



ΑΝΩΤΕΡΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΣ ΣΧΟΛΕΣ
ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑ

Τόμος Δεύτερος

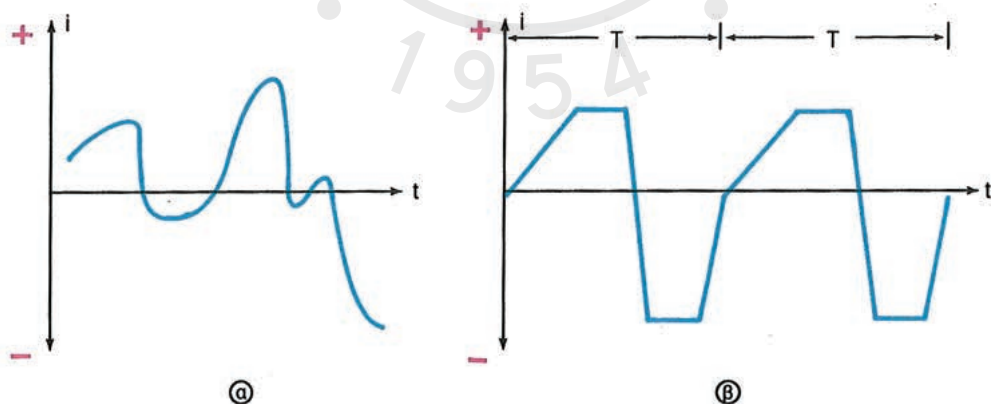
ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ Α. ΠΕΡΡΑΚΗ
ΚΑΘΗΓΗΤΗ ΑΔΣΕΝ ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ

ΜΕΡΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟ
ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ ΡΕΥΜΑΤΑ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΠΕΜΠΤΟ
ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ

15.1 Εισαγωγή – Ορισμοί.

Μέχρι τώρα ασχοληθήκαμε με τα ρεύματα μονής φοράς (συνεχή), δηλαδή τα ρεύματα των οποίων η φορά δεν μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το χρόνο. Στο μέρος αυτό του βιβλίου θα ασχοληθούμε με τα **εναλλασσόμενα ρεύματα**, δηλαδή τα ρεύματα των οποίων η φορά μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το χρόνο, όπως ορίσαμε στην παράγραφο 5.3.

Τα μεταβαλλόμενα ρεύματα διακρίνονται σε **απεριοδικά μεταβαλλόμενα** [σχ. 15.1α(α)] και **περιοδικά μεταβαλλόμενα** [σχ. 15.1α(β)] αναλόγως του εάν η εξάρτηση από το χρόνο είναι απεριοδική ή περιοδική. Έτσι, λέμε ότι στα περιοδικώς μεταβαλλόμενα ή απλά **περιοδικά ρεύματα** η μορφή της καμπύλης του ρεύματος επαναλαμβάνεται σε ίσα χρονικά διαστήματα, η ελάχιστη διάρκεια των οποίων ονομάζεται **περίοδος**, συμβολίζεται με το γράμμα T και μετράται σε δευτερόλεπτα (s).



Σχ. 15.1α.
Μεταβαλλόμενα ρεύματα.
α) Απεριοδικά. β) Περιοδικά.

κάθετο προς το μαγνητικό πεδίο:

$$\alpha = \omega t$$

Άρα η σχέση (15.14) γίνεται:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \sin \omega t = \Phi_0 \sin \omega t \quad (15.15)$$

όπου: $\Phi_0 = B \cdot S$ η μέγιστη μαγνητική ροή που διέρχεται από το πλαίσιο.

Η σχέση (15.15) δείχνει ότι η μαγνητική ροή είναι αρμονική συνάρτηση του χρόνου με πλάτος $\Phi_0 = BS$ και κυκλική συχνότητα ω ίση με τη γωνιακή ταχύτητα του στρεφόμενου πλαισίου.

Σύμφωνα με το νόμο της επαγωγής η επαγωγική ηλεκτρεγερτική δύναμη, που αναπτύσσεται στα άκρα του πλαισίου θα είναι κατά τη σχέση (14.1):

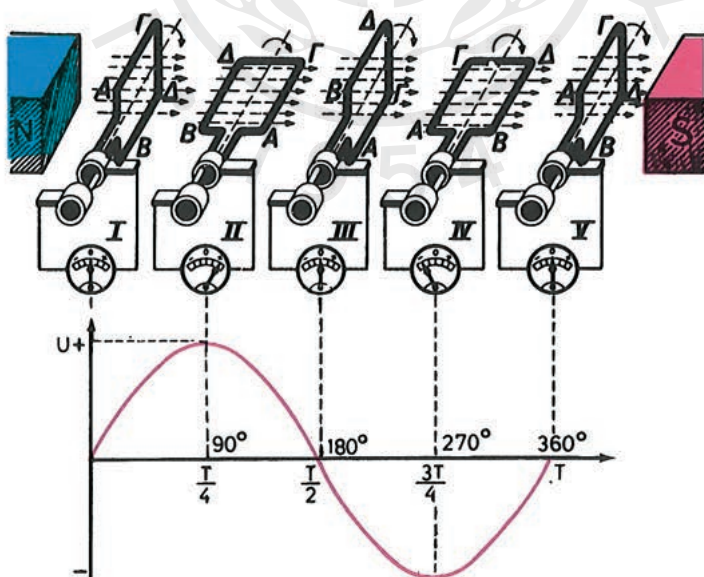
$$u = - \frac{d\Phi}{dt} = \omega \Phi_0 \eta \mu \omega t \rightarrow u = U_0 \eta \mu \omega t \quad (15.16)$$

όπου $U_0 = \Phi_0 \omega = B \omega S$ το πλάτος της τάσεως (15.17)

Από τη σχέση (15.16) παρατηρούμε ότι η παραγόμενη τάση είναι ημιτονική συνάρτηση του χρόνου. Το μέγεθος u εκφράζει τη στιγμιαία τιμή της τάσεως, το U_0 το πλάτος της τάσεως και η γωνία $\alpha = \omega t$ τη φάση της τάσεως.

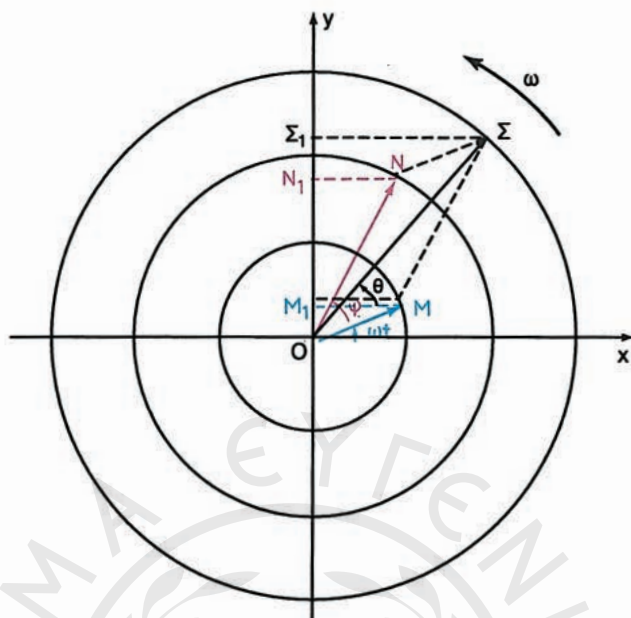
Επίσης από τη σχέση (15.16) παρατηρούμε ότι η τάση μηδενίζεται όταν το πλαίσιο είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές του πεδίου ενώ παίρνει τη μέγιστη τιμή U_0 , όταν το πλαίσιο είναι παράλληλο προς τις δυναμικές γραμμές του πεδίου.

Η θέση του πλαισίου που είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές του πεδίου, ονομάζεται **ουδέτερη γραμμή**. Στο σχήμα 15.4β παριστάνονται πέντε χαρακτη-



Σχ. 15.4β.

Κατά μια στροφή του πλαισίου μέσα στο μαγνητικό πεδίο παράγεται ένας κύκλος τάσεως.



Σχ. 15.7γ.

Πρόσθεση δύο εναλλασσομένων μεγεθών.

άνυσμα $\vec{ON}$ που προηγείται του $\vec{OM}$ κατά γωνία ϕ σχηματίζει με τον άξονα Ox τη γωνία $\omega t + \phi$ (σχ. 15.7γ).

