις των κανόνων, είναι η μη ύπαρξη κενού πριν από τα σύμβολα °, ´ και ˘ για τις μονάδες της επίπεδης γωνίας και επίσης το γεγονός ότι χρησιμοποιείται το κεφαλαίο L για να αποφεύγεται σύγχυση μεταξύ του γραμμάτος l (ελ) και του αριθμού 1 (ένα). Κάποιες ειδικές μονάδες που οι τιμές τους σε μονάδες του SI ορίζονται πειραματικά, είναι επίσης αποδεκτές για χρήση σε ειδικούς κλάδους και φαίνονται στον Πίνακα 5.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5 Μονάδες που γίνεται αποδεκτό να χρησιμοποιούνται με το S.I. των οποίων οι τιμές στο S.I. προσδιορίζονται πειραματικά

Μέγεθος	Μονάδα		
	Όνομα	Σύμβολο	Ισοδύναμη
ενέργεια	eV	$1,60217733(49) \times 10^{-19} \text{ J}$	
μάζα	u	$1,6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$	
απόσταση	ua	$1,49597870691(30) \times 10^{11} \text{ m}$	

Η τρίτη κατηγορία μονάδων που γίνεται αποδεκτή στο S.I. περιλαμβάνει,

1 ναυτικό μίλι = 1852 μέτρα,

1 knot (κόμβος) = 1 ναυτικό μίλι ανά ώρα = 0,514 m/s,

1 are = 100 m^2 ,

1 hectare (εκτάριο) = 10^4 m^2 ,

1 bar = $10^5 \text{ N/m}^2 = 100 \text{ kN/m}^2$,

1 angstrom = 100 pm και το

1 barn = 10^{-28} m^2

Σημειώνουμε ότι στους πίνακες με τις τιμές των σταθερών γράφουμε ότι το ηλεκτρονιοβόλτ ισούται με $1,602\ 177\ 33\ (49) \times 10^{-19} \text{ J}$ το (49) δηλώνει την αβεβαιότητα των δύο τελευταίων ψηφίων 33 και εδώ νοείται ως $\pm 0,000\ 000\ 49 \times 10^{-19} \text{ J}$.

ΑΛΛΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΕΚΤΟΣ S.I.

Μέγεθος	Όνομα και Σύμβολο	Συντελεστής μετατροπής
δύναμη	χιλιόγραμμα - δύναμης (κιλοπόντ) kg f (kp)	1 kg f = 9,806 65 N (ακριβώς)
πίεση	κανονική ατμόσφαιρα atm τορ torr συμβατικό χιλιοστό υδραργύρου mm Hg τεχνική ατμόσφαιρα at συμβατικό χιλιοστό νερού mm H ₂ O	1 atm = 101 325 Pa (ακριβώς) 1 Torr = 1/760 atm (ακριβώς) = 133,322 4 Pa 1 mm Hg = 13,595 1 mm H ₂ O = 133,322 4 Pa 1 at = 1 kgf/cm ² = 98 066,5 Pa (ακριβώς) = = 0,967 841 atm 1 mm H ₂ O = 10 ⁻⁴ at = 9,806 65 Pa (ακριβώς)
ισχύς	μετρικός ίππος ίππος (ιπποδύναμη)	1 μετρικός ίππος (1 CV = 1 PS) = 75 kg f m/s (ακριβώς) = 735,498 75 W (ακριβώς) 1 hp = 745,699 9 W (ακριβώς) = 550 ff lbf/s
θερμοκρασία	Fahrenheit (Φαρενάιτ) °F	$\frac{t_F}{°F} = \frac{9}{5} \frac{t}{°C} + 32$
Θερμότητα	καλορί των 15 °C cal ₁₅ (ή εδώ απλώς cal)	1 cal ₁₅ = 4,185 5 J (είναι η ποσότητα θερμότητας για να θερμανθεί 1 g νερού, που δεν περιέχει διαλυμένο αέρα, από 14,5 °C σε 15,5 °C υπό σταθερή πίεση 101,325 kPa σύμφωνα με μετρήσεις της εποχής του 1950)
ηλεκτρομαγνητισμός	πυκνότητα μαγνητικής ροής, gauss Gs (στη Φυσική χρησιμοποιείται το G)	1 G = 10 ⁻⁴ T

ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΣ ΜΟΝΑΔΩΝ

- 1 in (ίντσα) = 2,54 cm (ακριβώς)
 1 ft (πόδι) = 12 in (ακριβώς) = 0,304 8 m (ακριβώς)
 1 yd (γυάρδα) (πήχυς) = 3 ft (ακριβώς) = 0,914 4 m (ακριβώς)
 1 mile (μίλι) = 5280 ft (ακριβώς) = 1,609 344 m (ακριβώς)
 1 L (λίτρο) = 10⁻³ m³ (ακριβώς)
 1 λεπτό (1 min) = 60 s
 1 ώρα (1 h) = 60 min = 3600 s
 1 μέρα (1 d) = 24 h = 86 400 s

1 year (έτος) a , a_{trop} (τροπικό) = 365,242 20 d = 31 556 926 s
 1 angstrom (1 \AA) = 10^{-10} m (ακριβώς)
 1 ° (βαθμός) = $\pi/180$ rad = 0,017 453 3 rad
 g_n κανονική τιμή της επιτάχυνσης βαρύτητας = 9,806 65 m/s² (ακριβώς)
 1 pound, lb (πάουντ, λίμπρα) = 0,453 592 37 kg (ακριβώς)
 1 acre = 4840 yd² (ακριβώς) = 4 064,856 m²
 1 βαρέλι (US) για πετρέλαιο κ.λπ. = 9702 in³ = 158,987 3 L
 1 pound-force (lbf) (μια λίμπρα-δύναμης) = 4,448 222 N
 1 Btu (Βρετανική μονάδα θερμοότητας) = 788,169 ft · lbf = 1 055,056 J

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΣΥΜΒΟΛΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Μερικά σύμβολα παριστάνουν περισσότερα από ένα φυσικά μεγέθη και ένα φυσικό μέγεθος παριστάνεται με περισσότερα σύμβολα. Είναι στην κρίση μας να επιλέγουμε τα κατάλληλα σύμβολα για την περίπτωση ώστε να μην υπάρχει σύγχυση. Έτσι ενώ τα σύμβολα των μονάδων είναι καλά καθορισμένα, τα σύμβολα των μεγεθών δεν είναι μονοσήμαντα καθορισμένα.

Μερικά παραδείγματα:

Στροφορμή	L, J	Θερμοδυναμική, θερμοκρασία	$T (\Theta)$
Ποσότητα ύλης	$n, (\nu)$	Θερμοκρασία Κελσίου	t, θ
Ορμή	P	Θερμοκρασία Φαρενάιτ	t_F
Σταθερά Avogadro	L, N_A	Φορτίο	Q, q
Ροπή αδράνειας	I, J	Ηλεκτρικό ρεύμα	I, i
Γραμμομοριακή μάζα	M	Πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος	j, J
Βάρος	$F_g, (G), (W), (P)$	Ηλεκτρικό δυναμικό	V, Φ
Ροπή (δύναμης)	M	Διαφορά δυναμικού	U, V
Ροπή ζεύγους	M, T	Ηλεκτρική ροή	$\Phi_E (\Psi)$
Πίεση	p, P	Σχετική επιτρεπτότητα	ϵ_r, K
Αριθμό σωματιδίων	N	(διηλεκτρική σταθερά)	
Πυκνότητα αριθμού σωματιδίων	n	Σχετική διαπερατότητα	μ_r
Σχετική ατομική μάζα	A_r	Μαγνητική σταθερά	μ_0
Σχετική μοριακή μάζα	M_r	(διαπερατότητα του κενού)	
Έργο	W	Ηλεκτρική σταθερά	ϵ_0
Ισχύς	P, N	(επιτρεπτότητα του κενού)	

ΤΙΜΕΣ ΜΕΡΙΚΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ (2006)

Με βάση τα νέα πειραματικά δεδομένα, που συγκεντρώνονται επί πολλά χρόνια, η επιτροπή με το όνομα Committee on Data for Science and Technology of the International Council of Scientific Unions (CODATA), δημοσιεύει τιμές για θεμελιώδεις φυσικές σταθερές και συντελεστές μετατροπής. Η τελευταία δημοσίευση μέχρι σήμερα (3/2008), έγινε το 2006.

Στους πίνακες που δίνονται το σύμβολο για τα δεκαδικά είναι κουκίδα (.) διότι οι πίνακες είναι από το NIST (National Institute of Standards and Technology - Εθνικό Ινστιτούτο Ποσοτήτων και Τεχνολογίας) των Η.Π.Α. Στις Η.Π.Α. (αγγλόφωνη χώρα) χρησιμοποιείται η κουκίδα αντί για κόμμα για τα δεκαδικά ψηφία.

Fundamental Physical Constants — Frequently used constants

Quantity	Symbol	Value	Unit	Relative std. uncert. u_r
speed of light in vacuum	c, c_0	299 792 458	m s^{-1}	(exact)
magnetic constant	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ $= 12.566\,370\,614\dots \times 10^{-7}$	N A^{-2} N A^{-2}	(exact)
electric constant $1/\mu_0 c^2$	ϵ_0	$8.854\,187\,817\dots \times 10^{-12}$	F m^{-1}	(exact)
Newtonian constant of gravitation	G	$6.674\,28(67) \times 10^{-11}$	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$	1.0×10^{-4}
Planck constant	h	$6.626\,068\,96(33) \times 10^{-34}$	J s	5.0×10^{-8}
$h/2\pi$	\hbar	$1.054\,571\,628(53) \times 10^{-34}$	J s	5.0×10^{-8}
elementary charge	e	$1.602\,176\,487(40) \times 10^{-19}$	C	2.5×10^{-8}
magnetic flux quantum $h/2e$	Φ_0	$2.067\,833\,667(52) \times 10^{-15}$	Wb	2.5×10^{-8}
conductance quantum $2e^2/h$	G_0	$7.748\,091\,7004(53) \times 10^{-5}$	S	6.8×10^{-10}
electron mass	m_e	$9.109\,382\,15(45) \times 10^{-31}$	kg	5.0×10^{-8}
proton mass	m_p	$1.672\,621\,637(83) \times 10^{-27}$	kg	5.0×10^{-8}
proton-electron mass ratio	m_p/m_e	1836.152 672 47(80)		4.3×10^{-10}
fine-structure constant $e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$	α	$7.297\,352\,5376(50) \times 10^{-3}$		6.8×10^{-10}
inverse fine-structure constant	α^{-1}	137.035 999 679(94)		6.8×10^{-10}
Rydberg constant $\alpha^2 m_e c/2h$	R_∞	10 973 731.568 527(73)	m^{-1}	6.6×10^{-12}
Avogadro constant	N_A, L	$6.022\,141\,79(30) \times 10^{23}$	mol^{-1}	5.0×10^{-8}
Faraday constant $N_A e$	F	96 485.3399(24)	C mol^{-1}	2.5×10^{-8}
molar gas constant	R	8.314 472(15)	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.7×10^{-6}
Boltzmann constant R/N_A	k	$1.380\,6504(24) \times 10^{-23}$	J K^{-1}	1.7×10^{-6}
Stefan-Boltzmann constant $(\pi^2/60)k^4/\hbar^3 c^2$	σ	$5.670\,400(40) \times 10^{-8}$	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$	7.0×10^{-6}
Non-SI units accepted for use with the SI				
electron volt: $(e/C) \text{ J}$	eV	$1.602\,176\,487(40) \times 10^{-19}$	J	2.5×10^{-8}
(unified) atomic mass unit $1 \text{ u} = m_u = \frac{1}{12} m(^{12}\text{C})$ $= 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}/N_A$	u	$1.660\,538\,782(83) \times 10^{-27}$	kg	5.0×10^{-8}

