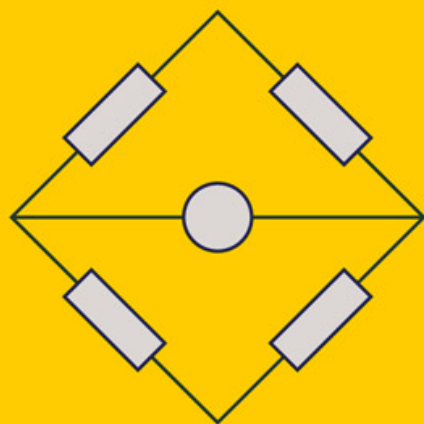


ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Β. ΠΕΤΡΙΔΗ



ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ και ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το πρώτο μέρος αυτού του βιβλίου ασχολείται με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων (τάση, ένταση, ισχύ κ.λπ.). Στόχος του είναι η παρουσίαση και η ανάπτυξη των διαφόρων ηλεκτρικών οργάνων μέτρησης, από τη σκοπιά της χρήσης τους περισσότερο παρά από τη σκοπιά της κατασκευής τους, καθώς και των διατάξεων και μεθόδων μέτρησης.

Τελικός στόχος είναι η ανάπτυξη μιας βαθύτερης κατανόησης των αρχών της μέτρησης ηλεκτρικών ποσοτήτων και των προβλημάτων που σχετίζονται με την επιλογή και την εφαρμογή κάποιας μεθόδου για τη μέτρηση μιας συγκεκριμένης ποσότητας.

Ένα κεφάλαιο αφιερώνεται στον ηλεκτρικό θόρυβο, στα προβλήματα που δημιουργεί και στις προφυλάξεις που πρέπει να παίρνονται κατά περίπτωση ώστε να αποφεύγονται, κατά το δυνατόν, οι επιπτώσεις του.

Επίσης ένα άλλο κεφάλαιο αφιερώνεται στο πάρα πολύ σημαντικό θέμα της προστασίας προσωπικού και οργάνων.

Αντικείμενο του δεύτερου μέρους είναι τα συστήματα μετρήσεων και κυρίως τα αισθητήρια και οι μετατροπείς. Ο κύριος στόχος είναι η παρουσίαση των βασικών αισθητηρίων και μετατροπέων που χρησιμοποιούνται σε διάφορα πεδία εφαρμογής καθώς και των αρχών λειτουργίας τους. Δεν έχει γίνει προσπάθεια να εξαντληθούν όλα τα είδη αισθητηρίων και μετατροπέων που υπάρχουν. Αντίθετα προσπαθήσαμε να κατατάξουμε τα αισθητήρια και τους μετατροπείς βάσει της αρχής λειτουργίας τους. Στο εμπόριο κυκλοφορούν πάρα πολλοί τύποι με διαφορετικά χαρακτηριστικά ενώ παράλληλα αναπτύσσονται συνέχεια νέοι τύποι.

Ένας δεύτερος στόχος είναι η παρουσίαση των βασικών προβλημάτων προσαρμογής των αισθητηρίων και μετατροπέων στο σύστημα μέτρησης. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στους μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και ψηφιακό σε αναλογικό σήμα.

Στο δεύτερο μέρος δίνονται οι βασικοί ορισμοί και περιγράφεται η στατική και δυναμική συμπεριφορά μιας διάταξης μέτρησης και παρουσιάζονται αισθητήρια θέσης, αισθητήρια δύναμης, ροπής, μέτρησης ταχύτητας, επιτάχυνσης, ταλαντώσεων, μέτρησης πίεσης, ροής, στάθμης υγρών και θερμοκρασίας αντίστοιχα.

Επίσης παρουσιάζονται διάφοροι άλλοι μετατροπείς όπως ανιχνευτές ακτίνων Χ, μετρητές pH, ανιχνευτές αντικειμένων, μετατροπείς Hall, φωτομετατροπείς κ.λπ. Τέλος παρουσιάζονται συνοπτικά οι ενισχυτές που χρησιμοποιούνται σε συστήματα μέτρησης.

Πρέπει να προσθέσουμε ότι αν και το βιβλίο αυτό απευθύνεται κυρίως στους ηλεκτρολόγους μηχανικούς μπορεί να εξυπηρετήσει και άλλους κλάδους μηχανικών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΜΕΡΟΣ Α΄

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

	Σελίδα
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ - ΠΡΟΤΥΠΑ	13
2.1. Γενικά	13
2.2. Συστήματα μονάδων	13
2.3. Πρότυπα	18
Λυμένες ασκήσεις	19
Άλυτες ασκήσεις	20
3. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	22
3.1. Κατηγορίες σφαλμάτων	22
3.2. Ακρίβεια οργάνου	24
3.3. Υπολογισμός σφάλματος	28
Λυμένες ασκήσεις	34
Ερωτήσεις	38
Άλυτες ασκήσεις	39
4. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ	41
4.1. Μέτρα προστασίας	41
4.2. Προστασία κυκλωμάτων	50
Ερωτήσεις	54
5. ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ	56
5.1. Γενικά	56
5.2. Είδη σύζευξης θορύβου	57
5.3. Μέθοδοι μείωσης του θορύβου	63
Ερωτήσεις	64
6. ΟΡΓΑΝΑ ΜΕ ΔΕΙΚΤΗ	67
6.1. Γενικά	67
6.2. Όργανα κινητού πηνίου	73
6.3. Εφαρμογές οργάνων κινητού πηνίου	80
6.4. Όργανα διασταυρωμένων πηνίων	90
6.5. Όργανα κινητού μαγνήτη	92
6.6. Όργανα με ανορθωτή	94
6.7. Όργανα κινητού σιδήρου	102