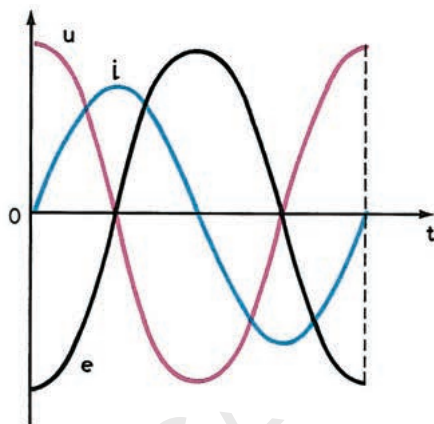
Συνθέτουμε τα δύο διανύσματα με τη μέθοδο του παραλληλόγραμμου και προβάλλουμε τη συνισταμένη $\vec{OS}$ στον άξονα Oy . Παρατηρούμε ότι:

$$(\vec{OS}_1) = (\vec{OM}_1) + (\vec{ON}_1) = U_{10} \eta \mu \omega t + U_{20} \eta \mu (\omega t + \phi) = u_1 + u_2$$

δηλαδή η προβολή OS_1 παριστάνει ακριβώς το ζητούμενο άθροισμα των εναλλασσομένων τάσεων u_1 και u_2 .

Είναι επίσης πολύ εύκολο να δείξουμε ότι η γωνία την οποία σχηματίζει το άνυσμά $\vec{OM}$ με το άνυσμα $\vec{OS}$ ισούται προς τη γωνία θ της σχέσεως (15.44). Άρα, το άνυσμα $\vec{OS}$ πράγματι αποτελεί το περιστρεφόμενο διάνυσμα του αθροίσματος των $u_1(t)$ και $u_2(t)$, τη χρονική στιγμή t . Αν τώρα θεωρήσουμε ότι τό παραλληλόγραμμο ($OM\Sigma NO$) περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από το σημείο O , σύμφωνα με τη φορά του βέλους, η γωνία ωt συνέχεια θα αυξάνεται και σε κάθε χρονική στιγμή οι προβολές των ανυσμάτων $\vec{OM}$ και $\vec{ON}$ θα παριστάνουν τις στιγμιαίες τιμές των τάσεων u_1 και u_2 , ενώ η προβολή της διαγωνίου $\vec{OS}$ θα παριστάνει την αντίστοιχη συνισταμένη τάση. Επίσης από το σχήμα μπορούμε αμέσως να βρούμε το πλάτος (OS) της συνισταμένης τάσεως καθώς και τη διαφορά φάσεως μεταξύ της τάσεως u_1 και της συνισταμένης τάσεως.

Στις επόμενες παραγράφους, αντί να σχεδιάζουμε τα πλάτη των εναλλασσομένων μεγεθών θα σχεδιάζουμε την ενεργό τιμή. Έτσι το αποτέλεσμα της συνθέσεως παρέχει απευθείας την ενεργό τιμή.



Σχ. 16.3γ.

Η εναλλασσόμενη τάση, ένταση και η αυτεπαγωγική ΗΕΔ στα άκρα ενός ιδανικού πηνίου. (Ισόσυγχρα εναλλασσόμενα μεγέθη. Η τάση παρουσιάζει προπορεία φάσεως κατά 90° από την ένταση και κατά 180° από την αυτεπαγωγική ΗΕΔ).

Στο σχήμα 16.3γ παριστάνεται η μεταβολή των u , e και i σε συνάρτηση με το χρόνο.

Η αντίσταση που προβάλλει το πηνίο στο εναλλασσόμενο ρεύμα ονομάζεται **επαγωγική αντίσταση** και ορίζεται από τη σχέση:

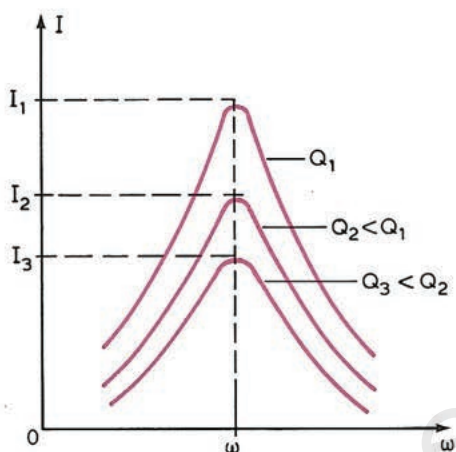
$$X_L = \frac{U_o}{I_o} = \frac{U}{I} \quad (16.9)$$

Από τις σχέσεις (16.7) και (16.9) προκύπτει:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (16.10)$$

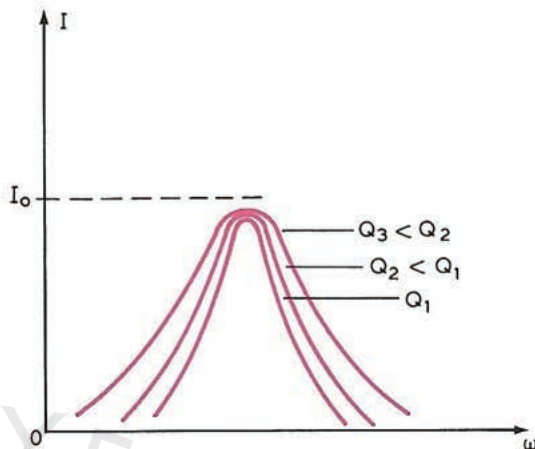
Η σχέση (16.10) μας δείχνει ότι η επαγωγική αντίσταση δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από τη συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσεως και από την αυτεπαγωγή L . (Όταν το πηνίο φέρει πυρήνα ο συντελεστής αυτεπαγωγής L εξαρτάται από τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ , που δεν είναι σταθερή). Όπως φαίνεται από τη σχέση (16.10) σε μεγάλες συχνότητες τα πηνία παρουσιάζουν μεγάλη επαγωγική αντίσταση, ενώ για το συνεχές ρεύμα ($\omega = 0$) η επαγωγική αντίσταση είναι μηδέν. Έτσι τα πηνία εμποδίζουν τη διόδο ρευμάτων υψηλής συχνότητας, ενώ επιτρέπουν τη διόδο ρευμάτων χαμηλής συχνότητας. Πηνία που χρησιμοποιούνται για να παρεμποδίζουν τη διέλευση ρευμάτων των οποίων η συχνότητα είναι μεγαλύτερη από μια ορισμένη συχνότητα, ονομάζονται **αποπνικτικά** ή **στραγγαλιστικά** πηνία.

Μπορούμε επίσης να κατασκευάσουμε πηνίο που να έχει μεγάλη αυτεπαγωγή, ώστε σε χαμηλή συχνότητα να παρουσιάζει φραγμό στη διέλευση εναλλασσόμενου ρεύματος. Θα πρέπει να είναι εφοδιασμένο με πυρήνα και να αποτελείται από μεγάλο αριθμό σπειρών.



Σχ. 16.7η.

Καμπύλες συντονισμού σε κύκλωμα RLC σειράς με παράμετρο το συντελεστή ποιότητας Q , ενώ ο λόγος L/C κρατείται σταθερός:



Σχ. 16.7θ.

Καμπύλες συντονισμού σε κύκλωμα RLC σειράς με παράμετρο το συντελεστή ποιότητας Q , ενώ η τιμή της αντιστάσεως R παραμένει σταθερή.

Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες συντονισμού γίνονται επίσης πιο οξείες και στενές όσο αυξάνει ο λόγος L/C και ο συντελεστής ποιότητας Q . Άρα:

Η μορφή της καμπύλης συντονισμού εξαρτάται αποκλειστικά από το συντελεστή ποιότητας.

Ιδιαίτερη σημασία στην πράξη έχει το πόσο στενή είναι η καμπύλη συντονισμού στην περιοχή κοντά στη συχνότητα συντονισμού. Ένα μέτρο του εύρους της καμπύλης συντονισμού αποτελεί το μέγεθος **ζώνη διελεύσεως** ή **ζώνη συντονισμού** Δf , του κυκλώματος που ορίζεται ως η ζώνη συχνοτήτων που τοποθετείται συμμετρικά, περί τη συχνότητα συντονισμού f_0 μέχρις ότου η ενεργός τιμή της εντάσεως του ρεύματος μειωθεί στο $1/\sqrt{2}$ της μέγιστης της τιμής (I_0). Έτσι, η ζώνη συντονισμού στην καμπύλη του σχήματος 16.7ι είναι:

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (16.56)$$

Οι συχνότητες f_1 και f_2 ορίζονται από τα δύο σημεία της καμπύλης στα οποία το ρεύμα I έχει τιμή ίση προς:

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 0,707 I_0$$

Αποδεικνύεται απλά ότι οι συχνότητες f_1 και f_2 προσδιορίζονται από τις σχέσεις:

$$f_2 = f_0 + \frac{f_0}{2Q} \quad (16.57) \quad \text{και} \quad f_1 = f_0 - \frac{f_0}{2Q} \quad (16.58)$$

Άρα

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q} \quad (16.59)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΕΒΔΟΜΟ

ΙΣΧΥΣ ΣΤΟ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ

17.1 Στιγμιαία ισχύς σε κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος.