Fundamental Physical Constants — Physico-chemical constants

Quantity	Symbol	Value	Unit	Relative std. uncert. u_r
Avogadro constant	N_A, L	$6.022\,141\,79(30) \times 10^{23}$	mol^{-1}	5.0×10^{-8}
atomic mass constant $m_u = \frac{1}{12}m(^{12}\text{C}) = 1\text{ u}$ $= 10^{-3}\text{ kg mol}^{-1}/N_A$	m_u	$1.660\,538\,782(83) \times 10^{-27}$	kg	5.0×10^{-8}
energy equivalent in MeV	$m_u c^2$	$1.492\,417\,830(74) \times 10^{-10}$ 931.494 028(23)	J MeV	5.0×10^{-8} 2.5×10^{-8}
Faraday constant ¹ $N_A e$	F	96 485.3399(24)	C mol^{-1}	2.5×10^{-8}
molar Planck constant	$N_A h$ $N_A h c$	$3.990\,312\,6821(57) \times 10^{-10}$ 0.119 626 564 72(17)	J s mol^{-1} J m mol^{-1}	1.4×10^{-9} 1.4×10^{-9}
molar gas constant	R	8.314 472(15)	$\text{J mol}^{-1}\text{ K}^{-1}$	1.7×10^{-6}
Boltzmann constant R/N_A in eV K^{-1}	k k/h k/hc	$1.380\,6504(24) \times 10^{-23}$ $8.617\,343(15) \times 10^{-5}$ $2.083\,6644(36) \times 10^{10}$ 69.503 56(12)	J K^{-1} eV K^{-1} Hz K^{-1} $\text{m}^{-1}\text{ K}^{-1}$	1.7×10^{-6} 1.7×10^{-6} 1.7×10^{-6} 1.7×10^{-6}
molar volume of ideal gas RT/p $T = 273.15\text{ K}, p = 101.325\text{ kPa}$	V_m	$22.413\,996(39) \times 10^{-3}$	$\text{m}^3\text{ mol}^{-1}$	1.7×10^{-6}
Loschmidt constant N_A/V_m $T = 273.15\text{ K}, p = 100\text{ kPa}$	n_0 V_m	$2.686\,7774(47) \times 10^{25}$ $22.710\,981(40) \times 10^{-3}$	m^{-3} $\text{m}^3\text{ mol}^{-1}$	1.7×10^{-6} 1.7×10^{-6}
Sackur-Tetrode constant (absolute entropy constant) ² $\frac{5}{2} + \ln[(2\pi m_u k T_1/h^2)^{3/2} k T_1/p_0]$ $T_1 = 1\text{ K}, p_0 = 100\text{ kPa}$ $T_1 = 1\text{ K}, p_0 = 101.325\text{ kPa}$	S_0/R	-1.151 7047(44) -1.164 8677(44)		3.8×10^{-6} 3.8×10^{-6}
Stefan-Boltzmann constant $(\pi^2/60)k^4/h^3 c^2$	σ	$5.670\,400(40) \times 10^{-8}$	$\text{W m}^{-2}\text{ K}^{-4}$	7.0×10^{-6}
first radiation constant $2\pi h c^2$	c_1	$3.741\,771\,18(19) \times 10^{-16}$	W m^2	5.0×10^{-8}
first radiation constant for spectral radiance $2hc^2$	c_{1L}	$1.191\,042\,759(59) \times 10^{-16}$	$\text{W m}^2\text{ sr}^{-1}$	5.0×10^{-8}
second radiation constant hc/k	c_2	$1.438\,7752(25) \times 10^{-2}$	m K	1.7×10^{-6}
Wien displacement law constants $b = \lambda_{\text{max}} T = c_2/4.965\,114\,231\dots$ $b' = \nu_{\text{max}}/T = 2.821\,439\,372\dots c/c_2$	b b'	$2.897\,7685(51) \times 10^{-3}$ $5.878\,933(10) \times 10^{10}$	m K Hz K^{-1}	1.7×10^{-6} 1.7×10^{-6}

¹ The numerical value of F to be used in coulometric chemical measurements is 96 485.3401(48) [5.0×10^{-8}] when the relevant current is measured in terms of representations of the volt and ohm based on the Josephson and quantum Hall effects and the internationally adopted conventional values of the Josephson and von Klitzing constants K_{J-90} and R_{K-90} given in the ‘‘Adopted values’’ table.

² The entropy of an ideal monoatomic gas of relative atomic mass A_r is given by $S = S_0 + \frac{3}{2}R \ln A_r - R \ln(p/p_0) + \frac{5}{2}R \ln(T/\text{K})$.

Fundamental Physical Constants — Adopted values

Quantity	Symbol	Value	Unit	Relative std. uncert. u_r
relative atomic mass ¹ of ^{12}C	$A_r(^{12}\text{C})$	12		(exact)
molar mass constant	M_u	1×10^{-3}	kg mol ⁻¹	(exact)
molar mass of ^{12}C	$M(^{12}\text{C})$	12×10^{-3}	kg mol ⁻¹	(exact)
conventional value of Josephson constant ²	$K_{\text{J-90}}$	483 597.9	GHz V ⁻¹	(exact)
conventional value of von Klitzing constant ³	$R_{\text{K-90}}$	25 812.807	Ω	(exact)
standard atmosphere		101 325	Pa	(exact)

¹ The relative atomic mass $A_r(X)$ of particle X with mass $m(X)$ is defined by $A_r(X) = m(X)/m_u$, where $m_u = m(^{12}\text{C})/12 = M_u/N_A = 1 \text{ u}$ is the atomic mass constant, N_A is the Avogadro constant, and u is the atomic mass unit. Thus the mass of particle X in u is $m(X) = A_r(X) \text{ u}$ and the molar mass of X is $M(X) = A_r(X)M_u$.

² This is the value adopted internationally for realizing representations of the volt using the Josephson effect.

³ This is the value adopted internationally for realizing representations of the ohm using the quantum Hall effect.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΣΤΙΣ ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ

Τα σύμβολα για τις φυσικές ποσότητες είναι με πλάγια γράμματα, ενώ τα σύμβολα των μαθηματικών συναρτήσεων είναι ορθά. Δίνουμε μερικά από τα μαθηματικά σύμβολα που χρησιμοποιούνται στις Φυσικές Επιστήμες και Τεχνολογία. Αυτά είναι τα συνιστώμενα σύμβολα στα πλαίσια του SI παρόλο που η χρήση τους δεν είναι εντελώς καθιερωμένη.

Σύμβολο	Εφαρμογή	Σημασία
$\stackrel{\text{def}}{=} , \stackrel{\text{d}}{=}$	$a \stackrel{\text{def}}{=} b, p \stackrel{\text{d}}{=} mv$	Το a είναι εξ ορισμού ίσο με το b
\equiv	$a \equiv b$	Το $a = b$ αποτελεί ταυτότητα
\approx	$a \approx b$	a περίπου ίσο με b
\sim, \propto	$a \sim b, a \propto b$	Το a είναι ανάλογο του b
$\bar{a}, \langle a \rangle$		Μέση τιμή του a
\sim	$\frac{1}{\sin(x-a)} \sim \frac{1}{x-a}$	Το $\frac{1}{\sin(x-a)}$ (είναι ασυμπτωτικά ίσο με $\frac{1}{x-a}$ καθώς το x τείνει στο a ($x \rightarrow a$)
$e^x, \exp x$		Εκθετική συνάρτηση (βάσης e) του x

ΤΡΙΓΩΝΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ

Δίνουμε τον σωστό διεθνή συμβολισμό στα πλαίσια του Διεθνούς Συστήματος και τον συμβολισμό που (κακώς) μερικοί χρησιμοποιούν στην Ελλάδα.

SI	Ελληνική ονομασία	Ελληνικός συμβολισμός
$\cos x$	συνημίτονο x	συν x
$\sin x$	ημίτονο x	ημ x
$\tan x = \frac{\sin x}{\cos x}$	εφαπτομένη x	εφ x
ή $\operatorname{tg} x = \frac{\sin x}{\cos x}$		
$\cot x = \frac{1}{\tan x}$	συνεφαπτομένη x	σφ x
ή $\operatorname{cotan} x = \frac{1}{\tan x}$		
$\sec x = \frac{1}{\cos x}$	τέμνουσα x	τεμ x

$$\csc x = \frac{1}{\sin x}$$

$$\text{ή } \operatorname{cosec} x = \frac{1}{\sin x}$$

συντέμνουσα x στεμ x

Αντίστροφες τριγωνομετρικές συναρτήσεις

$\arcsin x$	τόξο ημιτόνου x	τοξημ x
$\arccos x$	τόξο συνημιτόνου x	τοξσυν x
$\arctan x$	τόξο εφαπτομένης x	τοξεφ x
(ή $\operatorname{arctg} x$)		
$\operatorname{arccot} x$	τόξο συνεφαπτομένης x	τοξσφ x
$\operatorname{arcsec} x$	τόξο τέμνουσας x	τοξτεμ x
$\operatorname{arccsc} x$	τόξο συντέμνουσας x	τοξστεμ x
(ή $\operatorname{arccosec} x$)		

Για τις αντίστροφες τριγωνομετρικές συναρτήσεις υπάρχει και ο συμβολισμός $\sin^{-1}x$, $\cos^{-1}x$ κ.λπ. ($\eta\mu^{-1}x$, $\sigma\upsilon\nu^{-1}x$, κ.λπ.), ο οποίος όμως καλό είναι να αποφεύγεται, ώστε να μην δημιουργείται σύγχυση με τον συμβολισμό, $\sin^n x$, $\cos^n x$ κ.λπ., που σημαίνει $(\sin x)^n$, $(\cos x)^n$ κ.λπ.

Καλό είναι να τονιστεί ότι πρέπει να χρησιμοποιείται ο διεθνής συμβολισμός (ο προτεινόμενος στα πλαίσια του SI). Το όνομα των συναρτήσεων εξαρτάται από τη συγκεκριμένη γλώσσα κάθε χώρας, αλλά όχι το σύμβολό τους.

ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΙ

$\log_a x$	Λογάριθμος με βάση a του x Αν δεν χρειάζεται να κάνουμε αναφορά στη βάση αλλά απλά να σημειώσουμε τον λογάριθμο, ενός αριθμού x , χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό $\log x$, χωρίς βέβαια αυτό να σημαίνει ότι μπορεί κάποιος να βρει το αποτέλεσμα $\log x$ παρόλο που ο x είναι συγκεκριμένος.
$\ln x$	$\ln x = \log_e x$ Φυσικός λογάριθμος του x (λογάριθμος με βάση το $e = 2,718\ 281\ 8\dots$)
$\lg x$	$\lg x = \log_{10} x$ κοινός δεκαδικός λογάριθμος (με βάση το 10)
$\operatorname{lb} x$	$\operatorname{lb} x = \log_2 x$ δυναδικός λογάριθμος του x (με βάση το 2)

Σημειώνουμε ότι δεν συνιστάται η χρήση του $\log x$ για να δηλώσει $\ln x$, $\lg x$, $\operatorname{lb} x$, $\log_e x$, κ.λπ.

ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ

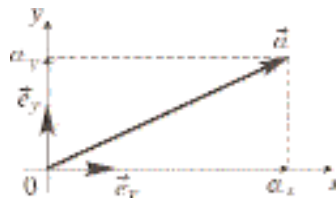
Τα διανύσματα παριστάνονται, συνήθως, με μαύρα (bold) γράμματα στα έντυπα γραπτά, ή με διάνυσμα στο πάνω μέρος, συμβολισμός που προτιμάται και στα χειρόγραφα.

\mathbf{a}, \vec{a}	διάνυσμα
$a, \mathbf{a} , \vec{a} $	μέτρο του διανύσματος \vec{a} (χρησιμοποιείται και τα $\ \mathbf{a}\ , \ \vec{a}\ $)
\vec{e}_a	μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση \vec{a} , $\vec{a} = a\vec{e}_a$
$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$	μοναδιαία διανύσματα στην κατεύθυνση των αντίστοιχων
$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$	καρτεσιανών αξόνων συντεταγμένων
$\vec{e}_i (i = 1, 2, 3)$	
a_x, a_y, a_z	καρτεσιανές συνιστώσες του διανύσματος \vec{a}
$a_i (i = 1, 2, 3)$	

Ένα διάνυσμα \vec{a} σε τρισσορθόγωνιο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων γράφεται ως

$$\vec{a} = a_x\vec{e}_x + a_y\vec{e}_y + a_z\vec{e}_z$$

Τα $a_x\vec{e}_x$ κ.λπ. λέγονται διανυσματικές συνιστώσες σε αντίθεση με τα a_x κ.λπ. που είναι απλώς οι καρτεσιανές συνιστώσες. Πολλές φορές ο κανόνας δεν τηρείται και λέμε συνιστώσα την διανυσματική συνιστώσα. Οι συνιστώσες στους καρτεσιανούς άξονες είναι οι προβολές του διανύσματος στους αντίστοιχους άξονες. Για τις προβολές σε κάποιον άξονα ισχύουν τα ίδια όπως και για τις συνιστώσες. Έχουμε και εδώ προβολή σε άξονα που είναι μονόμετρο (βαθμωτό) μέγεθος και διανυσματικές προβολές σε άξονα. Και εδώ πολλές φορές δεν τηρούμε τον κανόνα της ορολογίας. Η προβολή σε επίπεδο είναι διάνυσμα με δύο συνιστώσες. Πολλές φορές αναφερόμαστε στην προβολή (ή συνιστώσα) σε άξονα και ενώ την παριστάνουμε σωστά με μονόμετρο σύμβολο βάζουμε στο διάγραμμα διάνυσμα για να φαίνεται αν η προβολή (συνιστώσα) είναι θετική ή αρνητική. Προφανές είναι ότι το διάνυσμα αυτό παριστάνει και τη διανυσματική προβολή (ή διανυσματική συνιστώσα).