6.8. Ηλεκτροδυναμικά όργανα	104
6.9. Εφαρμογές των ηλεκτροδυναμικών οργάνων	107
6.10. Ηλεκτροστατικά όργανα	110
6.11. Θερμικά όργανα	111
6.12. Πολύμετρα	113
6.13. Ρύθμιση οργάνων	114
6.14. Επέκταση κλίμακας οργάνου	116
Ερωτήσεις	118
Άλυτες ασκήσεις	119
7. ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ	122
7.1. Γενικά	122
7.2. Αρχή λειτουργίας - απλές συσκευές	122
Ερωτήσεις	125
Άλυτες ασκήσεις	125
8. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	127
8.1. Γενικά	127
8.2. Μετασχηματιστές τάσης	129
8.3. Μετασχηματιστές έντασης	131
Ερωτήσεις	136
Άλυτες ασκήσεις	136
9. ΓΕΦΥΡΕΣ	138
9.1. Γενικά	138
9.2. Γέφυρα Wheatstone	138
9.3. Διπλή γέφυρα Thomson	144
9.4. Πραγματικά πηνία και πυκνωτές	147
9.5. Γέφυρες εναλλασσομένου ρεύματος	153
9.6. Παράσιτα στοιχεία και θωράκιση γεφυρών	162
9.7. Προσδιορισμός θέσης σφάλματος καλωδίου	166
Ερωτήσεις	169
Άλυτες ασκήσεις	170
10. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ	174
10.1. Ηλεκτρονικά βολτόμετρα	174
10.2. Άλλα ηλεκτρονικά όργανα	178
Ερωτήσεις	179
11. ΜΕΤΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ	180
11.1. Μέτρηση ωμικής αντίστασης	180
11.2. Μέτρηση σύνθετης αντίστασης	185
11.3. Μέτρηση αλληλεπαγωγής	190
Ερωτήσεις	193
Άλυτες ασκήσεις	193

12. ΜΕΤΡΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	195
12.1. Γενικά για τη χρήση του ηλεκτροδυναμικού βαττομέτρου	195
12.2. Μέτρηση ενεργού ισχύος	199
12.3. Μέτρηση αέργου ισχύος	204
12.4. Μέτρηση συντελεστή ισχύος	207
12.5. Μέτρηση συμμετρικών συνιστωσών	210
12.6. Μέτρηση ενεργείας	217
Ερωτήσεις	219
Άλυτες ασκήσεις	219
13. ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΣ	221
13.1. Γενικά	221
13.2. Ο καθοδικός σωλήνας	222
13.3. Οθόνες παλμογράφου	226
13.4. Βασικά κυκλώματα	229
13.5. Βασικά χαρακτηριστικά	232
13.6. Ακροδέκτες	235
13.7. Παλμογράφοι δειγματοληψίας	238
Ερωτήσεις	239
14. ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΙ ΦΑΣΗΣ	242
14.1. Γενικά	242
14.2. Σχήματα Lissajous	242
14.3. Το ηλεκτρονικό συχνόμετρο	246
Ερωτήσεις	252
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I: Καταμεριστές τάσης	253
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II: Μετασχηματιστές	255

ΜΕΡΟΣ Β'

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Σελίδα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1. Γενικά	269
1.2. Το γενικό σύστημα μέτρησης	270
1.3. Αισθητήρια - μετατροπείς	271
1.4. Συνάρτηση μεταφοράς	287
1.5. Στατική συμπεριφορά	291
1.6. Δυναμική συμπεριφορά	296
Ερωτήσεις	300
2. ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΣΗΣ	
2.1. Γενικά	303
2.2. Ποτενσιόμετρα	303
2.3. Σύγχρο και συγχροανλυτές	307
2.4. Σύστημα προσαρμογής σύγχρο και συγχροανλυτών και εφαρμογές	326
2.5. Γραμμικοί μεταβλητοί διαφορικοί μετασχηματιστές (ΓΜΔΜ)	329
2.6. Κωδικοποιητές	333
2.7. Άλλοι μετατροπείς	337
Ερωτήσεις	340
3. ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΥΝΑΜΗΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗΣ	
3.1. Γενικά	343
3.2. Μετατροπείας πιεζοαντίστασης	343
3.3. Μετατροπείς δύναμης με πιεζοαντίσταση	349
3.4. Άλλοι μετατροπείς δύναμης	352
3.5. Μέτρηση ροπής	353
3.6. Προσαρμογή μετατροπέων δύναμης	355
Ερωτήσεις	357
4. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ	
4.1. Γενικά	359
4.2. Μέτρηση ταχύτητας	359
4.3. Μέτρηση επιτάχυνσης	366

4.4. Επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόχου	370
4.5. Επιταχυνσιόμετρα κλειστού βρόχου	375
4.6. Μετρήσεις ταλαντώσεων	376
Ερωτήσεις	379
5. ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΙΕΣΗΣ	
5.1. Γενικά	381
5.2. Μανόμετρα και διατάξεις ζύγισης	382
5.3. Ελαστικά μηχανικά στοιχεία	384
5.4. Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο	386
5.5. Μετατροπείς πίεσης	390
5.6. Προσαρμογή μετατροπών πίεσης	397
Ερωτήσεις	398
6. ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΗΣ	
6.1. Γενικά	399
6.2. Μετρητές παροχής διαφορικού τύπου	401
6.3. Ηλεκτρομαγνητικοί μετρητές παροχής	404
6.4. Μετρητές παροχής με υπερήχους	407
6.5. Άλλοι μετρητές ροής	410
6.6. Μέτρηση στάθμης	413
Ερωτήσεις	416
7. ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	
7.1. Γενικά	417
7.2. Θερμόμετρα διαστολής	418
7.3. Θερμοζεύγη	419
7.4. Κατασκευή και προσαρμογή θερμοζεύγους	426
7.5. Αισθητήρια θερμοκρασίας με αντίσταση	428
7.6. Θερμίστορ	430
7.7. Ημιαγωγικοί μετατροπείς θερμοκρασίας	433
Ερωτήσεις	434
8. ΑΛΛΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ	
8.1. Γενικά	436
8.2. Ανιχνευτές αντικειμένων	437
8.3. Μέτρηση ισχύος με μετατροπέα Hall	439
8.4. Φωτομετατροπείς	441
Ερωτήσεις	446

9. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ

9.1. Γενικά	448
9.2. Ενισχυτές	450
9.3. Μετάδοση σήματος	453
9.4. Μετατροπείς A/D	453
9.5. Μετατροπείς D/A	469
Ερωτήσεις	473

Βιβλιογραφία	475
--------------------	-----

Ευρετήριο	479
-----------------	-----

12. ΜΕΤΡΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

12.1. Γενικά για τη χρήση του ηλεκτροδυναμικού οργάνου σαν βαττομέτρου.