Έστω καταναλωτής που παρουσιάζει σύνθετη αντίσταση Z όταν τροφοδοτείται από πηγή εναλλασσόμενης τάσεως $u(t)$, όπως φαίνεται στο σχήμα 17.1α. Σύμφωνα με όσα έχουμε αναφέρει στα δύο προηγούμενα κεφάλαια, αν η τάση στα άκρα του καταναλωτή είναι:

$$u = U_0 \eta \mu \omega t \quad (17.1)$$

τότε, ο καταναλωτής θα διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, η στιγμιαία τιμή του οποίου θα είναι:

$$i = I_0 \eta \mu(\omega t - \varphi) \quad (17.2)$$

όπου φ η διαφορά φάσεως μεταξύ τάσεως και εντάσεως.

Η ισχύς την οποία κάποια χρονική στιγμή t θα παρέχει η πηγή στον καταναλωτή, δηλαδή **η στιγμιαία ισχύς**, υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (15.6), ως:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_0 I_0 \eta \mu \omega t \cdot \eta \mu(\omega t - \varphi) \quad (17.3)$$

$$\text{Ισχύει όμως} \quad \eta \mu \omega t \eta \mu(\omega t - \varphi) = \frac{1}{2} [\sin \varphi - \sin(2\omega t - \varphi)] \quad (17.4)$$

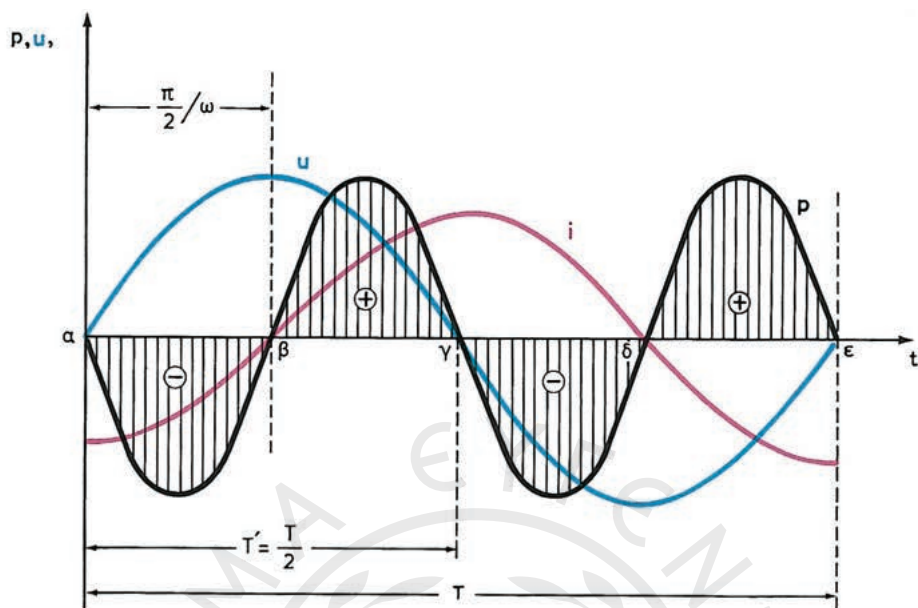
οπότε από τις (17.3) και (17.4) προκύπτει:

$$\begin{aligned} p(t) &= \frac{U_0 I_0}{2} [\sin \varphi - \sin(2\omega t - \varphi)] = \\ &= UI [\sin \varphi - \sin(2\omega t - \varphi)] \end{aligned} \quad (17.5)$$

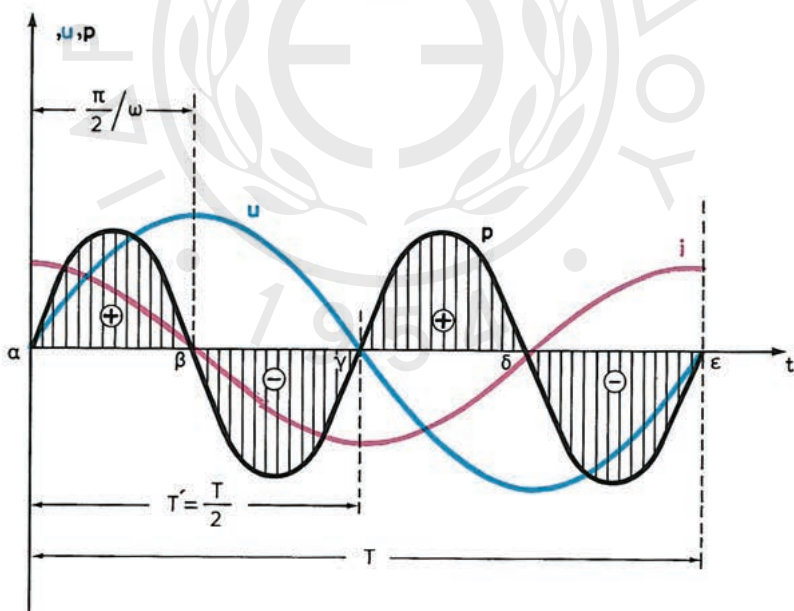
Στο σχήμα 17.1β παριστάνεται γραφικά η μεταβολή της τάσεως u , του ρεύματος i και της ισχύος p με το χρόνο t .

Τόσο από μελέτη της σχέσεως (17.5) όσο και από εποπτεία στο σχήμα 17.1β προκύπτουν τα εξής σημαντικά συμπεράσματα:

- α) Η στιγμιαία ισχύς που παρέχεται από την πηγή στον καταναλωτή αποτελείται από ένα χρονικά σταθερό όρο ($UI \sin \varphi$) και ένα ημιτονοειδή όρο διπλάσιας συχνότητας. Άρα, η ισχύς μεταβάλλεται περιοδικά και μάλιστα με συχνότητα διπλάσια της συχνότητας της τάσεως. Δηλαδή όταν η τάση



Ⓐ



Β

Σχ. 17.28.

Στιγμιαία τάση, ένταση και ισχύς καταναλωτή που παρουσιάζει φασική απόκλιση
 α) $\varphi = \pi/2$, β) $\varphi = -\pi/2$.

17.4 Βελτίωση του συντελεστή ισχύος.

Από τη σχέση $P = UI$ συνφ προκύπτει:

$$I = \frac{P}{U \text{ συνφ}} \quad (17.20)$$

Από τη σχέση (17.20) βλέπουμε ότι για σταθερή πραγματική (μέση) ισχύ και τάση τροφοδοτήσεως η ένταση του ρεύματος είναι αντιστρόφως ανάλογη του συντελεστή ισχύος. Αν π.χ. χρησιμοποιήσουμε για μια ορισμένη εργασία (π.χ. για άντληση νερού) δύο κινητήρες της αυτής ισχύος και τάσεως τροφοδοτήσεως, αλλά με διαφορετικούς συντελεστές ισχύος, ο κινητήρας με το μικρότερο συντελεστή ισχύος θα απορροφήσει από το δίκτυο ρεύμα μεγαλύτερης έντασεως. Αυτό συνεπάγεται αύξηση των θερμικών απωλειών (I^2R), μεγαλύτερη πτώση τάσεως στη γραμμή μεταφοράς και ελάττωση του βαθμού αποδόσεως της εγκαταστάσεως.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι μια συσκευή (ή, κατά προέκταση, ένα ηλεκτρικό δίκτυο) συμφέρει να λειτουργεί με το μικρότερο δυνατό συντελεστή ισχύος. Ας σημειωθεί ότι η ΔΕΗ επιβάλλει στους καταναλωτές που παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή ισχύος πρόσθετη οικονομική επιβάρυνση.

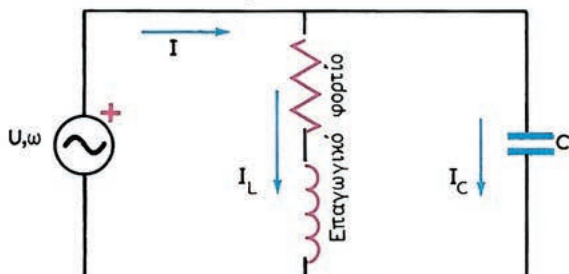
Για να βελτιώσουμε (αυξήσουμε) το συντελεστή ισχύος μιας συσκευής, συνδέουμε παράλληλα προς τη συσκευή ένα πυκνωτή. Για να βρούμε την κατάλληλη τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή εργαζόμαστε ως εξής:

Πρώτος τρόπος: Χρησιμοποίηση πολικού διαγράμματος. Στο σχήμα 17.4α έχει σχεδιασθεί επαγωγικό φορτίο στα άκρα του οποίου εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση με ενεργό τιμή U και κυκλική συχνότητα ω . Ο συντελεστής ισχύος του φορτίου είναι συνφ_1 . Για να τον αυξήσουμε συνδέουμε παράλληλα προς το φορτίο ένα πυκνωτή χωρητικότητας C .

Από το πολικό διάγραμμα (σχ. 17.4β) προκύπτει ότι το ρεύμα I του κλάδου της πηγής έπεται της τάσεως κατά γωνία $\varphi_2 < \varphi_1$, δηλαδή ο συντελεστής ισχύος αυξάνεται.