Σε μερικά συγγράμματα μπορεί να σχεδιάζουν τη μύτη του διανύσματος στη μέση του ευθύγραμμου τμήματος αντί στο τέλος του.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΩΝ ΨΗΦΙΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πειραματική φυσική ασχολείται κυρίως με τον ποσοτικό προσδιορισμό φυσικών μεγεθών. Μερικά πειράματα σχεδιάζονται για να επιβεβαιώσουν γνωστούς νόμους και άλλα για να καθορίσουν εμπειρικές σχέσεις μεταξύ δύο ή περισσότερων μεγεθών. Σε κάθε περίπτωση χρειάζεται να μετρηθούν διάφορες φυσικές ποσότητες και με πολύ απλό ή περίπλοκο τρόπο, με χρήση διαφόρων σχέσεων, να προσδιοριστούν άλλες φυσικές ποσότητες. Κάθε μέτρηση και προσδιορισμός διαφόρων μεγεθών έχει πάντα κάποια απροσδιοριστία ή αλλοιώς κάποιο σφάλμα, όπως συνηθίζεται να λέγεται. Τα σφάλματα είναι τόσο μικρότερα όσο καλύτερες είναι οι μετρήσεις και ο προσδιορισμός των μεγεθών. Αυτό εξαρτάται από τα όργανα που χρησιμοποιούνται, από τη διαδικασία και τους ανθρώπους που εκτελούν τη διαδικασία αυτή. Για παράδειγμα η διάμετρος μιας ράβδου μετρήθηκε και βρέθηκε 56,72 mm, όμως πιο σωστός τρόπος γραφής είναι αυτός που δείχνει και το σφάλμα της μέτρησης, $(56,72 \pm 0,02)$ mm, αυτό θα πει ότι η διάμετρος είναι (περίπου) κάτι μεταξύ 56,70 mm και 56,74 mm. Το 0,02 mm δηλώνει το σφάλμα, δηλαδή την ακρίβεια του προσδιορισμού της διαμέτρου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι σφαλμάτων που οφείλονται σε διάφορες αιτίες όπως, στα όργανα των πειραμάτων ή μετρήσεων ή στον πειραματιστή (παρατηρητή). Χωρίζονται ακόμη σε συστηματικά και τυχαία σφάλματα. Η θεωρία των σφαλμάτων είναι εκτεταμένη και πολύπλοκη, αλλά στο παρόν κείμενο θα περιοριστούμε σε μερικούς απλούς κανόνες που σχετίζονται με υπολογισμούς που έχουν να κάνουν με μετρήσεις ή με τη λύση προβλημάτων και ασκήσεων όπου υπάρχουν και αριθμητικά αποτελέσματα.

ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΨΗΦΙΑ, ΣΤΡΟΓΓΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ

Σημαντικά ψηφία της αριθμητικής τιμής φυσικού μεγέθους είναι τα ψηφία εκείνα που γνωρίζουμε ότι λίγο πολύ είναι σωστά και συμβατά με την ακρίβεια με την οποία ξέρουμε την τιμή του φυσικού μεγέθους. Το τελευταίο σημαντικό ψηφίο έχει λιγότερη πιθανότητα να είναι σωστό. Σήμερα ειδικά με τη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών οι οποίοι μπορούν να δίνουν τα αποτελέσματά τους με πολλά ψηφία, χρειάζεται να καταλάβει κάποιος τη σημασία των αποτελεσμάτων των πράξεων με φυσικά μεγέθη τα οποία έχουν περιορισμένη ακρίβεια στον προσδιορισμό τους. Η διάδοση των σφαλμάτων μέσω διαφόρων σχέσεων και διαδικασιών είναι ολόκληρη επιστήμη και φυσικά δεν θα μας απασχολήσει καθόλου. Θα αρκεστούμε σε απλούς, ικανοποιητικούς κανόνες.

Τα μηδενικά στα αριστερά του μεγαλύτερης τάξης μη μηδενικού ψηφίου δεν υπολογίζονται στην αρίθμηση του πλήθους των σημαντικών ψηφίων.

Τα κατωτέρω παραδείγματα είναι επεξηγηματικά:

1,35	3 σημαντικά ψηφία
0,107	3 σημαντικά ψηφία
0,050 20	4 σημαντικά ψηφία
500	3 σημαντικά ψηφία
500,0	4 σημαντικά ψηφία
50×10^1	2 σημαντικά ψηφία
5×10^2	1 σημαντικό ψηφίο
$1,520 \times 10^5$	4 σημαντικά ψηφία
$1,7 \times 10^{-4}$	2 σημαντικά ψηφία

Πολλές φορές χρειάζεται να στρογγυλοποιηθεί κάποιος αριθμός, δηλαδή να αντικατασταθεί με τον πλησιέστερό του με πιο ακριβή (λιγότερα) σημαντικά ψηφία. Ας υποθέσουμε ότι ένας αριθμός

δικαιολογείται να έχει τρία σημαντικά ψηφία, ενώ από κάποιον υπολογιστή η τιμή του δίνεται ως 0,516 784 252. Ο πλησιέστερος αριθμός με τρία σημαντικά ψηφία είναι ο 0,517, αυτός είναι ο στρογγυλοποιημένος αριθμός. Η στρογγυλοποίηση αυτή είναι στρογγυλοποίηση προς τα άνω, αφού ο τελικός αριθμός είναι μεγαλύτερος του αρχικού.

Αν έχουμε τον 1,723 και πρέπει να στρογγυλοποιηθεί σε δυο σημαντικά ψηφία, τότε καταλήγουμε στον 1,7. Εδώ έχουμε στρογγυλοποίηση προς τα κάτω, αφού ο τελευταίος είναι μικρότερος του αρχικού. Αν έχουμε τον 1,75 και πρέπει να τον στρογγυλέψουμε σε δύο σημαντικά ψηφία, τότε μπορούμε να τον στρογγυλέψουμε προς τα πάνω και να πάρουμε τον 1,8 (πολλοί προτιμούν αυτή τη λύση), αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται στους υπολογιστές. Μια άλλη μέθοδος είναι να κάνουμε τη στρογγυλοποίηση στον κοντινότερο αριθμό με το τελευταίο ψηφίο ζυγό. Αυτό βοηθά σε περιπτώσεις όπως, όταν έχουμε να επεξεργαστούμε σειρά από πολλά δεδομένα, οπότε η διαδικασία αυτή κάνει μικρότερα τα σφάλματα, στρογγυλοποίησης, διότι (σχεδόν) τα μισά θα είναι προς τα πάνω και τα μισά προς τα κάτω.

Έχουμε τότε το 1,75 να γίνεται, με δύο σημαντικά, 1,8 (μεγαλύτερο), ενώ το 2,65 με δύο σημαντικά γίνεται 2,6 (μικρότερο). Η χρήση του επιστημονικού συμβολισμού, σε πολλαπλασιασμό επί δυνάμεις του 10, πολλές φορές επιβάλλεται για αποφυγή ασαφειών. Αν θέλουμε να δηλώσουμε ότι ο αριθμός πεντακόσια έχει δύο σημαντικά ψηφία, τότε δεν μπορούμε να γράψουμε 500, διότι αυτό θα δήλωνε 3 σημαντικά. Ο αριθμός μπορεί να γραφεί 5×10^1 ή $5,0 \times 10^2$ ή $0,50 \times 10^3$ κ.λπ. Χρειάζεται προσοχή όταν γράφουμε μηδενικά στο τέλος του αριθμού, αν δεν είμαστε προσεκτικοί αυτά μπορεί να μην είναι σημαντικά ψηφία.

Πολλές φορές έχουμε αριθμούς που είναι γνωστοί με απόλυτη ακρίβεια και όμως δεν τους γράφουμε με άπειρα σημαντικά ψηφία. Σε τέτοιες περιπτώσεις δηλώνουμε ότι, ο αριθμός είναι, για παράδειγμα, 2 ακριβώς ή αυτό γίνεται αντιληπτό από τα συμφραζόμενα. Είναι ευνόητο αν λέμε ότι έχουμε το διπλάσιο του μήκους, L , και γράφουμε $2 \times L$, τότε το 2 είναι γνωστό με απόλυτη ακρίβεια. Επίσης αν γράφουμε $\pi \times L$ το π θεωρείται γνωστό με άπειρα σημαντικά.

ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΨΗΦΙΑ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΜΟ (ΔΙΑΪΡΕΣΗ) ΚΑΙ ΠΡΟΣΘΕΣΗ (ΑΦΑΪΡΕΣΗ)

Όταν χρησιμοποιούμε γενικά πολύπλοκες εκφράσεις μεταξύ μεγεθών η επίδραση της ασάφειας στη γνώση των αριθμητικών τιμών διαφόρων μεγεθών έχει προφανώς επίδραση στις υπολογιζόμενες ποσότητες. Η ανάλυση της διάδοσης των σφαλμάτων είναι γενικά πολύπλοκη, αλλά εδώ θα περιοριστούμε σε απλούς κανόνες για πολλαπλασιασμό (και διαίρεση) και για πρόσθεση (και αφαίρεση).

Πολλαπλασιασμός (διαίρεση)

Προσδιορίζουμε τα σημαντικά ψηφία του κάθε αριθμού παράγοντα ή διαιρέτη. Κάποιος ή κάποιοι έχουν τον ελάχιστο αριθμό σημαντικών. Το αποτέλεσμα των πράξεων θα έχει αριθμό σημαντικών που δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από αυτόν τον ελάχιστο αριθμό. Στην πράξη ο αριθμός των σημαντικών λαμβάνεται ίσος με αυτό τον ελάχιστο αριθμό.

Παραδείγματα

$$3,25 \times 0,21/0,8 = 0,9$$

$$0,851 \times 0,80 = 0,68$$

$$0,075 \ 2/0,012 = 6,3$$

$$1,35 \times 10^4 \times 0,73/2 \times 10^2 = 0,5 \times 10^2$$

Πρόσθεση (αφαίρεση)

Σε αυτή την περίπτωση αυτό που παίζει ρόλο είναι η τάξη του τελευταίου σημαντικού ψηφίου κάθε αριθμού (ελάχιστη τάξη ψηφίων του αριθμού). Βρίσκουμε την ελάχιστη τάξη για κάθε αριθμό και την μέγιστη από αυτές. Το αποτέλεσμα της πράξης δεν μπορεί να έχει ψηφία με μικρότερη τάξη από την

μέγιστη αυτή τάξη. Στην πράξη παίρνουμε ψηφία μέχρι τη μέγιστη.

Παραδείγματα

10,00 1 ελάχιστη τάξη 10^{-3} (χιλιοστά)

0,000 3 ελάχιστη τάξη 10^{-4} (δέκατα του χιλιοστού)

0,85 ελάχιστη τάξη 10^{-2} (εκατοστά)

Μέγιστη μεταξύ αυτών είναι η 10^{-2} (εκατοστά)

άρα $10,00\ 1 + 0,000\ 3 - 0,85 = 9,15$

124 ελάχιστη τάξη 10^0 (μονάδες)

$5,0 \times 10^2$ ελάχιστη τάξη 10^1 (δεκάδες)

7,8 ελάχιστη τάξη 10^{-1} (δέκατα)

Μέγιστη μεταξύ αυτών είναι η 10^1 (δεκάδες)

άρα $124 - 5,0 \times 10^2 + 7,8 = -3,7 \times 10^2$

Μερικές φορές είναι βολικό να γράφονται οι αριθμοί με τον επιστημονικό συμβολισμό με ίδιες δυνάμεις (αρνητικές ή θετικές) του 10. Στην τελευταία προηγούμενη περίπτωση θα έχουμε,

$1,24 \times 10^2$

$5,0 \times 10^2$

$0,078 \times 10^2$

άρα

$$1,24 \times 10^2 - 5,0 \times 10^2 + 0,078 \times 10^2 = (1,24 - 5,0 + 0,078) \times 10^2 = -3,7 \times 10^2$$

αφού στους αριθμούς της παρένθεσης η μέγιστη τάξη τελευταίου σημαντικού ψηφίου είναι τα δέκατα.

Στην πρόσθεση και αφαίρεση δεν ισχύει κανόνας για το πλήθος των σημαντικών ψηφίων, αλλά ο κανόνας αφορά στο τελευταίο σημαντικό ψηφίο του αποτελέσματος των πράξεων.

Για παράδειγμα στο πρώτο παράδειγμά μας, ενώ υπάρχει ο αριθμός 0,000 3 με ένα σημαντικό ψηφίο το αποτέλεσμα 9,15 έχει τρία σημαντικά.

Παρατήρηση: πρέπει η στρογγυλοποίηση να γίνεται μιά φορά στο τέλος και όχι στα ενδιάμεσα διαδοχικά στάδια διότι το αποτέλεσμα μπορεί να διαφέρει πολύ.