Οι εξισώσεις 6.61 και 6.62 ισχύουν όταν οι αντιστάσεις των πηνίων τάσης και έντασης του ηλεκτροδυναμικού οργάνου μπορούν να αγνοηθούν. Δηλαδή η αντίσταση του πηνίου τάσης είναι πολύ μεγάλη και η αντίσταση του πηνίου έντασης πολύ μικρή. Αν η επίδραση των αντιστάσεων των πηνίων του ηλεκτροδυναμικού οργάνου δεν μπορεί να αγνοηθεί, οι εξισώσεις 6.61 και 6.62 γράφονται πιο σωστά

$$\theta = C'I_E U_T \quad (12.1)$$

$$\text{και} \quad \theta = C'I_E U_T \cos \varphi \quad (12.2)$$

όπου I_E το ρεύμα του πηνίου έντασης και U_T η τάση του πηνίου. Στο εναλλασσόμενο ρεύμα I_E και U_T είναι οι ενδεικνύμενες τιμές.

Θα επαναλάβουμε εδώ τα σχήματα 6.21α και 6.21β για ευκολία.

Για την περίπτωση της συνδεσμολογίας του σχήματος 12.1α προκύπτει

$$I_E = I_K \quad (12.3)$$

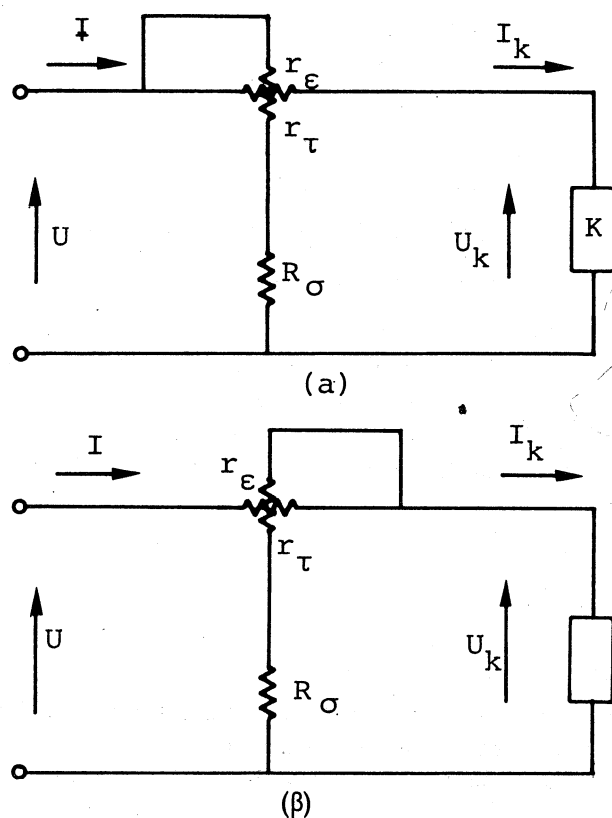
$$U_T = U_K + I_K r_E = U_K + U_E \quad (12.4)$$

όπου r_E η ωμική αντίσταση του πηνίου έντασης και U_E η πτώση τάσης επάνω στο πηνίο έντασης. Αντικαθιστώντας από τις εξισώσεις 12.3 και 12.4 στις εξισώσεις 12.1 και 12.2 προκύπτει

$$\begin{aligned} \theta &= C'I_K U_K + C'I_E U_E \\ &= C'P_K + C'P_E = C'(P_K + P_E) \end{aligned} \quad (12.5)$$

και

$$\begin{aligned} \theta &= C'I_K U_K \cos \varphi + C'I_E U_E \cos \varphi \\ &= C'P_K + C'P_E = C'(P_K + P_E) \end{aligned} \quad (12.6)$$



Σχ. 12.1.

όπου P_K και P_ϵ είναι οι καταναλισκόμενες ισχύεις στην κατανάλωση K και στο πηνίο ένασης αντίστοιχα.

Φαίνεται λοιπόν από τις εξισώσεις 12.5 και 12.6 ότι το βαττόμετρο μετράει το άθροισμα της ισχύος στην κατανάλωση K και της καταναλισκομένης ισχύος στο πηνίο έντασης τόσο για το συνεχές όσο και για το εναλλασσόμενο ρεύμα. Αυτά βέβαια ισχύουν για την περίπτωση της συνδεσμολογίας 12.1α.

Για την περίπτωση της συνδεσμολογίας 12.1β προκύπτει

$$I_\epsilon = I_k + \frac{U_\tau}{r_\tau + R_\sigma} = I_k + I_\tau \quad (12.7)$$

$$U_\tau = U_k \quad (12.8)$$

όπου r_T η ωμική αντίσταση του πηνίου και I_T το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο τάσης. Αντικαθιστώντας από τις εξισώσεις 12.7 και 12.8 στις εξισώσεις 12.1 και 12.2 προκύπτει

$$\begin{aligned}\theta &= C'I_K U_K + C'I_T U_T \\ &= C'P_K + C'P_T = C'(P_K + P_T)\end{aligned}\quad (12.9)$$

και

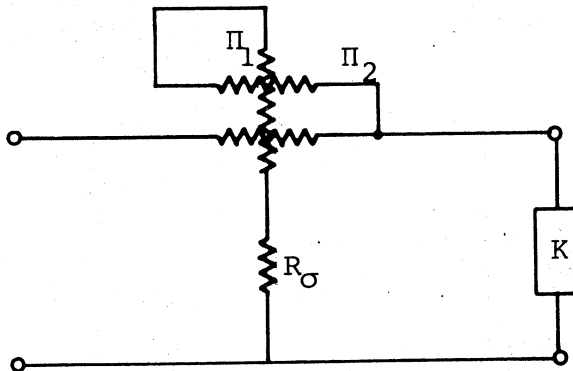
$$\begin{aligned}\theta &= C'I_K U_K \cos\varphi + C'I_T U_T \cos\varphi \\ &= C'P_K + C'P_T = C'(P_K + P_T)\end{aligned}\quad (12.10)$$

όπου P_T είναι η ισχύς που καταναλώνεται στο πηνίο τάσης.