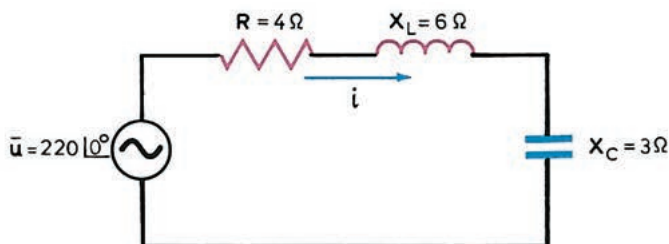
Το ρεύμα I_C που διαρρέει τον πυκνωτή είναι:

$$I_C = \frac{U}{X_C} = U\omega C \quad (17.21)$$

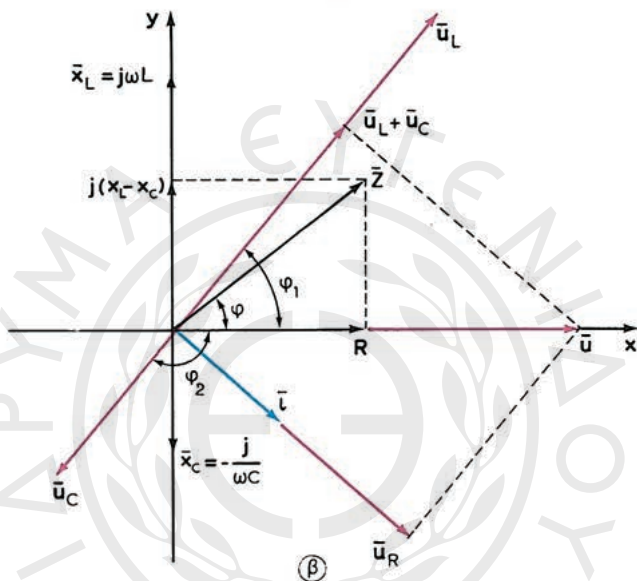


Σχ. 17.4α.

Βελτίωση συνφ καταναλωτή με παράλληλη σύνδεση πυκνωτή.



(α)



(β)

Σχ. 18.56.

(α) Κύκλωμα παραδείγματος 18.5.1. (β) Ανυσματική παράσταση μεγεθών του κυκλώματος.

τίσταση του κυκλώματος θα είναι (σχέση 18.46):

$$\bar{Z} = R + \bar{X}_L + \bar{X}_C = R + jX_L - jX_C = 4 + j3\Omega$$

Το μέτρο της $\bar{Z}$ είναι: $|\bar{Z}| = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \Omega$

και το όρισμά της: $\epsilon\phi\phi = \frac{3}{4} \rightarrow \phi = 36,9^\circ$

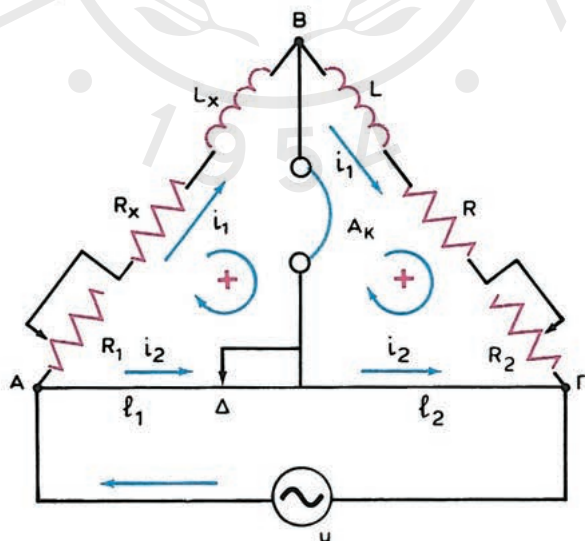
β) Σύμφωνα με το νόμο του Ohm, σχέση (18.51) έχουμε:

$$\bar{i} = \frac{\bar{u}}{\bar{Z}} = \frac{220 \angle 0^\circ}{5 \angle 36,9^\circ} \rightarrow \bar{i} = 44 \angle -36,9^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned}
 &= U \left(\frac{1}{2} - \frac{X_C^2}{R^2 + X_C^2} + \frac{RX_C}{R^2 + X_C^2} j \right) \rightarrow \\
 |\bar{U}_{AB}| &= U_{AB} = U \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{X_C^2}{R^2 + X_C^2} \right)^2 + \frac{R^2 X_C^2}{(R^2 + X_C^2)^2}} = \\
 &= U \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{X_C^4}{(R^2 + X_C^2)^2} - \frac{X_C^2}{R^2 + X_C^2} + \frac{R^2 X_C^2}{(R^2 + X_C^2)^2}} = \\
 &= U \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{X_C^4 + R^2 X_C^2}{(R^2 + X_C^2)^2} - \frac{X_C^2(R^2 + X_C^2)}{(R^2 + X_C^2)^2}} = U \sqrt{\frac{1}{4}} \rightarrow \\
 U_{εξ} &= U_{AB} = \frac{U}{2} = \text{σταθερό.}
 \end{aligned}$$

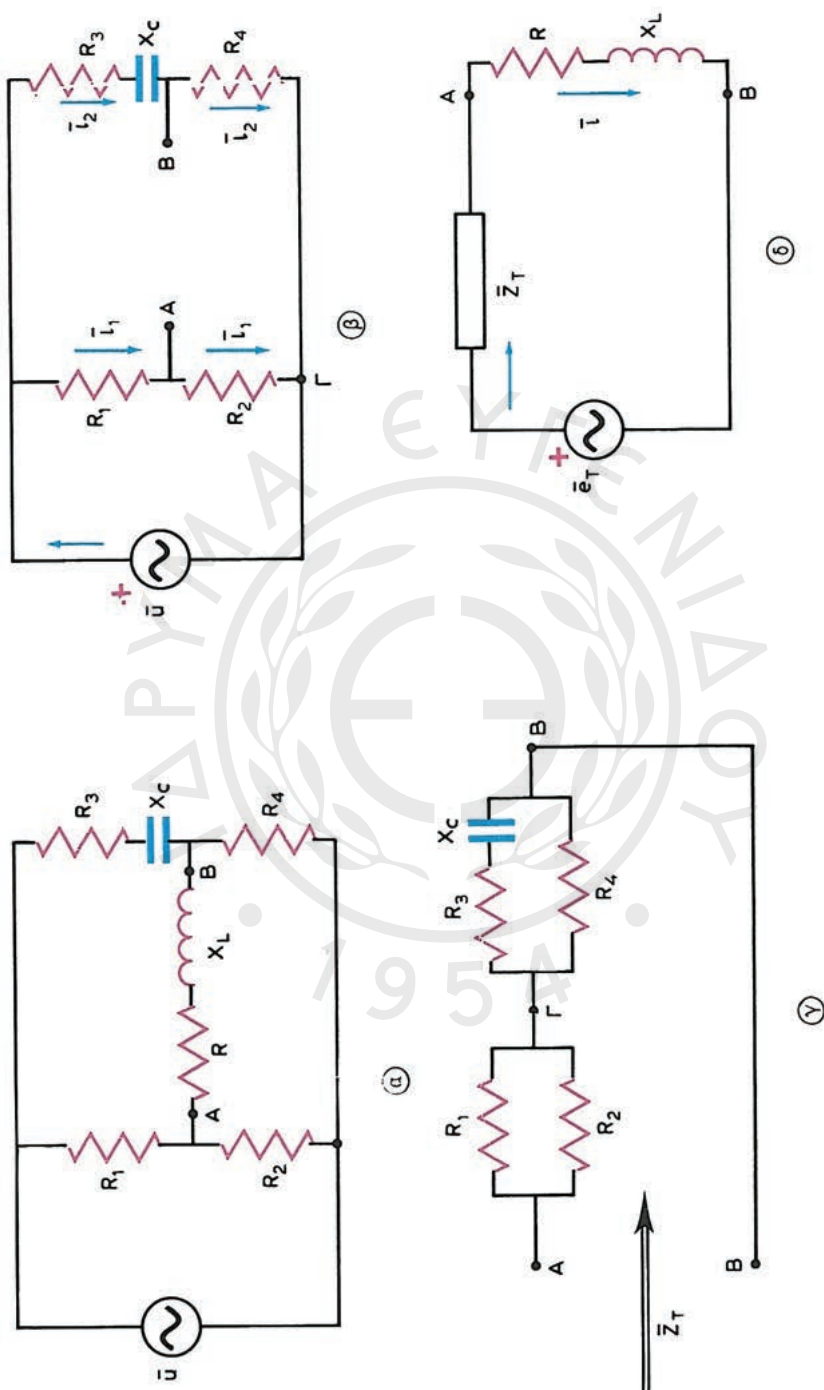
Παράδειγμα 18.5.5.