π.χ $1,25 \times 0,85 \times 1,1 = 1,2$ και όχι $1,25 \times 0,85 \times 1,1 = 1,1 \times 0,85 = 0,94$

Όταν κάνουμε ενδιάμεσες πράξεις να χρησιμοποιούμε τουλάχιστο δύο σημαντικά ψηφία περισσότερα από αυτά του αποτελέσματος.

Προσοχή !!

Είναι παραπλανητικό να δίνει κάποιος ένα αποτέλεσμα με περισσότερα σημαντικά ψηφία ή λιγότερα από όσα είναι ικανοποιητικά σωστά. Αυτό σε περιπτώσεις αποτελεσμάτων έρευνας θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντικές παρανοήσεις για την κατανόηση των νόμων της φύσης και θα αποτελούσε οπισθοδρομηση της ανθρώπινης γνώσης για το Σύμπαν.

Όταν οι σχέσεις είναι πολύπλοκες οι ανωτέρω κανόνες δεν είναι πάντα σωστοί. Σε αυτό το βιβλίο, θα θεωρούμε ότι τα σημαντικά ψηφία των δεδομένων φυσικών μεγεθών είναι επαρκή, ώστε το αποτέλεσμα να μπορεί να υπολογιστεί με τουλάχιστο 3 σημαντικά ψηφία, εκτός αν εκφράζεται ρητά κάτι άλλο. Φυσικά, δεν μπορέσαμε να αποφύγουμε τον πειρασμό να έχουμε προβλήματα όπου για λόγους ευκολίας δίνονται αριθμητικές τιμές της μορφής $5\sqrt{2}/7$, ώστε να βγαίνουν εύκολα, στρογγυλά αποτελέσματα!

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΕΡΩΤΗΣΕΩΝ

- 1) $n_2 > n_1$
- 2) (δ)
- 3) (β)
- 4) πίεση $\rightarrow \text{N/m}^2$, όγκος $\rightarrow m^3$
- 5) (γ)
- 6) (γ)
- 7) Γ
- 8) (δ)
- 9) (γ)
- 10) (α) σωστή, (β) λάθος
- 11) (α), (γ)
- 12) (γ)
- 13) (δ)
- 14) Με μικρή M
- 15) Β
- 16) (α) σωστή, (β) λάθος, (γ) σωστή
- 17) -
- 18) -
- 19) -

ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΑΣΚΗΣΕΩΝ

- 1) $V_1 = 0,3733 V_2$
- 2) 380 K
- 3) 2,2 kg
- 4) 840 K
- 5) 277 K
- 6) (α) 4,3 L (β) $4,0 \times 10^{-3}$ kg
- 7) (α) $\frac{m_1}{m_2} = \frac{30}{29}$ (β) προς το δεύτερο δοχείο
- 8) 2,5 cm
- 9) 83,1 cm
- 10) (α) $E_{\text{KH}} = E_{\text{K}_0}$ (β) $v_{\text{rH}} = 4v_{\text{r}_0}$
- 11) $0,5 \times 10^3$ m/s
- 12) 300 m/s
- 13) -
- 14) 800 m/s
- 15) (α) 671 m/s, 507 m/s (β) 525 K
- 16) $3,0 \times 10^{-20}$ J
- 17) (α) 360 K, $7,6 \times 10^{-21}$ J, (β) 1500 m/s
- 18) (α) 200 K, (β) 707 m/s, (γ) 1/2

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΕΡΩΤΗΣΕΩΝ

- 1) (α)
- 2) (γ)
- 3) (β)
- 4) (β), (γ)
- 5) $W_\alpha > W_\beta > W_\gamma$
- 6) (δ)
- 7) 1 (β), 2 (α)
- 8) (α)
- 9) όχι
- 10) -
- 11) (α) Αδιαβατική συμπίεση
(β) Ισόθερμη εκτόνωση
- 12) -
- 13) (α)
- 14) όχι

ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΑΣΚΗΣΕΩΝ

- 1) (α) 10 J, (β) -12 J
- 2) -
- 3) $1,1 \times 10^5$ J
- 4) (α) 600 K, (β) 62400 J, (γ) 24930 J
(δ) 37470 J
- 5) 83 Ω
- 6) 125 J
- 7) (β) 87,5 J, (γ) 275 J
- 8) (β) 370 J
- 9) (β) 45 J
- 10) 31%
- 11) 0,5
- 12) (α) $\gamma = 5/3$,
(β) $W_{\text{AB}} = 1120$ J, $W_{\text{BF}} = 0$, $W_{\text{FA}} = -180$ J,
 $Q_{\text{AB}} = 2800$ J, $Q_{\text{BF}} = -1860$ J, $Q_{\text{FA}} = 0$

- 15) – (γ) 33,6%
 16) (γ) 13) $f = 5$
 17) Αδύνατον 14) 18%
 18) (β) 15) (α) 3600 J, (β) 0,4, (γ) 24 KW
 19) A 16) 0,52
 20) – 17) (α) 40%, (β) 800 J, (γ) -4 J/K
 21) – 18) (α) 13 100 J, 0, -6050 J, (β) 53,8%
 22) (β) (δ) 70,5 KW, (δ) 20,2 J/K
 23) (γ) 19) (α) $6,1 \times 10^4$ J, (β) -740 J/K
 24) (α), (γ), (δ) 20) 46 J/K
 25) (δ) 21) (α) 0, (β) 52 500 J, (γ) 143 J/K
 26) AB (ισόθερμη), ΒΓ (αδιαβατική) 22) (α) $2,0 \times 10^5$ Pa, 600 K, (β) 0,46 J/K
 27) (γ) 23) 26 190 J
 24) (α) $f = 3$, (β) $\Delta S = 0$
 25) (α) 0, (β) 11,5 J/K
 26) (α) 600 K, (β) 488 K, 1,08 atm
 27) 1,5
 28) –

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΕΡΩΤΗΣΕΩΝ

- 1) –
 2) –
 3) (β)
 4) (γ)
 5) (α)
 6) (α), (δ)
 7) Ναι
 8) (γ)
 9) (γ)
 10) (β)
 11) (γ)
 12) (β)
 13) (γ)
 14) (β)
 15) A (α), Γ (α)
 16) A (α), B (γ)
 17) A (β), B (α)
 18) (β)
 19) (γ)
 20) (δ)
 21) $E_1 > E_2$
 22) (α), (β)
 23) A (α), B (γ)

ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΑΣΚΗΣΕΩΝ

- 1) (i) $\frac{q}{\epsilon_0}$, $\frac{1}{6} \frac{q}{\epsilon_0}$ (ii) $\frac{1}{2} \frac{q}{\epsilon_0}$ (iii) $\frac{1}{8} \frac{q}{\epsilon_0}$
 2) (α) 0, (β) -3,14 Nm²/C, (γ) 3,14 Nm²/C
 3) $E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}$
 4) Δύο σημεία. Το πρώτο απέχει 0,6 m από το A και 2,4 m από το B. Το δεύτερο απέχει 1 m από το A και 4 m από το B.
 5) -18 J
 6) $-3,0 \times 10^{-2}$ J
 7) 7
 8) $x = \frac{6ke^2}{mv_0^2}$
 9) $W = k \frac{q^2}{a} (4 + \sqrt{2})$
 10) $t = 5,7 \times 10^{-8}$ s s = 2,8 cm
 11) (α) 10 cm, 5,0 cm, (β) $1,4 \times 10^5$ m/s, $\theta = 45^\circ$
 (γ) 50 V
 12) (α) 1,0 μs, (β) 1,0 cm, (γ) $0,89 \times 10^5$ m/s, $\varphi = 27^\circ$

- 24) (β)
 25) (β), (γ)
 26) –
 27) –
 28) (δ)
- 13) (α) 20 eV, (β) –80 eV, (γ) 80 V
 14) $6,4 \times 10^3$ km
 15) $E = -\frac{3Gm^2}{2a}$
 16) $v_{\max} = 2\sqrt{\frac{Gm}{a}}, a\sqrt{3}$
 17) (α) 12×10^3 m/s, (γ) $1,1 \times 10^4$ m/s
 18) $\frac{4}{3}a$
 19) (α) $-G\frac{m^2}{a}(4 + \sqrt{2})$ (β) $G\frac{m^2}{a}(4 + \sqrt{2})$
 (γ) $\sqrt{\frac{3Gm}{2a}}(4 + \sqrt{2})$
 20) (α) $v_0/2$, (β) $8Gm/7v_0^2$
 21) Μείωση 50%
 22) $1,00 \times 10^5$ V
 23) –
 24) (α) $1,5 \times 10^5$ V/m, (β) $8,0 \times 10^{-16}$ C, (γ) $3,3$ m/s²
 25) 4,0 μF
 26) (α) 2,0 μF, (β) 8 μC, 16 μC, 24 μC
 (γ) 32×10^{-6} J, 64×10^{-6} J, 48×10^{-6} J
 27) (α) 0, 0, (β) 9,60 μC, 38,4 μC
 28) $q_1 = q_2 = 8,0$ μC, $q_3 = 4,0$ μC, $q_4 = 12$ μC,
 $q_6 = 5,0$ μC, $q_7 = 15$ μC
 29) (β) 5,0 mA, 0,10 W, $2,2 \times 10^{-4}$ J

ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΕΡΩΤΗΣΕΩΝ

- 1) (β)
 2) (δ)
 3) (γ)
 4) (γ)
 5) Α (γ), Β (α)
 6) Β, Γ
 7) Νετρόνιο (γ), Πρωτόνιο (x)
 8) (α), (γ)
 9) (α), (β)
 10) –
 11) (γ)
 12) K_1 (πρωτόνιο), K_2 (ιόν Na^+)
 13) όχι

ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΑΣΚΗΣΕΩΝ

- 1) 15 A
 2) $3,8 \times 10^{-4}$ T
 3) $5,0 \times 10^{-5}$ T
 4) Ευθεία παράλληλη στους αγωγούς που απέχει
 6 cm από τον α και 3 cm από τον β.
 5) 4 A
 6) $\frac{\mu_0 I}{2\pi R} \sqrt{\pi^2 + 1}, \tan \theta = 3,14$
 όπου θ η γωνία του \vec{B} με το επίπεδο του
 κυκλικού αγωγού.
 7) 8,3 cm
 8) 1,0 m

- 14) (δ)
 15) (i) $\vec{\delta}$, (ii) $\vec{\zeta}$
 16) (α), (γ)
 17) (I) (α), (II) (δ)
 18) (γ)
 19) (β)
 20) Λάθος
- 9) (i) $3,2 \times 10^5$ m/s, (ii) $6,4 \times 10^5$ m/s,
 (iii) 16×10^5 m/s
 10) (i) 0,10 T, (ii) ακέραιο πολ/σιο του
 $(\pi\sqrt{3} \times 10^{-1}) T \approx 0,54 T$
 11) $R = 9$ cm, $\beta = 42$ cm
 12) 19 cm
 13) (α) Σημείο Λ με $(\Delta\Lambda) = \sqrt{3}$ cm = 1,7 cm
 (β) $6,5 \times 10^{-9}$ s, (γ) $W = 0$
 (δ) $1,0 \times 10^{-23}$ kg m/s
 14) (α) $3,5 \times 10^4$ m/s, (β) 7,2 cm, (γ) 2,1 μs
 15) 0,10 T
 16) 45°
 17) 11 A
 18) $1,0 \times 10^{-4}$ N
 19) 100 A
 20) –
 21) $B = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R^2}$
 22) 7,96 A

ΕΠΑΓΩΓΗ

ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΕΡΩΤΗΣΕΩΝ

- 1) (α), (γ)
 2) Β
 3) (γ)
 4) (α)
 5) (α), (γ)
 6) Γ
 7) Β
 8) του \vec{a}
 9) Δ
 10) (α)
 11) (δ)
 12) (α), (γ)
 13) Από το πλαστικό άκρο
 14) $\vec{\beta}$
 15) (γ)
 16) (β)
 17) (α)
 18) Β
 19) Δ
 20) (γ)
 21) (δ)

ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΑΣΚΗΣΕΩΝ

- 1) 25 V
 2) 0,06 A
 3) Από 0 s έως 1 s: $I = -0,16$ A
 Από 1 s έως 3 s: $I = 0$
 Από 3 s έως 4 s: $I = 0,16$ A
 4) 0,36 T
 5) 16 μC
 6) 0,3 A – 0,2 A – 0,1 A
 7) (α) 5 m/s, (β) 2 V
 8) 5 m/s, $F_L = \frac{10 - v}{5}$
 9) (α) Από 0 s έως 0,2 s: $\Phi = 10t$, $I = -1$ A
 Από 0,2 s έως 0,4 s: $\Phi = 2Wb = \text{σταθ.}$, $I = 0$
 Από 0,4 s έως 0,6 s: $\Phi = 6 - 10t$, $I = 1$ A
 (β) –2 J, 2 J
 10) 15,7 V
 11) 132 V
 12) 5,6 A
 13) $1,6 \times 10^{-4}$ N/C, 78 μA
 14) (β) προς τη φορά κίνησης των δεικτών του ρολογιού