Φαίνεται λοιπόν από τις εξισώσεις 12.9 και 12.10 ότι για την περίπτωση της συνδεσμολογίας 12.1β το βαττόμετρο μετράει το άθροισμα της ισχύος στην κατανάλωση K και της ισχύος που καταναλώνεται στο πηνίο τάσης τόσο για το συνεχές όσο και για το εναλλασσόμενο ρεύμα.

Στην προηγούμενη ανάλυση θεωρήσαμε μόνο τις ωμικές αντιστάσεις των πηνίων και αγνοήσαμε τις σύνθετες αντιστάσεις λόγω αυτεπαγωγής. Στις χαμηλές συχνότητες η επίδραση της αυτεπαγωγής των πηνίων μπορεί να αγνοηθεί. Στις υψηλές συχνότητες όμως η αυτεπαγωγή των πηνίων είναι σημαντική και εισάγει μεγάλο σφάλμα στη μέτρηση. Έτσι τα ηλεκτροδυναμικά όργανα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν βαττόμετρα στις χαμηλές συχνότητες μόνο.

Το σφάλμα που δημιουργείται από τη μέτρηση και της ισχύος που καταναλώνεται στο πηνίο τάσης στην περίπτωση της συνδεσμολογίας 12.1β μπορεί να εξαλειφθεί χρησιμοποιώντας τα λεγόμενα *αντισταθμισμένα* βαττόμετρα. Τα αντισταθμισμένα βαττόμετρα έχουν δύο πηνία τάσης το Π_1 και το Π_2 όπως φαίνεται στο σχήμα 12.2. Το βοηθητικό πηνίο Π_2 είναι σε σειρά με το κύριο πηνίο τάσης Π_1 και διαρρέει από το ίδιο ρεύμα που διαρρέει και το κύριο πηνίο τά-



Σχ. 12.2.

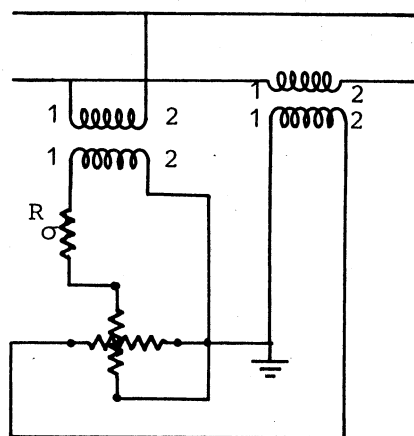
σης Π1. Κατασκευαστικά όμως το βοηθητικό πηνίο Π2 και το πηνίο έντασης βρίσκονται παράλληλα ώστε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το Π2 να αφαιρείται από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το πηνίο έντασης. Έτσι στην ένδειξη του οργάνου δεν συμπεριλαμβάνεται η ισχύς που καταναλίσκεται στο πηνίο τάσης.

Πρέπει όμως να γίνεται η σύνδεση του πηνίου τάσης προς την πλευρά της κατανάλωσης για να επωφελούμαστε από την αντιστάθμιση του οργάνου.

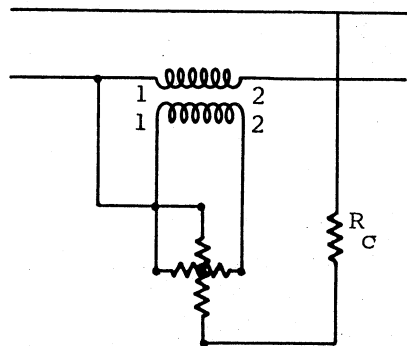
Είναι φανερό ότι τα αντισταθμισμένα βαττόμετρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στο συνεχές ρεύμα.

Όπως αναφέραμε στην παράγραφο 6.9 τα βαττόμετρα έχουν διάφορες περιοχές τάσης και έντασης. Για παράδειγμα αν ένα βαττόμετρο λειτουργεί με μέγιστη τιμή της περιοχής τάσης 400V και μέγιστη τιμή της περιοχής έντασης 2A αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη ένδειξη της ισχύος αντιστοιχεί σε 800W. Αυτή βέβαια η ένδειξη μπορεί να επιτευχθεί μόνο με συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα. Οι μέγιστες τιμές της τάσης και έντασης δεν επιτρέπεται να ξεπερνιούνται προς αποφυγή ζημίας ή και καταστροφής του οργάνου.

Σε περίπτωση που η τάση ή η ένταση ενός κυκλώματος, την ισχύ του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε με βαττόμετρο, είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη τάση ή ένταση του βαττομέτρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετασχηματιστές τάσης ή έντασης όπως φαίνεται στο σχήμα 12.3. Στη συνδεσμολογία του σχήματος 12.3α χρησιμοποιείται μετασχηματιστής τάσης και έντασης ενώ στη συνδεσμολογία του σχήματος 12.3β χρησιμοποιείται μόνο μετασχηματιστής έντασης. Και στις δύο συνδεσμολογίες το ένα άκρο του πηνίου τάσης συνδέεται με το ένα άκρο του πηνίου έντασης. Στη δε συνδεσμολογία του σχήματος 12.3α το κοινό άκρο των δύο πηνίων γειώνεται για λόγους προστασίας.



(α)



(β)

Σχ. 12.3.

12.2. Μέτρηση ενεργού ισχύος.