Η διάταξη του σχήματος 18.5στ αποτελεί γέφυρα εναλλασσόμενου ρεύματος με χορδή η οποία συγκροτείται ανάλογα με τη γέφυρα του Σ.Ρ. που μελετήσαμε στην παράγραφο 7.7.2, με αντικειμενικό σκοπό τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών είτε πηνίου (συντελεστής αυτεπαγωγής, ωμική αντίσταση), όπως στην περίπτωση μας, είτε πυκνωτή. Το πηνίο με άγνωστη αυτε-



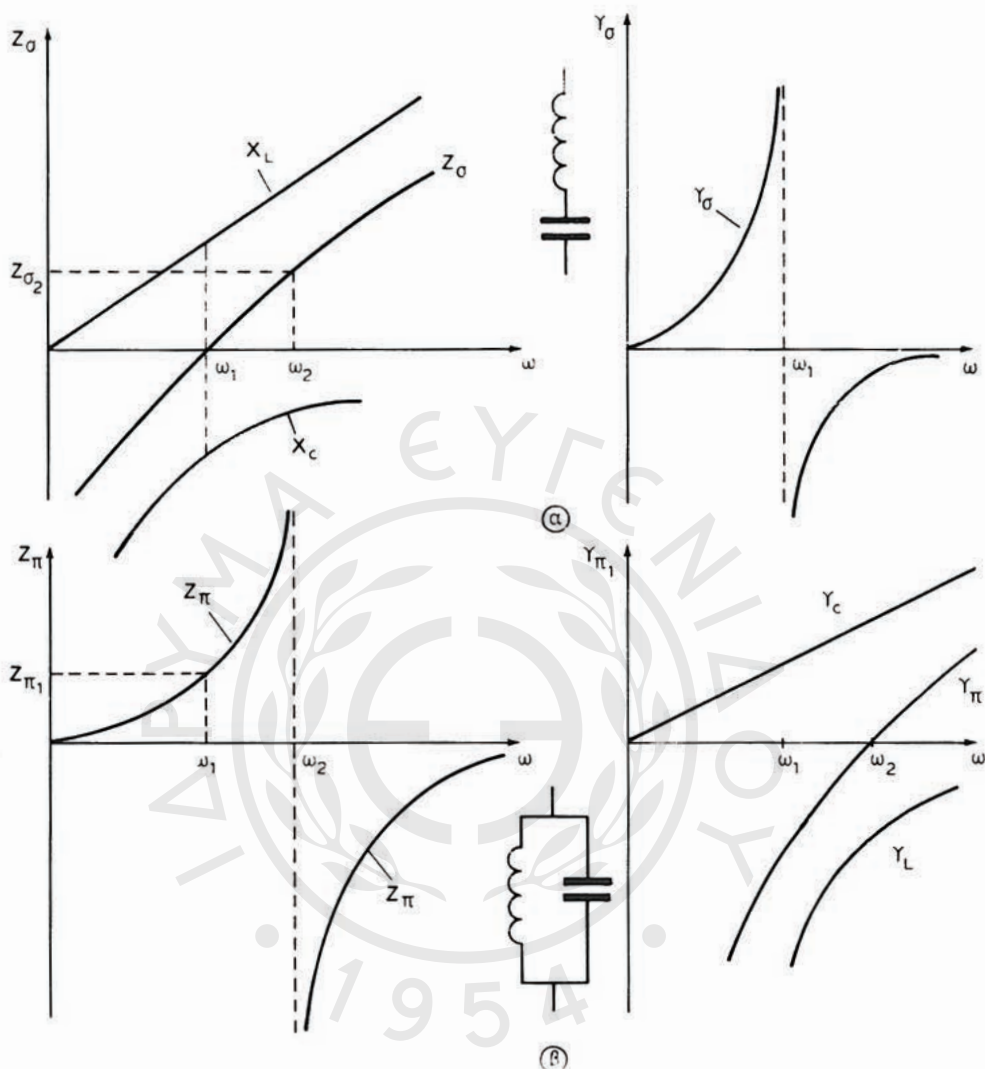
Σχ. 18.5στ.

Γέφυρα εναλλασσόμενου ρεύματος.



Σχ. 18.5η.

α) Κύκλωμα παραδείγματος 18.5.6. β) Κύκλωμα για τον υπολογισμό της τάσεως $\bar{e}_T$. γ) Δικτύωμα του κυκλώματος για τον υπολογισμό της Z_T . δ) Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin.



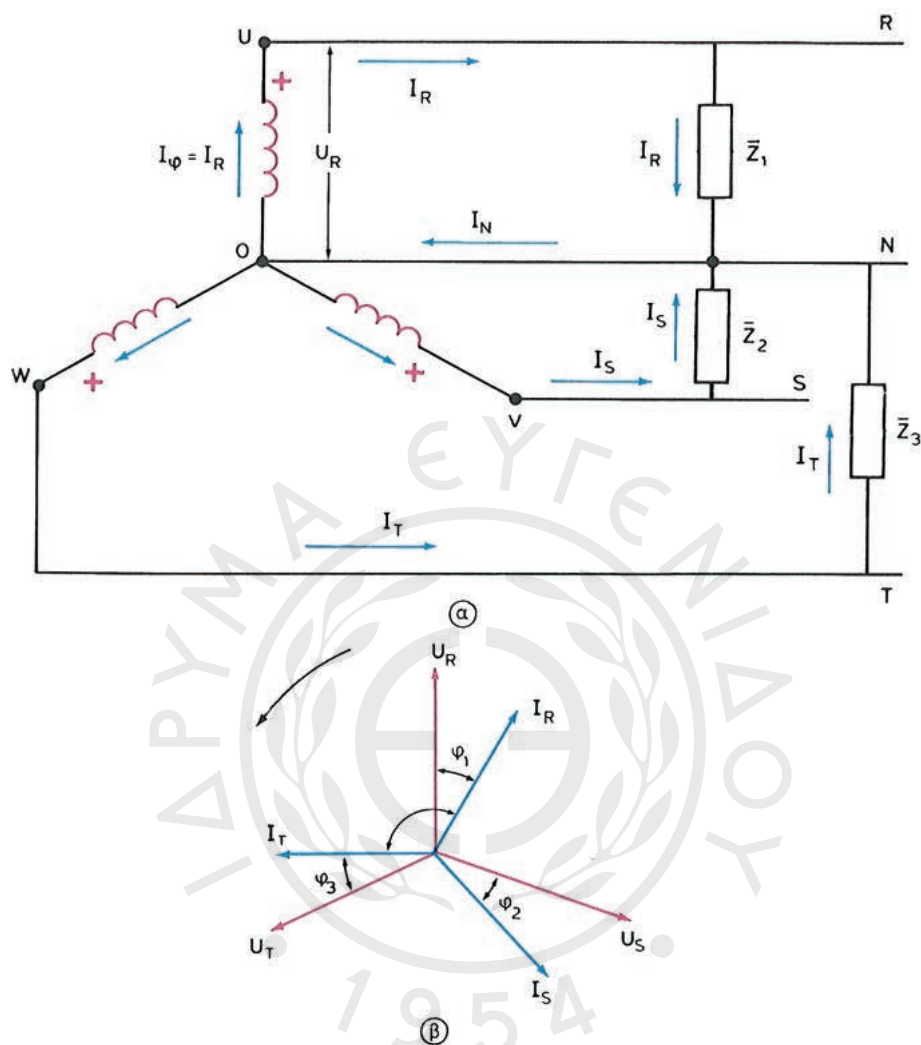
Σχ. 18.6ε.

Καμπύλες σύνθετης αντίστασης (Z) και σύνθετης αγωγιμότητας (Y) κυκλωμάτων (α) συντονισμού σειράς (β) παράλληλου συντονισμού ($\omega_1 < \omega_2$).

σχήμα 18.6στ χαράζουμε τις καμπύλες της σύνθετης αντίστασης και της σύνθετης αγωγιμότητας και στην υπόψη περιοχή συχνοτήτων.

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, η καμπύλη $Z = f(\omega)$ ονομάζεται καμπύλη αποκρίσεως της συχνότητας του κυκλώματος. Η συχνότητα συντονισμού όπου μηδενίζεται η αντίσταση του κυκλώματος ονομάζεται **μηδενικό** ή **κατάσταση μηδενισμού** ενώ η συχνότητα όπου η αντίσταση γίνεται άπειρη ονομάζεται **πόλος**.