- 22) Το Β την $X_L - f$ και το Δ την $I - f$
 23) Το Α την $X_C - f$ και το Δ την $I - f$
 24) -
 25) Γ
 26) Το εφροιστάσιο
 27) (γ)
 28) -
 29) (α), (γ), (δ)
- (γ) $\pi q \lambda r^2$
 15) 4,0 mH
 16) 0,20 H
 17) (α) 1,5 A, (β) 4,0 A/s
 18) 50%
 19) (α) 2,0 A, (β) 9,0 V
 20) 160 V
 21) $v = 240 \sin 300t$
 22) $v = 80 \sin \left(100 \pi t + \frac{5\pi}{6} \right)$
 23) (α) 6 ms
 (β) $i = 2 \sin \left(\frac{1000\pi}{3} t + \frac{\pi}{2} \right)$
 (γ) 1 A
 24) -
 25) 1/400 s
 26) (α) $i = 2,2 \sin (100 \pi t)$, (β) 484 W, 0
 27) (α) 310 V, (β) $2,2 \times 10^6$ J, 0,60 kWh
 28) 220 Ω
 29) $\pm 3,5$ A
 30) (α) $i = 10\sqrt{2} \sin \left(200 t - \frac{\pi}{2} \right)$, (β) 50 mH
 31) 125V, $i = 5 \sin \left(400 t + \frac{\pi}{2} \right)$
 32) (α) 15 Ω, 50 mH, (β) $\cos \theta_\pi = 0,6$, $\cos \theta_x = 0,94$
 (γ) 160 W, 60 W, 220 W.
 33) (α) 20 Ω, (β) 0,15 H, (γ) 41,6 μF
 34) $R = 60 \Omega$, $L = 0,1$ H
 35) (α) 320 W, (β) 31,2 μF, 1940 W
 36) (α) 19,8 Ω
 (β) $v = 49,5 \sin \left(314 t + \frac{\pi}{4} \right)$
 (γ) $v_\pi = 50,0 \sin (314 t + \theta_\pi)$
 $\mu\epsilon \tan \theta_\pi = 1,33$
 $v_R = 5,00 \sin 314 t$
 $v_C = 5,00 \sin \left(314 t - \frac{\pi}{2} \right)$
 37) (α) $I/2$, (β) $\frac{I}{\sqrt{2}}$

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

- Αδιαβατική μεταβολή 32, 39
 Αμοιβαία επαγωγή 189
 Ampere Andre Marie 158
 Ampere νόμος 157
 ampere ορισμός 154
 Ανορθωμένο (πλήρως) ρεύμα 214
 Ανόρθωση εναλλασσομένου ρεύματος 213
 Ανορθωτές 213
 Αταξία και εντροπία 50
 Αυτεπαγωγή 191
 Αυτεπαγωγής συντελεστής 191
- Van Allen ζώνες 146
 Βαρυτικό πεδίο 99
 Βαρυτικό πεδίο Γης 101
 Biot-Savart νόμος 138
 Boltzmann Ludwig 12
 Boyle νόμος 3
 Brown κίνηση 9
- Γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος 195
 Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος 195
 Gauss Karl 77
 Gauss νόμος 77
 Gay-Lussac νόμος 4
- Διατήρηση ενέργειας 106
 Διατήρηση ορμής 106
 Διατηρητική δύναμη 82
 Διατηρητικό πεδίο 82
 Διαφυγής ταχύτητα 104
 Διηλεκτρικά 113
 Διηλεκτρική σταθερά 114
 Διηλεκτρικού διάτρηση 114
 Διηλεκτρικού πόλωση 115
 Δινορεύματα 186
 Διπολική ηλεκτρική ροπή 114
 Δορυφόρος 104
 Δυναμική ενέργεια μάζας 100, 102
 Δυναμική ενέργεια συστήματος μαζών 100
 Δυναμική ενέργεια συστήματος φορτίων 84
 Δυναμική ενέργεια φορτίου 81
 Δυναμικό (βαρυτικό) 101
 Δυναμικό (ηλεκτρικό) 87
 Δυναμικού διαφορά 87, 101
- Ειδικές θερμότητες 36
 Εμπέδηση 206
 Εναλλασσόμενη τάση 197
- Εναλλασσόμενο ρεύμα 198
 Εναλλασσομένου ρεύματος κυκλώματα 207
 Ενέργεια αποθηκευμένη σε πηνίο 192
 Ενεργός ταχύτητα 10, 13
 Ενεργός τιμή εναλλασσομένης τάσης 202
 Ενεργός τιμή εναλλασσομένου ρεύματος 202
 Ένταση βαρυτικού πεδίου 100
 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου 74
 Εντροπία 47
 Εξομαλυντές 214
 Επαγόμενα ηλεκτρικά πεδία 187
 Επαγόμενη ΗΕΔ σε ευθύγραμμο αγωγό 178
 Επαγόμενη ΗΕΔ σε περιστρεφόμενη ράβδο 183
 Επαγόμενη ΗΕΔ σε περιστρεφόμενο δίσκο 183
 Επαγόμενη ΗΕΔ σε περιστρεφόμενο πλαίσιο 183
 Επαγωγή ηλεκτρομαγνητική 171
 Επαγωγική αντίσταση 204
 Επαγωγικό πηνίο 190
 Έργο αερίου 27
 Εσωτερική ενέργεια 26
- Ηλεκτρικής ενέργειας μεταφορά 213
 Ηλεκτρικό δίπολο 90
 Ηλεκτρικό πεδίο 73
 Ηλεκτρικός κινητήρας 196
 Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής 117
 Ημιανορθωμένο ρεύμα 214
- Θερμοδυναμικές μεταβλητές 25
 Θερμοδυναμική 25
 Θερμοδυναμική ισορροπία 25
 Θερμοδυναμικό αξίωμα δεύτερο 42
 Θερμοδυναμικό αξίωμα πρώτο 28
- Ιδανικού αερίου θερμοκρασία 12
 Ιδανικού αερίου μοντέλο 8
 Ιδανικού αερίου πίεση 10
 Ισοβαρής μεταβολή 31
 Ισόθερμη μεταβολή 30
 Ισοκατανομής της ενέργειας θεώρημα 34
 Ισόχωρη μεταβολή 30
- Καθοδικός σωλήνας 97
 Καραθεοδωρής Κωνσταντίνος 57
 Carnot Sadi 44
 Carnot κύκλος 44
 Carnot κύκλου απόδοση 45
 Καταστατική εξίσωση 5

- Kelvin Lord 43
 Κινητική θεωρία 3
 Clausius 43, 47
 Κορεσμένων ατμών τάση 15
 coulomb ορισμός 154
 Κυκλική μεταβολή 32
 Κυκλοτρόνιο 148

 Laplace δύναμη 151
 Lenz κανόνας 174

 Μαγνητική δύναμη 143
 Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου αγωγού 141
 Μαγνητικό πεδίο κινούμενου φορτίου 137
 Μαγνητικό πεδίο κυκλικού ρεύματος 140
 Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς 159
 Μακροσκοπικές μεταβλητές 3
 Maxwell Boltzmann κατανομή 18
 Maxwell James 215
 Maxwell εξισώσεις 215
 Μέση ισχύς εναλλασσομένου ρεύματος 208
 Μέση κινητική ενέργεια μορίων 10
 Μέση τιμή 10
 Μέση τιμή τετραγώνου 10
 Μεταβλητός πυκνωτής 117
 Μεταβολή αντιστρεπτή 28
 Μεταβολή μη αντιστρεπτή 29
 Μετασχηματιστές 211
 Μηχανές θερμικές 41
 Μηχανές ψυχτικές 42
 Μηχανών θερμικών απόδοση 42
 Μικροσκοπικές μεταβλητές 3
 Millikan πείραμα 126

 Οθόνες TV και H/Y 123
 Oersted πείραμα 137
 Ομοπολική γεννήτρια 185

 Παλμογράφος 122
 Πεδίο B 153
 Περιβάλλον – Ενέργεια 58
 Poisson νόμος 39
 Πυκνωτή ενέργεια 110
 Πυκνωτής 108
 Πυκνωτών συνδεσμολογίες 111
 Πυκνωτών τύποι 115
 Ρεύμα μετατόπισης 217
 Ρίζα μέσης τιμής τετραγώνου 10
 Ροή ηλεκτρική 75
 Ροή μαγνητική 155

 Στατιστική μηχανική 3, 25
 Σύνθετη αντίσταση – εμπέδηση 206
 Συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής 190
 Συντηρητική δύναμη 82
 Συντηρητικό πεδίο 82
 Συντονισμός 209

 Farad 109
 Faraday Michael 171
 Faraday δίσκος 185
 Faraday κανόνας 174
 Faraday νόμος 171
 Φασματογράφος μάζας 147
 Foucault ρεύματα 186

 Χωρητική αντίσταση 205
 Χωρητικότητα πυκνωτή 109

ΤΑ ΝΟΜΙΕΛΑ ΦΥΣΙΚΗΣ 1901 - 2007

Physics 1901

RÖNTGEN, WILHELM CONRAD, Germany, Munich University, b. 1845, d. 1923: "in recognition of the extraordinary services he has rendered by the discovery of the remarkable rays subsequently named after him".

Physics 1902

The prize was awarded jointly to:

LORENTZ, HENDRIK ANTOON, the Netherlands, Leyden University, b. 1853, d. 1928; and

ZEEMAN, PIETER, the Netherlands, Amsterdam University, b. 1865, d. 1943:

"in recognition of the extraordinary service they rendered by their researches into the influence of magnetism upon radiation phenomena"

Physics 1903

The prize was divided, one half being awarded to:

BECQUEREL, ANTOINE HENRI, France, École Polytechnique, Paris, b. 1852, d. 1908:

"in recognition of the extraordinary services he has rendered by his discovery of spontaneous radioactivity";

the other half jointly to:

CURIE, PIERRE, France, École municipale de physique et de chimie industrielles, (Municipal School of Industrial Physics and Chemistry), Paris, b. 1859, d. 1906; and his wife

CURIE, MARIE, née SKLODOWSKA, France, b. 1867 (in Warsaw, Poland), d. 1934:

"in recognition of the extraordinary services they have rendered by their joint researches on the radiation phenomena discovered by Professor Henri Becquerel"

Physics 1904

RAYLEIGH, Lord (JOHN WILLIAM STRUTT), Great Britain, Royal Institution of Great Britain, London, b. 1842, d. 1919:

"for his investigations of the densities of the most important gases and for his discovery of argon in connection with these studies"

Physics 1905

LENARD, PHILIPP EDUARD ANTON, Germany, Kiel University, b. 1862 (in Pressburg, then Hungary), d. 1947:

"for his work on cathode rays"

Physics 1906

THOMSON, Sir JOSEPH JOHN, Great Britain, Cambridge University, b. 1856, d. 1940:

"in recognition of the great merits of his theoretical and experimental investigations on the conduction of electricity by gases"

Physics 1907

MICHELSON, ALBERT ABRAHAM, U.S.A., Chicago University, b. 1852 (in Strelno, then Germany), d. 1931:

"for his optical precision instruments and the spectroscopic and metrological investigations carried out with their aid"

Physics 1908

LIPPMANN, GABRIEL, France, Sorbonne University, Paris, b. 1845 (in Hollerich, Luxembourg), d. 1921:

"for his method of reproducing colours photographically based on the phenomenon of interference"

Physics 1909

The prize was awarded jointly to:

MARCONI, GUGLIELMO, Italy, Marconi Wireless Telegraph Co. Ltd., London, Great Britain, b. 1874, d. 1937; and

BRAUN, CARL FERDINAND, Germany, Strasbourg University, Alsace (then Germany), b. 1850, d. 1918:

"in recognition of their contributions to the development of wireless telegraphy"

Physics 1910

VAN DER WAALS, JOHANNES DIDERIK, the Netherlands, Amsterdam University, b. 1837, d. 1923:

"for his work on the equation of state for gases and liquids"

Physics 1911

WIEN, WILHELM, Germany, Würzburg University, b. 1864, d. 1928:

"for his discoveries regarding the laws governing the radiation of heat"

Physics 1912

DALÉN, NILS GUSTAF, Sweden, Swedish Gas-Accumulator Co., Lidingö-Stockholm, b. 1869, d. 1937:

"for his invention of automatic regulators for use in conjunction with gas accumulators for illuminating lighthouses and buoys"

Physics 1913

KAMERLINGH-ONNES, HEIKE, the Netherlands, Leyden University b. 1853, d. 1926:

"for his investigations on the properties of matter at low temperatures which led, inter alia to the production of liquid helium"

Physics 1914

VON LAUE, MAX, Germany, Frankfurt-on-the Main University, b. 1879, d. 1960:

"for his discovery of the diffraction of X-rays by crystals"

Physics 1915

The prize was awarded jointly to:

BRAGG, Sir WILLIAM HENRY, Great Britain, London University, b. 1862, d. 1942; and his son

BRAGG, Sir WILLIAM LAWRENCE, Great Britain, Victoria University, Manchester, b. 1890 (in Adelaide, Australia), d. 1971:

"for their services in the analysis of crystal structure by means of X-rays"

Physics 1916

The prize money allocated to the Special Fund of this prize section.