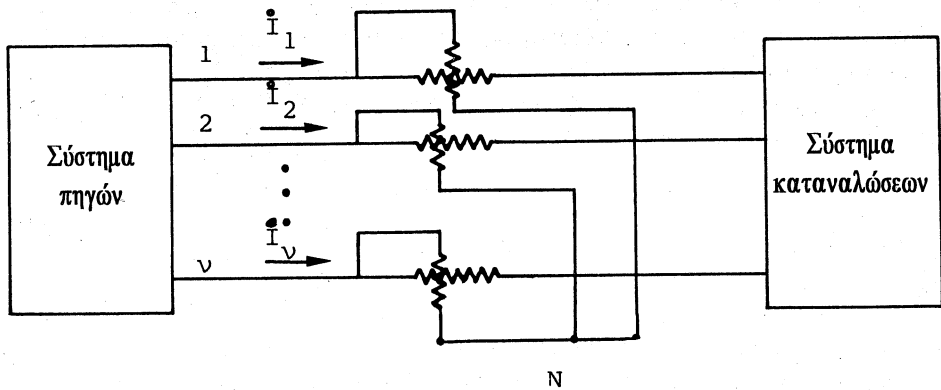
Η μέτρηση της ενεργού ισχύος ενός μονοφασικού κυκλώματος ή της ισχύος ενός κυκλώματος συνεχούς ρεύματος μπορεί να γίνει σύμφωνα με όσα είπαμε χρησιμοποιώντας ένα βατόμετρο. Επομένως στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε πολυφασικά και ειδικότερα τριφασικά συστήματα.

Θεώρημα Blondel.

Έστω ότι ένα πολυφασικό σύστημα έχει n φάσεις και ότι το σύστημα πηγών συνδέεται με το σύστημα καταναλώσεων μέσω n αγωγών όπως φαίνεται στο σχήμα 12.4. Αν συνδεθούν n βατόμετρα όπως φαίνεται στο σχήμα 12.4 δημιουργείται ένας κόμβος N . Αν οι στιγμιαίες τάσεις των φάσεων 1, 2,..., n ως προς τον κόμβο N είναι v_1, v_2, \dots, v_n , τότε

$$\begin{aligned} v_1 &= u_1 - u_N \\ v_2 &= u_2 - u_N \\ &\vdots \\ v_n &= u_n - u_N \end{aligned} \quad (12.11)$$

όπου u_1, u_2, u_n και u_N είναι τα δυναμικά των αγωγών 1, 2, n και του κόμβου N αντίστοιχα.



Σχ. 12.4.

Αν i_1, i_2, \dots, i_n είναι οι στιγμιαίες εντάσεις των αγωγών 1, 2,..., n η στιγμιαία ισχύς p που μεταφέρεται από τους n αγωγούς είναι

$$p = \sum_{j=1}^n u_j i_j \quad (12.12)$$

Δεδομένου ότι

$$\sum_{j=1}^v i_j = 0 \quad (12.13)$$

η εξίσωση 12.12 γράφεται

$$\begin{aligned} p &= \sum_{j=1}^v u_j i_j - u_N \sum_{j=1}^v i_j \\ &= \sum_{j=1}^v (u_j - u_N) i_j \\ &= \sum_{j=1}^v v_j i_j = \sum_{j=1}^v p_j \end{aligned} \quad (12.14)$$

Αρα η μέση τιμή της ισχύος είναι

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \sum_{j=1}^v P_j \quad (12.15)$$

όπου P_j η μέση τιμή της ισχύος p_j . Οι εξισώσεις αυτές ισχύουν για τάσεις και ρεύματα οποιασδήποτε μορφής.

Προφανώς η ένδειξη του j βαττομέτρου θα είναι P_j . Άρα το αλγεβρικό άθροισμα των v βαττομέτρων ισούται με την ενεργό ισχύ που μεταφέρεται από το σύστημα των v αγωγών. Αυτό είναι το θεώρημα Blondel.

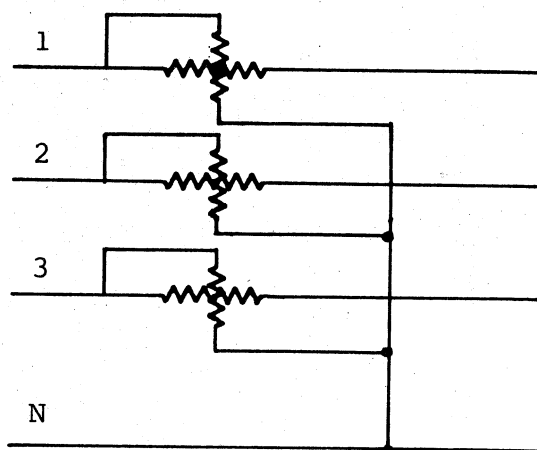
Αν ο κόμβος N μεταφερθεί επάνω σε ένα αγωγό π.χ. στον αγωγό K τότε εύκολα φαίνεται ότι η εξίσωση 12.15 γίνεται

$$P = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^v P_j \quad (12.16)$$

Δηλαδή η ενεργός ισχύς που μεταφέρεται από το σύστημα των v αγωγών ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των $v-1$ βαττομέτρων αν ο κόμβος N τοποθετηθεί επάνω σε ένα αγωγό. Φαίνεται λοιπόν ότι η μέτρηση της ισχύος μιας v -φασικής γραμμής μπορεί να γίνει με $v-1$ βαττόμετρα.

Σύστημα 4 αγωγών.

Όπως προκύπτει από το θεώρημα Blondel η ισχύς ενός τριφασικού συστήματος τεσσάρων αγωγών (τριών φάσεων και του ουδετέρου) μπορεί να μετρηθεί με τρία βαττόμετρα όπως φαίνεται στο σχήμα 12.5.



Σχ. 12.5.

Η ισχύς είναι το άθροισμα των ενδείξεων των βαττομέτρων

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (12.17)$$

Όταν το σύστημα είναι συμμετρικό προφανώς

$$P_1 = P_2 = P_3$$

$$\text{άρα} \quad P = 3P_1 \quad (12.18)$$

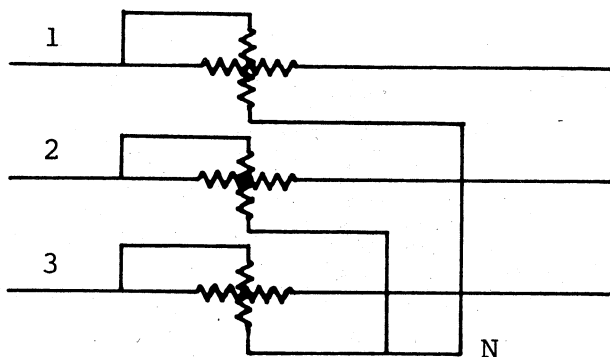
Σε αυτή την περίπτωση αρκεί η χρησιμοποίηση ενός μόνο βαττομέτρου.