Οι πόλοι στην καμπύλη αποκρίσεως συχνότητας συμβολίζονται με σταυρό ενώ τα μηδενικά με κύκλο. Είναι αυτονόητο ότι οι πόλοι και τα μηδενικά ενός κυκλώματος μπορεί να υπολογίζονται αναλυτικά, όπως π.χ. με την επίλυση της εξίσωσης (18.80)



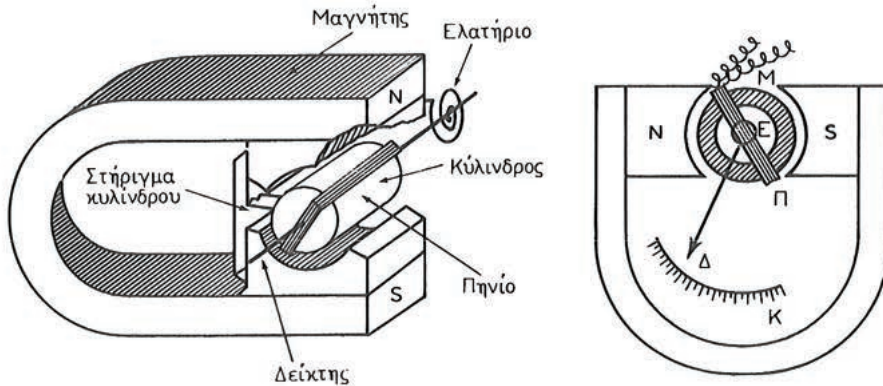
Σχ. 19.3ε.

(α) Σύνδεση φορτίων σε τριφασικό σύστημα κατ' αστέρα. (β) Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και εντάσεων σε σύνδεση κατ' αστέρα. Σε συμμετρική φόρτιση είναι $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3$.

οποίος συνήθως γειώνεται. Ο αγωγός αυτός όμως διαρρέεται από ρεύμα εξισορροπήσεως, που είναι αρκετά μικρότερο από τα ρεύματα των γραμμών. Μπορεί επομένως να έχει μικρότερη διατομή από τους υπόλοιπους τρεις και έτσι να εξασφαλίζεται μεγαλύτερη οικονομία.

19.3.2 Σύνδεση κατά τρίγωνο.

Στην τριγωνική σύνδεση, συνδέεται αγωγίμα το τέλος της πρώτης φάσεως με



Σχ. 20.2α.

Όργανο με στρεφόμενο πλαίσιο (πηνίο).

νεις ώστε στο διάκενο αέρα που σχηματίζεται μεταξύ των πελμάτων και του κυλίνδρου να υφίσταται ακτινωτό μαγνητικό πεδίο πρακτικά σταθερής μαγνητικής επαγωγής.

Ο κύλινδρος στερεώνεται σε άξονα τα άκρα του οποίου διαμορφώνονται σε ακίδες, οι οποίες στηρίζονται σε ειδικά έδρανα (ρουμπίνια ή άλλους πολύτιμους λίθους). Πάνω στον άξονα είναι στερεωμένος λεπτός δείκτης ο οποίος κινείται μπροστά από βαθμολογημένη κλίμακα. Μεταξύ του άξονα και του ακίνητου μέρους, στερεώνεται σπειροειδές ελατήριο Ε, που συγκρατεί το πηνίο στη θέση ισορροπίας. Με στροφή του ελατηρίου αυτού, μέσω ειδικού μοχλού ο οποίος είναι προσαρμοσμένος στο χειριστή του οργάνου, επιτυγχάνεται ώστε όταν το πηνίο δεν διαρρέεται από ρεύμα ο δείκτης του οργάνου να βρίσκεται μπροστά από το μηδέν της κλίμακάς του.

Το ελατήριο αυτό δρα **επανατακτικά**, δηλαδή αν εξαιτίας κάποιας ροπής το πλαίσιο στραφεί κατά γωνία θ , το ελατήριο ασκεί σ' αυτό ροπή M_e η οποία τείνει να το επαναφέρει στη θέση ηρεμίας. Η **επανατακτική ροπή** των ελατηρίων είναι ανάλογη της γωνίας στροφής, δηλαδή όπως γνωρίζουμε από τη Μηχανική ισχύει:

$$M_e = D\theta \quad (20.1)$$

όπου D η σταθερά του ελατηρίου.

Αν, λοιπόν, από το πηνίο περάσει ρεύμα εντάσεως I , ασκείται σ' αυτό ροπή εξ αιτίας των δυνάμεων Laplace που αναπτύσσονται στις παράλληλες προς τον άξονα του πλαισίου πλευρές, η οποία σύμφωνα με όσα έχουμε αναφέρει στην παράγραφο 11.6 και επειδή λόγω του ακτινωτού πεδίου το άνυσμα της επαγωγής είναι συνεχώς κάθετο πάνω στο διάνυσμα $\vec{I}$ που είναι κάθετο στην επιφάνεια του πλαισίου, υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (11.10) και $\varphi = 90^\circ$ ως:

$$M_k = k_1 I \quad (20.2)$$

Υπό την επίδραση των δύο παραπάνω στρεπτικών ροπών οι οποίες δρουν

παράλληλος προς τις δυναμικές γραμμές, ενώ αντίστροφα αν $I_1 \neq 0$ και $I_2 = 0$ ο δείκτης καθίσταται κάθετος προς τις δυναμικές γραμμές. Αν, τέλος $I_1 \neq 0$ και $I_2 \neq 0$ το σύστημα του πηνίου στρέφεται κατά γωνία θ μέχρις ότου οι δυο ροπές M_1 και M_2 καταστούν κατά μέτρο ίσες, οπότε ηρεμεί. Τότε ισχύει:

$$M_1 = M_2$$

$$\text{ή} \quad k_1 I_1 \eta \mu \theta = k_2 I_2 \sigma \nu \theta$$

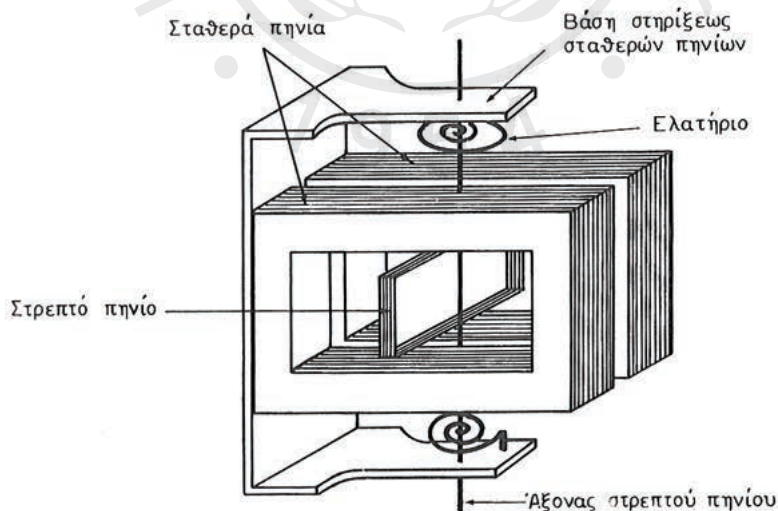
$$\text{ή} \quad \frac{I_2}{I_1} = k \epsilon \phi \theta \quad (20.7)$$

Μπορούμε, λοιπόν, με τα όργανα αυτά να μετράμε, με κατάλληλη βαθμολογία της κλίμακάς τους, λόγο δύο ρευμάτων. Αλλά θα επανέλθουμε, σε επόμενη παράγραφο, να γνωρίσουμε και άλλες εφαρμογές των οργάνων διασταυρωμένων πηνίων.

20.2.3 Ηλεκτροδυναμόμετρα.

Τα ηλεκτροδυναμόμετρα ή **ηλεκτροδυναμικά όργανα** χρησιμεύουν στη μέτρηση της εντάσεως, της τάσεως αλλά και της ισχύος κυκλωμάτων τόσο συνεχούς όσο και εναλλασσόμενου ρεύματος. Η αρχή λειτουργίας των ηλεκτροδυναμομέτρων είναι η ίδια με εκείνη των οργάνων με στρεφόμενο πλαίσιο, με τη διαφορά ότι εδώ το μαγνητικό πεδίο δεν παράγεται από μόνιμο μαγνήτη αλλά από ηλεκτρομαγνήτη. Έτσι, τα ηλεκτροδυναμόμετρα αποτελούνται από ένα πηνίο που στρέφεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το ρεύμα το οποίο διαρρέει ένα ζεύγος σταθερών πηνίων (σχ. 20.25).

Στον άξονα του στρεπτού πηνίου προσαρμόζονται επανатаκτικά ελατήρια, ούτως ώστε, όταν από το σύστημα των δύο πηνίων (στρεπτό, σταθερό) δεν



Σχ. 20.25.
Ηλεκτροδυναμόμετρο.

20.8.1 Ηλεκτροδυναμικός ή βαττομετρικός μετρητής.