Physics 1917

BARKLA, CHARLES GLOVER, Great Britain, Edinburgh University, b. 1877, d. 1944:

"for his discovery of the characteristic Röntgen radiation of the elements"

Physics 1918

PLANCK, MAX KARL ERNST LUDWIG, Germany, Berlin University, b. 1858, d. 1947:

"in recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta"

Physics 1919

STARK, JOHANNES, Germany, Greifswald University, b. 1874, d. 1957:

"for his discovery of the Doppler effect in canal rays and the splitting of spectral lines in electric fields"

Physics 1920

GUILLAUME, CHARLES EDOUARD, Switzerland, Bureau International des Poids et Mesures (International Bureau of Weights and Measures), Sèvres, b. 1861, d. 1938:

"in recognition of the service he has rendered to precision measurements in Physics by his discovery of anomalies in nickel steel alloys"

Physics 1921

EINSTEIN, ALBERT, Germany and Switzerland, Kaiser-Wilhelm Institut (now Max-Planck-Institut) für Physik, Berlin, b. 1879, d. 1955:

"for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect"

Physics 1922

BOHR, NIELS, Denmark, Copenhagen University, b. 1885, d. 1962:

"for his services in the investigation of the structure of atoms and of the radiation emanating from them"

Physics 1923

MILLIKAN, ROBERT ANDREWS, U.S.A., California Institute of Technology, Pasadena, CA, b. 1868, d. 1953:

"for his work on the elementary charge of electricity and on the photoelectric effect"

Physics 1924

SIEGBAHN, KARL MANNE GEORG, Sweden, Uppsala University, b. 1886, d. 1978:

"for his discoveries and research in the field of X-ray spectroscopy"

Physics 1925

FRANCK, JAMES, Germany, Goettingen University, b. 1882, d. 1964; and

HERTZ, GUSTAV, Germany, Halle University, b. 1887, d. 1975:

"for their discovery of the laws governing the impact of an electron upon an atom"

Physics 1926

PERRIN, JEAN BAPTISTE, France, Sorbonne University, Paris, b. 1870, d. 1942:

"for his work on the discontinuous structure of matter, and especially for his discovery of sedimentation equilibrium"

Physics 1927

The prize was divided equally between:

COMPTON, ARTHUR HOLLY, U.S.A., University of Chicago b. 1892, d. 1962:

"for his discovery of the effect named after him"; and

WILSON, CHARLES THOMSON REES, Great Britain, Cambridge University, b. 1869 (in Glencorse, Scotland), d. 1959:

"for his method of making the paths of electrically charged particles visible by condensation of vapour"

Physics 1928

RICHARDSON, Sir OWEN WILLANS, Great Britain, London University, b. 1879, d. 1959:

"for his work on the thermionic phenomenon and especially for the discovery of the law named after him"

Physics 1929

DE BROGLIE, Prince LOUIS-VICTOR, France, Sorbonne University, Institut Henri Poincaré, Paris, b. 1892, d. 1987:

"for his discovery of the wave nature of electrons"

More...

Physics 1930

RAMAN, Sir CHANDRASEKHARA VENKATA, India, Calcutta University, b. 1888, d. 1970:

"for his work on the scattering of light and for the discovery of the effect named after him"

Physics 1931

The prize money was allocated to the Special Fund of this prize section.

Physics 1932

HEISENBERG, WERNER, Germany, Leipzig University, b. 1901, d. 1976:

"for the creation of quantum mechanics, the application of which has, inter alia, led to the discovery of the allotropic forms of hydrogen"

Physics 1933

SCHRÖDINGER, ERWIN, Austria, Berlin University, Germany, b. 1887, d. 1961; and

DIRAC, PAUL ADRIEN MAURICE, Great Britain, Cambridge University, b. 1902, d. 1984:

"for the discovery of new productive forms of atomic theory"

Physics 1934

The prize money was with 1/3 allocated to the Main Fund and with 2/3 to the Special Fund of this prize section.

Physics 1935

CHADWICK, Sir JAMES, Great Britain, Liverpool University, b. 1891, d. 1974:

"for the discovery of the neutron"

Physics 1936

The prize was divided equally between:

HESS, VICTOR FRANZ, Austria, Innsbruck University, b. 1883, d. 1964:

"for his discovery of cosmic radiation"; and

ANDERSON, CARL DAVID, U.S.A., California Institute of Technology, Pasadena, CA, b. 1905, d. 1991:

"for his discovery of the positron"

Physics 1937

The prize was awarded jointly to:

DAVISSON, CLINTON JOSEPH, U.S.A., Bell Telephone Laboratories, New York, NY, b. 1881, d. 1958; and

THOMSON, Sir GEORGE PAGET, Great Britain, London University, b. 1892, d. 1975:

"for their experimental discovery of the diffraction of electrons by crystals"

Physics 1938

FERMI, ENRICO, Italy, Rome University, b. 1901, d. 1954:

"for his demonstrations of the existence of new radioactive elements produced by neutron irradiation, and for his related discovery of nuclear reactions brought about by slow neutrons"

Physics 1939

LAWRENCE, ERNEST ORLANDO, U.S.A., University of California, Berkeley, CA, b. 1901, d. 1958:

"for the invention and development of the cyclotron and for results obtained with it, especially with regard to artificial radioactive elements"

Physics 1940

The prize money was with 1/3 allocated to the Main Fund and with 2/3 to the Special Fund of this prize section.

Physics 1941

The prize money was with 1/3 allocated to the Main Fund and with 2/3 to the Special Fund of this prize section.

Physics 1942

The prize money was with 1/3 allocated to the Main Fund and with 2/3 to the Special Fund of this prize section.

Physics 1943

STERN, OTTO, U.S.A., Carnegie Institute of Technology, Pittsburg, PA, b. 1888 (in Sorau, then Germany), d. 1969:

"for his contribution to the development of the molecular ray method and his discovery of the magnetic moment of the proton"

Physics 1944

RABI, ISIDOR ISAAC, U.S.A., Columbia University, New York, NY, b. 1898, (in Rymanow, then Austria-Hungary) d. 1988:

"for his resonance method for recording the magnetic properties of atomic nuclei"

Physics 1945

PAULI, WOLFGANG, Austria, Princeton University, NJ, U.S.A., b. 1900, d. 1958:

"for the discovery of the Exclusion Principle, also called the Pauli Principle"

Physics 1946

BRIDGMAN, PERCY WILLIAMS, U.S.A., Harvard University, Cambridge, MA, b. 1882, d. 1961:

"for the invention of an apparatus to produce extremely high pressures, and for the discoveries he made therewith in the field of high pressure physics"

Physics 1947

APPLETON, Sir EDWARD VICTOR, Great Britain, Department of Scientific and Industrial Research, London, b. 1892, d. 1965:

"for his investigations of the physics of the upper atmosphere especially for the discovery of the so-called Appleton layer"

Physics 1948

BLACKETT, Lord PATRICK MAYNARD STUART, Great Britain, Victoria University, Manchester, b. 1897, d. 1974:

"for his development of the Wilson cloud chamber method, and his discoveries therewith in the fields of nuclear physics and cosmic radiation"

Physics 1949

YUKAWA, HIDEKI, Japan, Kyoto Imperial University and Columbia University, New York, NY, U.S.A., b. 1907, d. 1981:

"for his prediction of the existence of mesons on the basis of theoretical work on nuclear forces"

Physics 1950

POWELL, CECIL FRANK, Great Britain, Bristol University, b. 1903, d. 1969:

"for his development of the photographic method of studying nuclear processes and his discoveries regarding mesons made with this method"

Physics 1951

The prize was awarded jointly to:

COCKCROFT, Sir JOHN DOUGLAS, Great Britain, Atomic Energy Research Establishment, Harwell, Didcot, Berks., b. 1897, d. 1967; and

WALTON, ERNEST THOMAS SINTON, Ireland, Dublin University, b. 1903, d. 1995:

"for their pioneer work on the transmutation of atomic nuclei by artificially accelerated atomic particles"

Physics 1952

The prize was awarded jointly to:

BLOCH, FELIX, U.S.A., Stanford University, Stanford, CA, b. 1905 (in Zurich, Switzerland), d. 1983; and

PURCELL, EDWARD MILLS, U.S.A., Harvard University, Cambridge, MA, b. 1912, d. 1997:

"for their development of new methods for nuclear magnetic precision measurements and discoveries in connection therewith"

Physics 1953

ZERNIKE, FRITS (FREDERIK), the Netherlands, Groningen University, b. 1888, d. 1966:

"for his demonstration of the phase contrast method, especially for his invention of the phase contrast microscope"

Physics 1954

The prize was divided equally between:

BORN, MAX, Great Britain, Edinburgh University, b. 1882 (in Breslau, then Germany), d. 1970:

"for his fundamental research in quantum mechanics, especially for his statistical interpretation of the wavefunction"; and
BOTHE, WALTHER, Germany, Heidelberg University, Max-Planck Institut (former Kaiser-Wilhelm-Institut) für medizinische
Forschung, Heidelberg, b. 1891, d. 1957:

"for the coincidence method and his discoveries made therewith"

Physics 1955

The prize was divided equally between:

LAMB, WILLIS EUGENE, U.S.A., Stanford University, Stanford, CA, b. 1913:

"for his discoveries concerning the fine structure of the hydrogen spectrum"; and

KUSCH, POLYKARP, U.S.A., Columbia University, New York, NY, b. 1911 (in Blankenburg, then Germany), d. 1993:

"for his precision determination of the magnetic moment of the electron"

Physics 1956

The prize was awarded jointly, one third each, to:

SHOCKLEY, WILLIAM, U.S.A., Semiconductor Laboratory of Beckman Instruments, Inc., Mountain View, CA, b. 1910 (in
London, Great Britain), d. 1989;

BARDEEN, JOHN, U.S.A., University of Illinois, Urbana, IL, b. 1908, d. 1991; and

BRATTAIN, WALTER Houser, U.S.A., Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, NJ, b. 1902, d. 1987:

"for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect"

Physics 1957

The prize was awarded jointly to:

YANG, CHEN NING, China, Institute for Advanced Study, Princeton, NJ, U.S.A., b. 1922; and

LEE, TSUNG-DAO, China, Columbia University, New York, NY, U.S.A., b. 1926:

"for their penetrating investigation of the so-called parity laws which has led to important discoveries regarding the elementary
particles"

Physics 1958

The prize was awarded jointly to:

CHERENKOV, PAVEL ALEKSEYEVICH, USSR, Physics Institute of USSR Academy of Sciences, Moscow, b. 1904, d. 1990;

FRANK, IL'JA MIKHAILOVICH, USSR, University of Moscow and Physics Institute of USSR Academy of Sciences, Moscow, b.
1908, d. 1990; and

TAMM, IGOR YEVGENYEVICH, USSR, University of Moscow and Physics Institute of USSR Academy of Sciences, Moscow,
b. 1885, d. 1971:

"for the discovery and the interpretation of the Cherenkov effect"

Physics 1959

The prize was awarded jointly to:

SEGRÈ, EMILIO GINO, U.S.A., University of California, Berkeley, CA, b. 1905 (in Tivoli, Italy), d. 1989; and

CHAMBERLAIN, OWEN, U.S.A., University of California, Berkeley, CA, b. 1920:

"for their discovery of the antiproton"

Physics 1960

GLASER, DONALD A., U.S.A., University of California, Berkeley, CA, b. 1926:

"for the invention of the bubble chamber"

Physics 1961

The prize was divided equally between:

HOFSTADTER, ROBERT, U.S.A., Stanford University, Stanford, CA, b. 1915, d. 1990:

"for his pioneering studies of electron scattering in atomic nuclei and for his thereby achieved discoveries concerning the struc-
ture of the nucleons"; and

MÖSSBAUER, RUDOLF LUDWIG, Germany, Technische Hochschule, Munich, and California Institute of Technology,
Pasadena, CA, U.S.A., b. 1929:

"for his researches concerning the resonance absorption of gamma radiation and his discovery in this connection of the effect
which bears his name"

Physics 1962

LANDAU, LEV DAVIDOVICH, USSR, Academy of Sciences, Moscow, b. 1908, d. 1968:

"for his pioneering theories for condensed matter, especially liquid helium"