Αν δεν υπάρχει ουδέτερος αγωγός μπορεί να δημιουργεί ένας τεχνητός ουδέτερος (π.χ. μέσω τριών ίσων αντιστάσεων συνδεδεμένων σε αστέρα) και να χρησιμοποιηθούν τρία βαττόμετρα όπως και στο σχήμα 12.5.

Σύστημα 3 αγωγών.

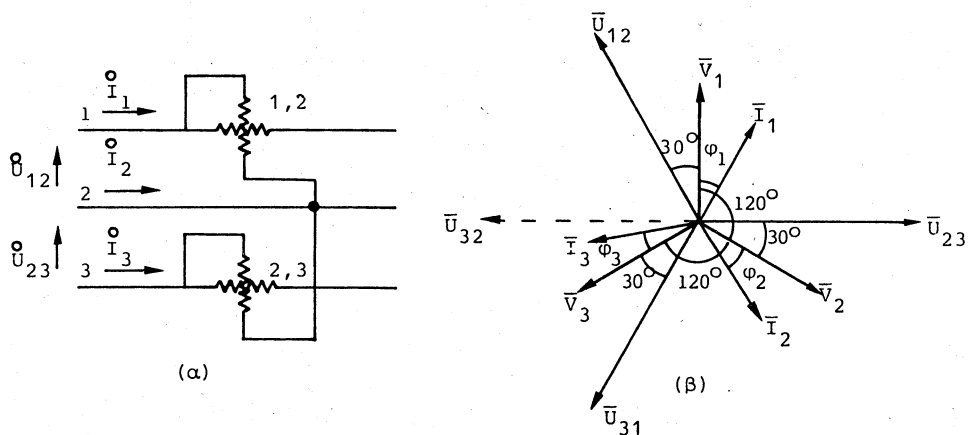
Σε περίπτωση που σε μία τριφασική γραμμή υπάρχουν μόνο οι τρεις φάσεις η ισχύς μπορεί να μετρηθεί βάσει του θεωρήματος Blondel με τρία βαττόμετρα (σχ. 12.6) ή μόνο δύο βαττόμετρα (σχ. 12.7). Στην περίπτωση του σχήματος 12.6 η ισχύς ισούται με το άθροισμα των ενδείξεων των τριών βαττομέτρων,

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (12.19)$$



Σχ. 12.6.

Η διάταξη του σχήματος 12.7α λέγεται διάταξη Aron.



Σχ. 12.7.

Στο σχήμα 12.7β φαίνεται το διανυσματικό διάγραμμα της διάταξης Aron όταν οι τάσεις είναι συμμετρικές αλλά οι εντάσεις δεν είναι συμμετρικές λόγω μη συμμετρικού φορτίου.

Το πηνίο τάσης του βαττομέτρου 1, 2 βρίσκεται υπό τάση \bar{U}_{12} ενώ το πηνίο έντασης του διαρρέεται από το ρεύμα \bar{I}_1 . Αντίστοιχα το πηνίο τάσης του βαττο-

μέτρου 2, 3 βρίσκεται υπό τάση U_{32} ενώ το πηνίο έντασης του διαρρέεται από το ρεύμα I_3 . Άρα οι ενδείξεις των βαττομέτρων θα είναι

$$P_{1,2} = U_{12} I_1 \sin(30^\circ + \varphi_1) \quad (12.20)$$

και
$$P_{2,3} = U_{32} I_3 \sin(30^\circ - \varphi_3) \quad (12.21)$$

Η δε συνολική ισχύς είναι το αλγεβρικό άθροισμα των ενδείξεων

$$P = P_{1,2} + P_{2,3} \quad (12.22)$$

Σε περίπτωση συμμετρικού φορτίου

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}_3$$

και αν
$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 60^\circ \quad (12.23)$$

οι εξισώσεις (12.20) και (12.21) γίνονται

$$\begin{aligned} P_{1,2} &= 0 \\ P_{2,3} &= U_{32} I_3 \sin 30^\circ = U_{32} I_3 \frac{\sqrt{3}}{2} \\ &= \sqrt{3} U_{32} I_3 \sin 60^\circ \end{aligned}$$

Δηλαδή η συνολική ισχύς δίνεται από την ένδειξη του βαττομέτρου 2, 3.

Αν
$$\varphi_1 > 60^\circ \quad (12.24)$$

η ένδειξη του βαττομέτρου 1, 2 θα είναι αρνητική.

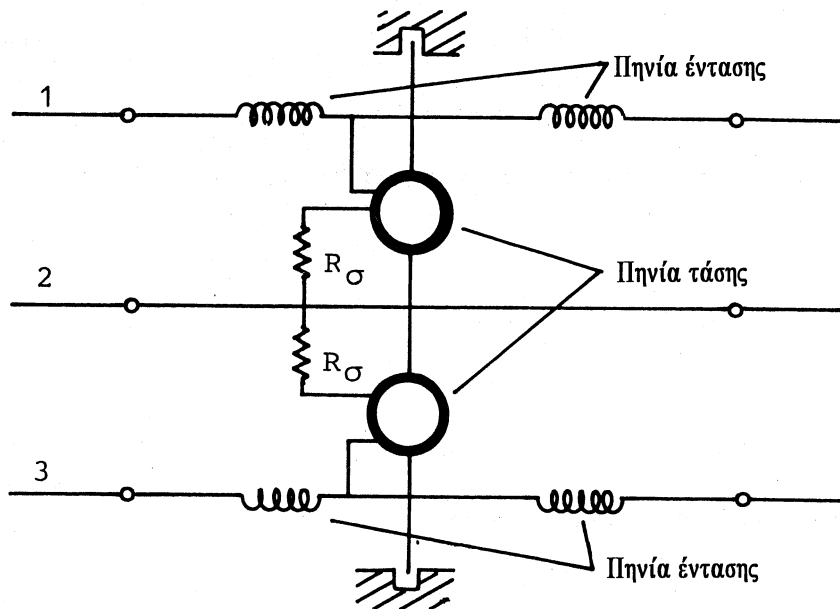
Αν
$$\varphi_3 < -60^\circ \quad (12.25)$$

η ένδειξη του βαττομέτρου 2, 3 θα είναι αρνητική.