Η αρχή λειτουργίας του είναι παρόμοια με εκείνη του ηλεκτροδυναμικού βαττομέτρου. Συγκεκριμένα, ένας ηλεκτροδυναμικός μετρητής (σχ. 20.8α) αποτελείται από δύο σταθερά πηνία Π_1 και Π_2 , τα οποία συνδέονται σε σειρά με την κατανάλωση. Τα πηνία έχουν λίγες σπείρες και το τύλιγμά τους αποτελείται από σύρμα μεγάλης διατομής. Το κινητό μέρος συγκροτείται από πλήθος πηνίων που σχηματίζουν μεταξύ τους ίσες γωνίες. Τα άκρα των πηνίων αυτών συνδέονται με κατάλληλη διάταξη που ονομάζεται συλλέκτης. Ο συλλέκτης συνδέεται παράλληλα προς την κατανάλωση. Στο κύκλωμα παρεμβάλλεται και η προστατευτική αντίσταση R . Ο συλλέκτης εξασφαλίζει την παροχή ρεύματος, κάθε φορά, σε ένα μόνο πηνίο και συγκεκριμένα σε εκείνο, το επίπεδο των σπειρών του οποίου είναι περίπου παράλληλο προς τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, που δημιουργούν τα ακίνητα πηνία.

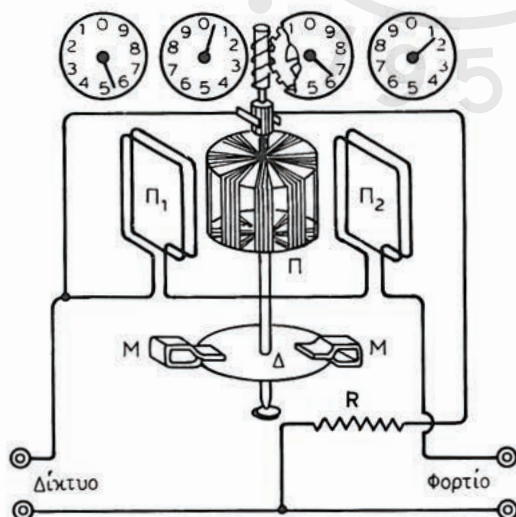
Ο άξονας του κινητού μέρους φέρει δίσκο αλουμινίου Δ , ο οποίος στρέφεται μέσα στο διάκενο πεταλοειδών μονίμων μαγνητών M . Επίσης ο άξονας φέρει ατέρμονα κοχλία, ο οποίος θέτει σε κίνηση σύστημα οδοντωτών τροχών, κατάλληλο για την καταμέτρηση των στροφών του δίσκου.

Οι δυνάμεις Laplace που εξασκούνται στο κινητό μέρος του συστήματος, δημιουργούν ροπή στρέψεως, η οποία είναι ανάλογη προς το γινόμενο της τάσεως επί το ρεύμα της καταναλώσεως, δηλαδή ανάλογη προς την ισχύ.

Έτσι το σύστημα των πηνίων του κινητού μέρους παρασύρεται σε περιστροφή με ταχύτητα περιστροφής ανάλογη προς την ισχύ της καταναλώσεως.

Όταν ο δίσκος Δ περιστρέφεται τότε δημιουργούνται ρεύματα Foucault και επομένως θα εξασκούνται δυνάμεις Laplace, οι οποίες δημιουργούν μια δεύτερη μηχανική ροπή αντίρροπη της πρώτης (κανόνας του Lenz). Από την επίδραση των δύο αντιρρόπων μηχανικών ροπών, το κινητό μέρος αποκτά τελικά μια οριακή γωνιακή ταχύτητα, που είναι ανάλογη προς την ισχύ της καταναλώσεως.

Ο ηλεκτροδυναμικός μετρητής είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και σε δίκτυα

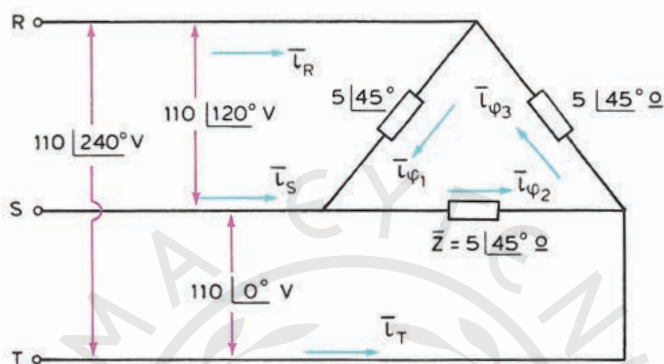


Σχ. 20.8α.
Ηλεκτροδυναμικός μετρητής.

40) Συμμετρικό τριφασικό σύστημα τριών αγωγών τροφοδοτεί τρεις όμοιες σύνθετες αντιστάσεις (σχ. 35) Ζητούνται:

- (α) Τα μιγαδικά ρεύματα που διαρρέουν τις αντιστάσεις.
(β) Τα ρεύματα που διαρρέουν τις γραμμές μεταφοράς.

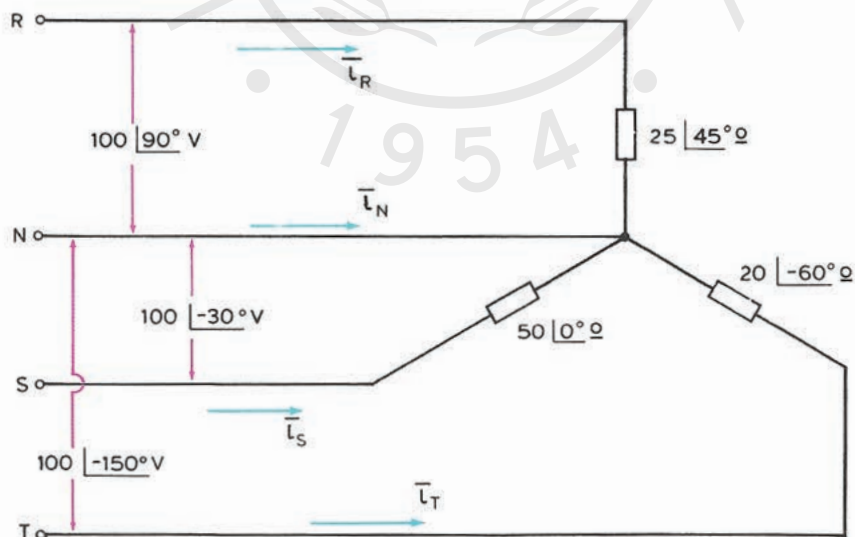
Απάντηση: α) $\bar{I}_{\varphi_1} = 5,7 + j 21,2$, $\bar{I}_{\varphi_2} = 15,5 - j 15,55$, $\bar{I}_{\varphi_3} = -21,2 - j 5,7$
(β) $\bar{I}_R = 38,1 \angle 45^\circ$, $\bar{I}_S = 38,1 \angle -75^\circ$, $\bar{I}_T = 38,1 \angle 165^\circ$



Σχ. 35.

41) Ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα τεσσάρων αγωγών τροφοδοτεί τρεις σύνθετες αντιστάσεις (σχ. 36) Ζητούνται:

- (α) Τα ρεύματα που διαρρέουν τις γραμμές μεταφοράς.
(β) Η μέση ισχύς σε κάθε φορτίο.
(γ) Η άεργη ισχύς σε κάθε φορτίο.



Σχ. 36.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΜΕΡΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ ΡΕΥΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ

15.1	Εισαγωγή - Ορισμοί	1
15.2	Συμπεριφορά των ηλεκτρικών καταναλωτών σε μεταβαλλόμενα ρεύματα	3
15.3	Αρμονικό εναλλασσόμενο ρεύμα	3
15.4	Παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος	6
15.5	Διαφορά φάσεως	11
15.6	Μέση κι ενεργός τιμή εναλλασσομένων μεγεθών	12
15.7	Διανυσματική παράσταση εναλλασσομένων μεγεθών	17
15.7.1	Πρόσθεση εναλλασσομένων μεγεθών	18
15.8	Ανάλυση κατά Fourier	21
15.8.1	Κανόνες για την ανάλυση κατά Fourier	24
15.8.2	Μιγαδική μορφή των σειρών Fourier	26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΕΚΤΟ

ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

16.1	Εισαγωγή	34
16.2	Κύκλωμα που συγκροτείται από ωμική αντίσταση	35
16.3	Κύκλωμα που συγκροτείται από ιδανικό πηνίο	36
16.3.1	Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πραγματικού πηνίου	39
16.4	Κύκλωμα που συγκροτείται από ιδανικό πυκνωτή	40
16.5	Κύκλωμα που συγκροτείται από πηνίο και ωμική αντίσταση σε σειρά	43
16.6	Κύκλωμα που συγκροτείται από πυκνωτή και ωμική αντίσταση σε σειρά	48
16.7	Κύκλωμα που συγκροτείται από ωμική, επαγωγική και χωρητική αντίσταση σε σειρά	51
16.7.1	Συντονισμός σειράς	55
16.7.2	Καμπύλες συντονισμού - Ζώνη διελεύσεως	58
16.7.3	Επιλογή συχνότητας	61
16.8	Κύκλωμα που συγκροτείται από ωμική αντίσταση και πηνίο σε παράλληλη σύνδεση	63
16.9	Κύκλωμα που συγκροτείται από ωμική αντίσταση και πυκνωτή, σε παράλληλη σύνδεση	66
16.10	Κύκλωμα που συγκροτείται από πηνίο και πυκνωτή	68
16.10.1	Παράλληλος συντονισμός (αντισυντονισμός)	70
16.10.2	Καμπύλες παράλληλου συντονισμού (αντισυντονισμού)- Ζώνη διελεύσεως	72
16.10.3	Επιλογή	74