Physics 1963

The prize was divided, one half being awarded to:

WIGNER, EUGENE P., U.S.A., Princeton University, Princeton, NJ, b. 1902 (in Budapest, Hungary), d. 1995:

"for his contributions to the theory of the atomic nucleus and the elementary particles, particularly through the discovery and application of fundamental symmetry principles";

and the other half jointly to:

GOEPPERT-MAYER, MARIA, U.S.A., University of California, La Jolla, CA, b. 1906 (in Kattowitz, then Germany), d. 1972; and

JENSEN, J. HANS D., Germany, University of Heidelberg, b. 1907, d. 1973:

"for their discoveries concerning nuclear shell structure"

Physics 1964

The prize was divided, one half being awarded to:

TOWNES, CHARLES H., U.S.A., Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, b. 1915; and the other half

jointly to:

BASOV, NICOLAY GENNADIYEVICH, USSR, Lebedev Institute for Physics, Akademija Nauk, Moscow, b. 1922; and

PROKHOROV, ALEKSANDR MIKHAILOVICH, USSR, Lebedev Institute for Physics, Akademija Nauk, Moscow, b. 1916:

"for fundamental work in the field of quantum electronics, which has led to the construction of oscillators and amplifiers based on the maser-laser principle"

Physics 1965

The prize was awarded jointly to:

TOMONAGA, SIN-ITIRO, Japan, Tokyo, University of Education, Tokyo, b. 1906, d. 1979;

SCHWINGER, JULIAN, U.S.A., Harvard University, Cambridge, MA, b. 1918, d. 1994; and

FEYNMAN, RICHARD P., U.S.A., California Institute of Technology, Pasadena, CA, b. 1918, d. 1988:

"for their fundamental work in quantum electrodynamics, with deep-ploughing consequences for the physics of elementary particles"

Physics 1966

KÄSTLER, ALFRED, France, École Normale Supérieure, Université de Paris, b. 1902, d. 1984:

"for the discovery and development of optical methods for studying hertzian resonances in atoms"

Physics 1967

BETHE, HANS ALBRECHT, U.S.A., Cornell University, Ithaca, NY, b. 1906 (in Strasbourg, then Germany):

"for his contributions to the theory of nuclear reactions, especially his discoveries concerning the energy production in stars"

Physics 1968

ALVAREZ, LUIS W., U.S.A., University of California, Berkeley, CA, b. 1911, d. 1988:

"for his decisive contributions to elementary particle physics, in particular the discovery of a large number of resonance states, made possible through his development of the technique of using hydrogen bubble chamber and data analysis"

Physics 1969

GELL-MANN, MURRAY, U.S.A., California Institute of Technology, Pasadena, CA, b. 1929:

"for his contributions and discoveries concerning the classification of elementary particles and their interactions"

Physics 1970

The prize was divided equally between:

ALFVÉN, HANNES, Sweden, Royal Institute of Technology, Stockholm, b. 1908, d. 1995:

"for fundamental work and discoveries in magneto-hydrodynamics with fruitful applications in different parts of plasma physics";

and

NÉEL, LOUIS, France, University of Grenoble, Grenoble, b. 1904:

"for fundamental work and discoveries concerning antiferromagnetism and ferrimagnetism which have led to important applications in solid state physics"

Physics 1971

GABOR, DENNIS, Great Britain, Imperial College of Science and Technology, London, b. 1900 (in Budapest, Hungary), d.

1979:

"for his invention and development of the holographic method"

Physics 1972

The prize was awarded jointly to:

BARDEEN, JOHN, U.S.A., University of Illinois, Urbana, IL, b. 1908, d. 1991;
COOPER, LEON N., U.S.A., Brown University, Providence, RI, b. 1930; and
SCHRIEFFER, J. ROBERT, U.S.A., University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, b. 1931:
"for their jointly developed theory of superconductivity, usually called the BCS-theory"

Physics 1973

The prize was divided, one half being equally shared between:

ESAKI, LEO, Japan, IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY, U.S.A., b. 1925; and
GIAEVER, IVAR, U.S.A., General Electric Company, Schenectady, NY, b. 1929 (in Bergen, Norway),
"for their experimental discoveries regarding tunneling phenomena in semiconductors and superconductors, respectively"
and the other half to:

JOSEPHSON, BRIAN D., Great Britain, Cambridge University, Cambridge, b. 1940:
"for his theoretical predictions of the properties of a supercurrent through a tunnel barrier, in particular those phenomena which are generally known as the Josephson effects"

Physics 1974

The prize was awarded jointly to:

RYLE, Sir MARTIN, Great Britain, Cambridge University, Cambridge, b. 1918, d. 1984; and
HEWISH, ANTONY, Great Britain, Cambridge University, Cambridge, b. 1924:
"for their pioneering research in radio astrophysics: Ryle for his observations and inventions, in particular of the aperture synthesis technique, and Hewish for his decisive role in the discovery of pulsars"

Physics 1975

The prize was awarded jointly to:

BOHR, AAGE, Denmark, Niels Bohr Institute, Copenhagen, b. 1922;
MOTTELSON, BEN, Denmark, Nordita, Copenhagen, b. 1926 (in Chicago, U.S.A.); and
RAINWATER, JAMES, U.S.A., Columbia University, New York, NY, b. 1917, d. 1986:
"for the discovery of the connection between collective motion and particle motion in atomic nuclei and the development of the theory of the structure of the atomic nucleus based on this connection"

Physics 1976

The prize was divided equally between:

RICHTER, BURTON, U.S.A., Stanford Linear Accelerator Center, Stanford, CA, b. 1931;
TING, SAMUEL C. C., U.S.A., Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, (European Center for Nuclear Research, Geneva, Switzerland), b. 1936:
"for their pioneering work in the discovery of a heavy elementary particle of a new kind"

Physics 1977

The prize was divided equally between:

ANDERSON, PHILIP W., U.S.A., Bell Laboratories, Murray Hill, NJ, b. 1923;
MOTT, Sir NEVILL F., Great Britain, Cambridge University, Cambridge, b. 1905, d. 1996; and
VAN VLECK, JOHN H., U.S.A., Harvard University, Cambridge, MA, b. 1899, d. 1980:
"for their fundamental theoretical investigations of the electronic structure of magnetic and disordered systems"

Physics 1978

The prize was divided, one half being awarded to:

KAPITSA, PYOTR LEONIDOVICH, USSR, Academy of Sciences, Moscow, b. 1894, d. 1984:
"for his basic inventions and discoveries in the area of low-temperature physics";
and the other half divided equally between:
PENZIAS, ARNO A., U.S.A., Bell Laboratories, Holmdel, NJ, b. 1933 (in Munich, Germany); and
WILSON, ROBERT W., U.S.A., Bell Laboratories, Holmdel, NJ, b. 1936:
"for their discovery of cosmic microwave background radiation"

Physics 1979

The prize was divided equally between:

GLASHOW, SHELDON L., U.S.A., Lyman Laboratory, Harvard University, Cambridge, MA, b. 1932;

SALAM, ABDUS, Pakistan, International Centre for Theoretical Physics, Trieste, and Imperial College of Science and Technology, London, Great Britain, b. 1926, d. 1996; and

WEINBERG, STEVEN, U.S.A., Harvard University, Cambridge, MA, b. 1933:

"for their contributions to the theory of the unified weak and electromagnetic interaction between elementary particles, including inter alia the prediction of the weak neutral current"

Physics 1980

The prize was divided equally between:

CRONIN, JAMES, W., U.S.A., University of Chicago, Chicago, IL, b. 1931; and

FITCH, VAL L., U.S.A., Princeton University, Princeton, NJ, b. 1923:

"for the discovery of violations of fundamental symmetry principles in the decay of neutral K-mesons"

Physics 1981

The prize was awarded by one half jointly to:

BLOEMBERGEN, NICOLAAS, U.S.A., Harvard University, Cambridge, MA, b. 1920 (in the Netherlands); and

SCHAWLOW, ARTHUR L., U.S.A., Stanford University, Stanford, CA, b. 1921, d. 1999:

"for their contribution to the development of laser spectroscopy";

and the other half to:

SIEGBAHN, KAI M., Sweden, Uppsala University, Uppsala, b. 1918:

"for his contribution to the development of high-resolution electron spectroscopy"

Physics 1982

WILSON, KENNETH G., U.S.A., Cornell University, Ithaca, NY, b. 1936:

"for his theory for critical phenomena in connection with phase transitions"

Physics 1983

The prize was awarded by one half to:

CHANDRASEKHAR, SUBRAMANYAN, U.S.A., University of Chicago, Chicago, IL, b. 1910 (in Lahore, India), d. 1995:

"for his theoretical studies of the physical processes of importance to the structure and evolution of the stars"

and by the other half to:

FOWLER, WILLIAM A., U.S.A., California Institute of Technology, Pasadena, CA, b. 1911, d. 1995:

"for his theoretical and experimental studies of the nuclear reactions of importance in the formation of the chemical elements in the universe"

Physics 1984

The prize was awarded jointly to:

RUBBIA, CARLO, Italy, CERN, Geneva, Switzerland, b. 1934; and

VAN DER MEER, SIMON, the Netherlands, CERN, Geneva, Switzerland, b. 1925:

"for their decisive contributions to the large project, which led to the discovery of the field particles W and Z, communicators of weak interaction"

Physics 1985

VON KLITZING, KLAUS, Federal Republic of Germany, Max-Planck-Institute for Solid State Research, Stuttgart, b. 1943:

"for the discovery of the quantized Hall effect"

Physics 1986

The prize was awarded by one half to:

RUSKA, ERNST, Federal Republic of Germany, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin, b. 1906, d. 1988:

"for his fundamental work in electron optics, and for the design of the first electron microscope"

and the other half jointly to:

BINNIG, GERD, Federal Republic of Germany, IBM Zurich Research Laboratory, Rüschlikon, Switzerland, b. 1947; and

ROHRER, HEINRICH, Switzerland, IBM Zurich Research Laboratory, Rüschlikon, Switzerland, b. 1933:

"for their design of the scanning tunneling microscope"

Physics 1987

The prize was awarded jointly to:

BEDNORZ, J. GEORG, Federal Republic of Germany, IBM Research Laboratory, Rüschlikon, Switzerland, b. 1950; and

MÜLLER, K. ALEXANDER, Switzerland, IBM Research Laboratory, Rüschlikon, Switzerland, b. 1927:

"for their important breakthrough in the discovery of superconductivity in ceramic materials"

Physics 1988

The prize was awarded jointly to:

LEDERMAN, LEON M., U.S.A., Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL, b. 1922;

SCHWARTZ, MELVIN, U.S.A., Digital Pathways, Inc., Mountain View, CA, b. 1932; and

STEINBERGER, JACK, U.S.A., CERN, Geneva, Switzerland, b. 1921 (in Bad Kissingen, FRG):

"for the neutrino beam method and the demonstration of the doublet structure of the leptons through the discovery of the muon neutrino"

Physics 1989

The prize was awarded by one half to:

RAMSEY, NORMAN F., U.S.A., Harvard University, Cambridge, MA, b. 1915:

"for the invention of the separated oscillatory fields method and its use in the hydrogen maser and other atomic clocks"

and the other half jointly to:

DEHMELT, HANS G., U.S.A., University of Washington, Seattle, WA, b. 1922 (in Görlitz, Germany); and

PAUL, WOLFGANG, Federal Republic of Germany, University of Bonn, Bonn, b. 1913, d. 1993:

"for the development of the ion trap technique"

Physics 1990

The prize was awarded jointly to:

FRIEDMAN, JEROME I., U.S.A., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, b. 1930;

KENDALL, HENRY W., U.S.A., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, b. 1926, d. 1999; and

TAYLOR, RICHARD E., Canada, Stanford University, Stanford, CA, U.S.A., b. 1929:

"for their pioneering investigations concerning deep inelastic scattering of electrons on protons and bound neutrons, which have been of essential importance for the development of the quark model in particle physics"

Physics 1991

de GENNES, PIERRE-GILLES, France, Collège de France, Paris, b. 1932:

"for discovering that methods developed for studying order phenomena in simple systems can be generalized to more complex forms of matter, in particular to liquid crystals and polymers"

Physics 1992

CHARPAK, GEORGES, France, École Supérieure de Physique et Chimie, Paris and CERN, Geneva, Switzerland, b. 1924 (in Poland):

"for his invention and development of particle detectors, in particular the multiwire proportional chamber"

Physics 1993

The prize was awarded jointly to:

HULSE, RUSSELL A., U.S.A., Princeton University, Princeton, NJ, b. 1950, and

TAYLOR Jr., JOSEPH H., U.S.A., Princeton University, Princeton, NJ, b. 1941:

"for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"

Physics 1994

The prize was awarded

"for pioneering contributions to the development of neutron scattering techniques for studies of condensed matter"

by one half to: BROCKHOUSE, BERTRAM N., Canada, McMaster University, Hamilton, Ontario, b. 1918:

"for the development of neutron spectroscopy"

and by the other half to: SHULL, CLIFFORD G., U.S.A., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, b. 1915:

"for the development of the neutron diffraction technique"

Physics 1995

The prize was awarded

"for pioneering experimental contributions to lepton physics"

with one half to: PERL, MARTIN L., U.S.A., Stanford University, Stanford, CA, U.S.A., b. 1927,

"for the discovery of the tau lepton"

and with one half to: REINES, FREDERICK, U.S.A., University of California at Irvine, Irvine, CA, U.S.A., b. 1918, d. 1998:

"for the detection of the neutrino"

Physics 1996

The prize was awarded jointly to:

LEE, DAVID M., U.S.A., Cornell University, Ithaca, NY, U.S.A., b. 1931;

OSHEROFF, DOUGLAS D., U.S.A., Stanford University, Stanford, CA, U.S.A., b. 1945; and

RICHARDSON, ROBERT C., U.S.A., Cornell University, Ithaca, NY, U.S.A., b. 1937:

"for their discovery of superfluidity in helium-3"

Physics 1997

The prize was awarded jointly to:

CHU, STEVEN, U.S.A., Stanford University, Stanford, California, U.S.A., b. 1948;
COHEN-TANNOUDJI, CLAUDE, France, Collège de France and École Normale Supérieure, Paris, France, b. 1933; and
PHILLIPS, WILLIAM D., U.S.A., National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, U.S.A, b. 1948:
"for development of methods to cool and trap atoms with laser light"

Physics 1998

The prize was awarded jointly to:

LAUGHLIN, ROBERT B., U.S.A., Stanford University, Stanford, CA, U.S.A., b. 1950;
STÖRMER, HORST L., Germany, Columbia University, New York, NY and Bell Labs, NJ, USA b. 1949; and
TSUI, DANIEL C., U.S.A., Princeton University, Princeton, NJ, U.S.A, b. 1939:
"for their discovery of a new form of quantum fluid with fractionally charged excitations"

Physics 1999

The prize was awarded jointly to:

't HOOFT, GERARDUS, Netherlands, University of Utrecht, Utrecht, the Netherlands, b. 1946; and
VELTMAN, MARTINUS J.G., Netherlands, University of Michigan, USA, b. 1931:
"for elucidating the quantum structure of electroweak interactions in physics"

Physics 2000

The prize was awarded with one half jointly to:

ALFEROV, ZHORES IVANOVICH, Russia, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute, St. Petersburg, Russia, b. 1930;
KROEMER, HERBERT, Federal Republic of Germany, University of California at Santa Barbara, California, USA, b. 1928:
"for developing semiconductor heterostructures used in high-speed- and optoelectronics";

and one half to

KILBY, JACK ST. CLAIR, USA, Texas Instruments, Dallas, Texas, USA, b. 1923, d. 2005:
"for his part in the invention of the integrated circuit"

Physics 2001

The prize was awarded jointly to:

CORNELL, ERIC ALLIN, USA, JILA and National Institute of Standards and Technology (NIST), Boulder, Colorado, USA, b. 1961;

KETTERLE, WOLFGANG, Federal Republic of Germany, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Massachusetts, USA, b. 1957;

WIEMAN, CARL EDWIN, USA, JILA and University of Colorado, Boulder, Colorado, USA, b. 1951:

"for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms, and for early fundamental studies of the properties of the condensates"

Physics 2002

The prize was awarded with one half jointly to:

DAVIS, RAYMOND Jr., USA, Department of Physics and Astronomy, University of Pennsylvania, Philadelphia, USA, b. 1914, d. 2006;

KOSHIBA, MASATOSHI, Japan, International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo, Japan, b. 1926:
"for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos";

and one half to

GIACCONI, RICCARDO, USA, Associated Universities Inc., Washington DC, USA, Associated Universities Inc., Washington DC, USA, b. 1931:

"for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources"

Physics 2003

The prize was awarded jointly to:

ABRIKOSOV, ALEXEI ALEXEEVICH, USA and Russia, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, USA, b. 1928;

GINZBURG, VITALY LAZAREVICH, Russia, P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia, b. 1916; and

LEGGETT, ANTHONY JAMES, UK and USA, University of Illinois, Urbana, Illinois, USA, b. 1938:

"for pioneering contributions to the theory of superconductors and superfluids"

Physics 2004

The prize was awarded jointly to:

GROSS, DAVID J., USA, Kavli Institute for Theoretical Physics, University of California, Santa Barbara, USA, b. 1941;

POLITZER, H. DAVID, USA, California Institute of Technology (Caltech), Pasadena, USA, b. 1949; and

WILCZEK, FRANK, USA, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, USA, b. 1951:

"for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"

Physics 2005

The prize was awarded with one half to:

GLAUBER, ROY J., USA, Harvard University, Cambridge, MA, USA, b. 1925:

"for his contribution to the quantum theory of optical coherence" ; and one half jointly to

HALL, JOHN L., USA, JILA, University of Colorado and National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, USA, b.

1934; and

HANSCH, THEODOR W., Germany, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching and Ludwig-Maximilians-Universität,

Munich, Germany, b. 1941:

"for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique"

Physics 2006

The prize was awarded jointly to:

MATHER, JOHN C., USA, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA, b. 1946; and

SMOOT, GEORGE F., USA, University of California, Berkeley, CA, USA, b. 1945:

"for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"

Physics 2007

The prize was awarded jointly to:

FERT, ALBERT, France, Unite Mixte de Physique CNRS/THALES, Universite Paris-Sud, Orsay, France, b. 1938; and

GRUNBERG, PETER, Germany, Forschungszentrum Jülich, Germany, b. 1939:

"for the discovery of giant magnetoresistance"

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Η βιβλιογραφία που ακολουθεί είναι μέρος αυτής που χρησιμοποιήσαμε και που θεωρούμε ότι είναι χρήσιμη για τον διδάσκοντα και τους μαθητές. Υπάρχει, ακόμη, μεγάλο πλήθος καλών - βοηθημάτων της παράλληλης παιδείας (φροντιστηριακά). Επίσης υπάρχουν και άλλα βιβλία Πανεπιστημιακού επιπέδου, κυρίως στα Αγγλικά, που μπορεί να είναι χρήσιμα. Για μερικά από τα βιβλία που είναι μεταφρασμένα στα Ελληνικά υπάρχουν και νεώτερες εκδόσεις στα Αγγλικά.

- 1) "ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΗ ΦΥΣΙΚΗ" Τόμος Α' και Β' (8η έκδοση 1992) του HUGH D. YOUNG. Απόδοση στην Ελληνική από ομάδα Πανεπιστημιακών, εκδόσεις ΠΑΠΑΖΗΣΗ (1994).
- 2) "PHYSICS FOR SCIENTISTS & ENGINEERS", R.A. SERWAY τόμοι 1, 2, 3, 4 (3rd edition 1983) Απόδοση στην Ελληνική από Λ. Κ. ΡΕΣΒΑΝΗ (1990).
- 3) "ΦΥΣΙΚΗ" Ο HANIAN, τόμοι Α' και Β' (second edition expanded, 1989) ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ - ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ από Α. ΦΙΛΙΠΠΑ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ.
- 4) "ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΗ ΦΥΣΙΚΗ", τόμοι Α,Β,Γ των Αλόνσο-Φινν, 1967, ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ Λ. Κ. ΡΕΣΒΑΝΗΣ, Α. ΦΙΛΙΠΠΑΣ (1979).
- 5) "ΦΥΣΙΚΗ" HALLIDAY, RESNICK ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΟΥ.
- 6) "ΓΕΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ", τόμοι Α, Β, Γ και Δ (1962) του Κ.Α. ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΥ.
- 7) "ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ" BERKLEY, τόμοι 1, 2, 3, 4, 5 (1965), ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ Ε.Μ.Π., 1977.
- 8) PSSC "ΦΥΣΙΚΗ", Έκτη έκδοση, 1985, Απόδοση στα Ελληνικά από ΘΑΝΑΣΗ ΚΩΣΤΙΚΑ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΕΥΤΕΝΙΔΕΙΟΥ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ, 1992.
- 9) "ADVANCED PHYSICS" by Tom Duncan, 4th edition, (1997), JOHN MURRAY.
- 10) "FUNDAMENTALS of PHYSICS", vol I AND II, by B.M. YAVORSKY and A.A. PINSKY, translated from Russian by Nicholas Weinstein, MIR PUBLISHERS MOSCOW.
- 11) "ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ", Τόμοι 1, 2, 3 του KENNETH W. FORD, ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ Γ. ΘΕΟΔΩΡΟΥ - Α. ΘΕΟΔΩΡΟΥ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΟΥ (1980).
- 12) "ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΦΥΣΙΚΗΣ" των Π. ΚΟΚΚΟΤΑ, Β. ΚΑΡΑΠΑΝΑΓΙΩΤΗ, ΙΩΑΝ. ΑΡΝΑΟΥΤΑΚΗ, ΙΩΑΝ. ΚΑΡΑΝΙΚΑ, ΙΩΑΝ. ΚΟΥΡΕΛΗ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΓΡΗΓΟΡΗ, 1988.
- 13) PSSC. "ΦΥΣΙΚΗ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΟΔΗΓΟΣ" Απόδοση στα Ελληνικά από Ν. ΠΑΠΑΣΤΑΜΑΤΙΟΥ, ΕΚΔΟΣΗ ΕΥΤΕΝΙΔΕΙΟΥ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ (1995).
- 14) "PHYSIQUE", Term S, Adolphe Tomasino, Marc Fauris, Christiane Parent, Françoise Patrigon, Christiane Simon, NATHAN, (1995.)
- 15) "IL MONDO DELLA FISICA", UGO AMALDI, ZANICHELLI (1995)
- 16) "A LABORATORY MANUAL OF PHYSICS", SI UNITS, FOURTH EDITION by F. TYLER, EDWARD ARNOLD (PUBLISHERS), (1970).
- 17) "ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ", του ΑΧΙΛΛΕΑ Ν. ΠΑΠΑΠΕΤΡΟΥ, (1946).
- 18) "ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΥΣΙΚΗΣ" ΤΩΝ Κ.Α. ΠΑΛΑΙΟΛΟΓΟΥ-Σ.Γ. ΠΕΡΙΣΤΕΡΑΚΗ. ΤΟΜΟΙ Α,Β ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ Χ.Ι. ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΥ (1951)
- 19) "ΑΤΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ" των Κ.Α. ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΥ-Δ.Ι. ΜΑΡΙΝΟΥ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΟΛΥΜΠΙΑ (1995)
- 20) "ΦΥΣΙΚΗ" ΤΟΜΟΙ Α,Β,Γ του Α.Ε. ΜΑΖΗ, ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΤΗΣ ΕΣΤΙΑΣ (1971)
- 21) "ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΥΣΙΚΗΣ", ΤΟΜΟΙ Ι, ΙΙ, ΙΙΙ των Θ. ΚΟΥΓΙΟΥΖΕΛΗ - Σ. ΠΕΡΙΣΤΕΡΑΚΗ (1960)
- 22) "ΦΥΣΙΚΗ" Β' ΛΥΚΕΙΟΥ των Ν. ΔΑΦΟΝΤΕ, Α. ΚΑΣΕΤΑ, Σ. ΜΟΥΡΙΚΗ ΟΕΔΒ (1990).

23) **“ΦΥΣΙΚΗ Γ ΛΥΚΕΙΟΥ”** των **Ι ΒΛΑΧΟΥ Κ. ΖΑΧΟΥ, Π. ΚΟΚΚΟΤΑ, Γ. ΤΙΜΟΘΕΟΥ, ΟΕΔΒ** (1987).

Εργαστηριακές ασκήσεις φυσικής, τόμοι I, II Τομέας Φυσικής, Εκδόσεις Συμμετρία (1994).

“ΦΥΣΙΚΗ” ΤΟΜΟΙ Α, Β των **Κ. Δ. ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΥ, Δ. Ι. ΜΑΡΙΝΟΥ** ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΟΛΥΜΠΙΑ (1980)

“ADVANCED LEVEL PHYSICS”, 4th Edition, by **M. NELKON and P. RARKER**, Heinemann Educational Books (1977)

27) **“SYMBOLS, UNITS, NOMENCLATURE AND FUNDAMENTAL CONSTANTS IN PHYSICS”**, 1987 Revision, by **E. Richard Cohen and Pierre Giacomo**, Physica 146A (1987) 1-68 North - Holland.

“INTERNATIONAL STANDARD”, ISO 31 0-13, Third Edition, (1992).

“Η ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΣΤΗ ΜΕΓΑΛΗ ΒΡΕΤΤΑΝΙΑ”, Συνέδριο Ε.Ε.Φ Πύργος Ηλείας (1979)