Σε περίπτωση που ένα βαττόμετρο έχει αρνητική ένδειξη (δηλαδή ο δείκτης αποκλίνει προς τα αριστερά) για να προσδιορισθεί η ένδειξη αντιστρέφεται η σύνδεση κάποιου πηνίου και η προκύπτουσα ένδειξη αφαιρείται από την ένδειξη του άλλου βαττομέτρου.

Τέλος υπάρχουν και τριφασικά βαττόμετρα (σχ. 12.8) τα οποία στηρίζονται στη διάταξη Αγον. Στην πραγματικότητα αποτελούνται από δύο βαττόμετρα σε

διάταξη Aron με κοινό άξονα. Η προσαγωγή και απαγωγή του ρεύματος γίνεται με επανατακτικά ελατήρια.



Σχ. 12.8.

Η ροπή που εξασκείται επάνω στον άξονα είναι ίση με το αλγεβρικό άθροισμα της ροπής που εξασκείται σε κάθε επί μέρους βαττόμετρο. Άρα η συνολική ροπή είναι ανάλογη προς την τριφασική ισχύ του συστήματος.

12.3. Μέτρηση αέργου ισχύος.

Αν σε ένα μονοφασικό κύκλωμα η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και έντασης I είναι φ όπως είναι γνωστό η φαινομένη ισχύς S , η ενεργός P , και η άεργος ισχύς, Q , δίνονται από τις εξισώσεις

$$S = VI \quad (12.26)$$

$$P = VI \cos \varphi \quad (12.27)$$

$$Q = VI \sin \varphi \quad (12.28)$$

$$\text{και} \quad S^2 = P^2 + Q^2 \quad (12.29)$$

Μπορεί λοιπόν να μετρηθεί μέσω ενός αμπερομέτρου και βολτομέτρου η φαινομένη ισχύς, μέσω ενός βαττομέτρου η ενεργός ισχύς και στη συνέχεια να υπολογισθεί η άεργος ισχύς από την εξίσωση 12.29.

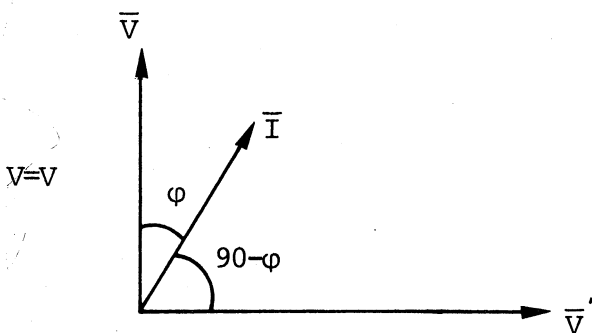
Αυτή είναι μια έμμεση μέθοδος μέτρησης της αέργου ισχύος. Μπορεί όμως η άεργος ισχύς να μετρηθεί και άμεσα μέσω ενός μετρητή αέργου ισχύος (VAR meter).

Ο μετρητής αέργου ισχύος είναι ένα ηλεκτροδυναμικό όργανο το οποίο λειτουργεί σαν βαττόμετρο αλλά έχει ένα κύκλωμα καθυστέρησης της φάσης της τάσης κατά 90° . Έτσι η τάση \bar{V}' του πηνίου τάσης του μετρητή αέργου ισχύος έχει καθυστέρηση 90° στη φάση σε σχέση με την τάση \bar{V} του κυκλώματος. Κατά συνέπεια η ένδειξη του μετρητή θα είναι (σχ. 12.9),

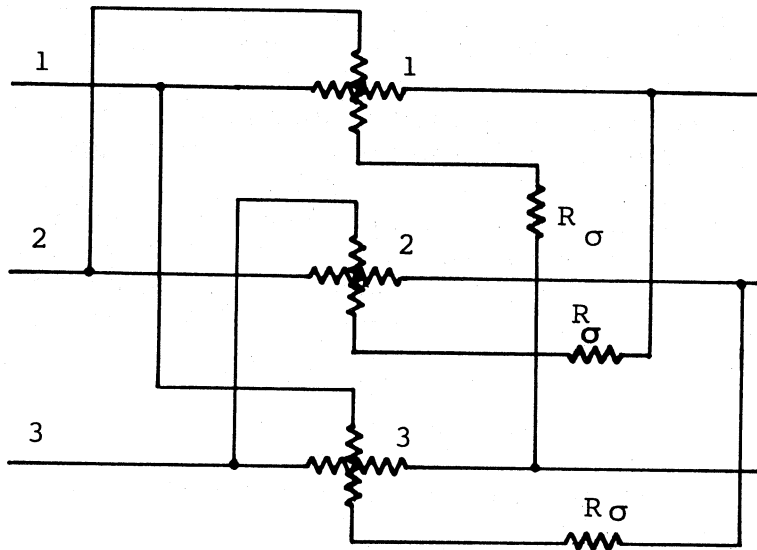
$$V'I\sin(90 - \varphi) = VI\eta\mu\varphi = Q \quad (12.30)$$

Όπως φαίνεται λοιπόν από την εξίσωση 12.30 η ένδειξη του μετρητή παρέχει την άεργο ισχύ.

Η άεργος ισχύς σε τριφασικό σύστημα μπορεί να μετρηθεί με τρεις μετρητές αέργου ισχύος αλλά μπορεί να μετρηθεί και με τρία βαττόμετρα με τη συνδεσμολογία του σχήματος 12.10:



Σχ. 12.9.