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΕΒΔΟΜΟ

ΙΣΧΥΣ ΣΤΟ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ

17.1	Στιγμιαία ισχύς σε κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος	80
17.2	Πραγματική, φαινόμενη και άεργη ισχύς- Συντελεστής ισχύος	83
17.2.1	Ισχύς συντονισμένου κυκλώματος	87
17.3	Τρίγωνο ισχύος καταναλωτή	91
17.4	Βελτίωση του συντελεστή ισχύος	92

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΟΓΔΟΟ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΜΙΓΑΔΙΚΟΥ ΛΟΓΙΣΜΟΥ

18.1	Εισαγωγή	96
18.2	Στοιχεία μιγαδικού λογισμού	96
18.2.1	Μορφές γραφής μιγαδικών αριθμών	98
18.2.2	Πράξεις επί των μιγαδικών αριθμών	101
18.3	Διάτυπωση ημιτονοειδών συναρτήσεων με εκθετικές - Μιγαδική παράσταση εναλλασσόμενων μεγεθών	102
18.4	Σύνθετη μιγαδική αντίσταση κυκλωμάτων εναλλασσόμενου ρεύματος	107
18.4.1	Σύνθετη μιγαδική αντίσταση ωμικού καταναλωτή	108
18.4.2	Σύνθετη μιγαδική αντίσταση ιδανικού πηνίου	108
18.4.3	Σύνθετη μιγαδική αντίσταση ιδανικού πυκνωτή	109
18.4.4	Σύνθετη μιγαδική αντίσταση κυκλώματος που περιέχει ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις	110
18.5	Νόμοι και θεωρήματα επιλύσεως κυκλωμάτων εναλλασσόμενου ρεύματος	111
18.5.1	Νόμος του Ohm	113
18.5.2	Κανόνες του Kirchhoff	117
18.5.3	Θεωρήματα ηλεκτρικών δικτύων Ε.Ρ.	122
18.5.4	Θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος (θεώρημα προσαρμογής)	126
18.6	Ανάλυση εξειδικευμένων κυκλωμάτων Ε.Ρ. με τη μέθοδο του μιγαδικού λογισμού	131
18.6.1	Συζευγμένα κυκλώματα	131
18.6.2	Συντονισμένα κυκλώματα	135
18.6.3	Πολλαπλός συντονισμός	136

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΕΝΑΤΟ

ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

19.1	Εισαγωγή-Ορισμοί	143
19.2	Παραγωγή τριφασικού ρεύματος	145
19.3	Σύνδεση των φάσεων σε τριφασικό σύστημα	147
19.3.1	Σύνδεση κατ' αστέρα	149
19.3.2	Σύνδεση κατά τρίγωνο	153

19.4	Σύνδεση των φορτίων σε τριφασικό σύστημα	156
19.5	Ισχύς τριφασικών συστημάτων	162
19.5.1	Ισχύς συμμετρικών τριφασικών συστημάτων	163
19.6	Μετατροπή τριγώνου σε ισοδύναμο αστέρα	170

ΜΕΡΟΣ ΠΕΜΠΤΟ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

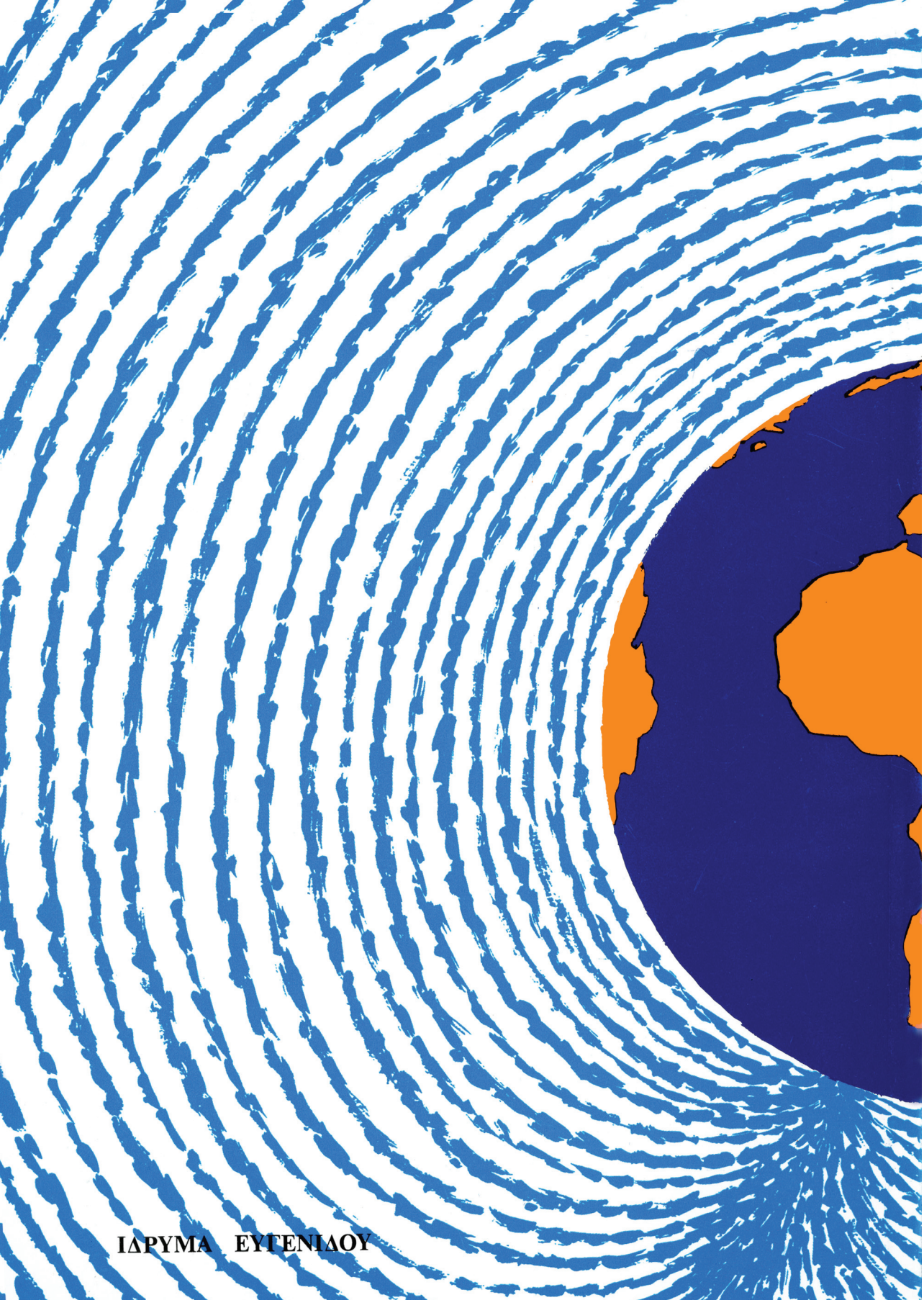
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΙΚΟΣΤΟ

ΟΡΓΑΝΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

20.1	Εισαγωγή	174
20.2	Κατηγορίες ηλεκτρικών οργάνων ανάλογα με την αρχή	176
	λειτουργίας τους	176
20.2.1	Όργανα με στρεφόμενο πλαίσιο	176
20.2.2	Όργανα με διασταυρωμένα πηνία	180
20.2.3	Ηλεκτροδυναμόμετρα	181
20.2.4	Όργανα μαλακού σιδήρου	183
20.2.5	Θερμικά όργανα	184
20.3	Αμπερόμετρα - Γαλβανόμετρα	186
20.3.1	Επέκταση της περιοχής μετρήσεως αμπερομέτρου	187
20.4	Βολτόμετρα	190
20.4.1	Επέκταση της περιοχής μετρήσεως βολτομέτρου	192
20.5	Ωμόμετρα	196
20.5.1	Ωμόμετρα με στρεφόμενο πλαίσιο	197
20.5.2	Ωμόμετρα με διασταυρωμένα πηνία - Ωμόμετρο Megger	199
20.6	Πολύμετρα	201
20.7	Βαττόμετρα	202
20.8	Μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας	203
20.8.1	Ηλεκτροδυναμικός η βαττομετρικός μετρητής	204
20.8.2	Επαγωγικός μετρητής	205
20.9	Συχνόμετρα	206

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΤΕΤΑΡΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ	207
--------------------------------	-----



ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