Σχ. 12.10.

Όπως φαίνεται από το διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 12.11 η ένδειξη του βαττομέτρου 1 είναι

$$U_{23} I_1 \cos(90^\circ - \varphi_1) = \sqrt{3} V_1 I_1 \sin \varphi_1 = \sqrt{3} Q_1 \quad (12.31)$$

Όμοια οι ενδείξεις των βολτομέτρων 2 και 3 είναι

$$U_{31} I_2 \cos(90^\circ - \varphi_2) = \sqrt{3} Q_2 \quad (12.32)$$

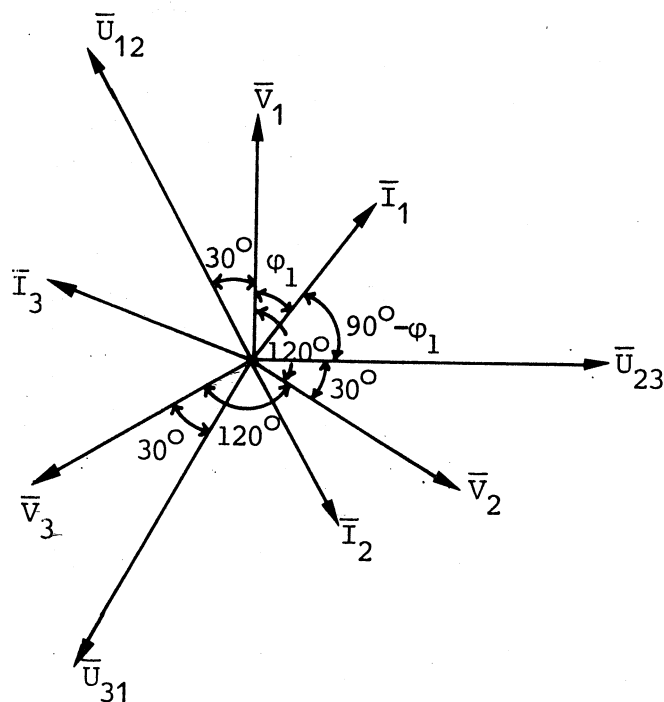
$$U_{12} I_3 \cos(90^\circ - \varphi_3) = \sqrt{3} Q_3 \quad (12.33)$$

αντίστοιχα. Q_1 , Q_2 και Q_3 είναι οι άεργοι ισχύες των φάσεων 1, 2 και 3 αντίστοιχα.

Αυτά ισχύουν για συμμετρικές τάσεις ενώ το φορτίο μπορεί να είναι συμμετρικό ή μη συμμετρικό.

Η τριφασική άεργος ισχύς είναι ίση με το άθροισμα των ενδείξεων των βαττομέτρων διαιρούμενο δια $\sqrt{3}$.

Σε περίπτωση συμμετρικού φορτίου οι εντάσεις θα είναι συμμετρικές κατά συνέπεια αρκεί ένα βαττόμετρο συνδεδεμένο όπως στο σχήμα 12.10. Η τριφασική ισχύς είναι ίση με την ένδειξη αυτού του βαττομέτρου πολλαπλασιασμένη επί $\sqrt{3}$.



Σχ. 12.11.

12.4. Μέτρηση συντελεστή ισχύος.

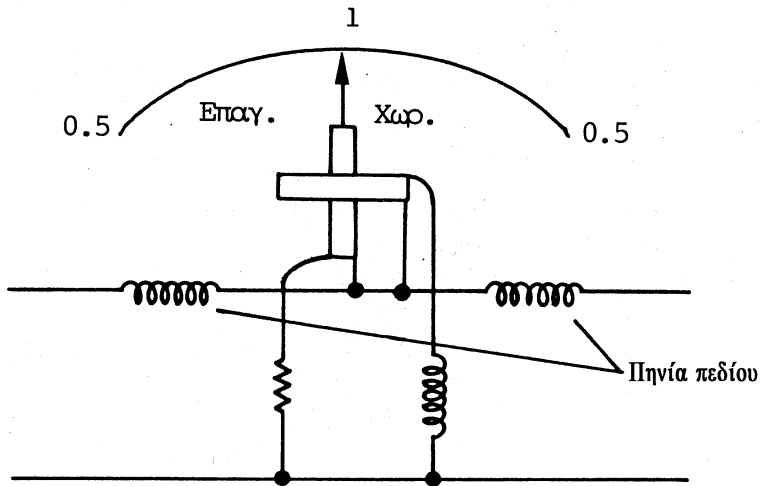
Ο συντελεστής ισχύος μονοφασικού κυκλώματος μπορεί να μετρηθεί έμμεσα μέσω ενός βαττομέτρου, το οποίο μετράει την ενεργό ισχύ P , και μέσω ενός βολτομέτρου και ενός αμπερομέτρου με τα οποία μετριέται η φαινομένη ισχύς S . Ο συντελεστής ισχύος προκύπτει από τη σχέση

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (12.34)$$

Επίσης ο συντελεστής ισχύος μπορεί να μετρηθεί άμεσα με μονοφασικούς μετρητές συντελεστή ισχύος οι οποίοι είναι ηλεκτροδυναμικά όργανα πηλίκου (βλ. κεφάλαιο 6).

Ένας μονοφασικός μετρητής συντελεστή ισχύος φαίνεται στο σχήμα 12.12.

Σε άλλες περιπτώσεις η κλίμακα έχει την ένδειξη 1 στο αριστερό άκρο της και την ένδειξη 0,05 (π.χ.) στο δεξιό άκρο της. Η δε επιλογή της χωρητικής ή επαγωγικής φόρτισης γίνεται από διακόπτη.



Σχ. 12.12.

Το σχήμα 12.12 είναι πιο κυκλωματικό από το αντίστοιχο της παραγράφου 6.9 (σχ. 6.22).

Η αρχή λειτουργίας των ηλεκτροδυναμικών οργάνων με διασταυρωμένα πηνία σαν μετρητές συντελεστή ισχύος έχει εξηγηθεί στην παράγραφο 6.9.

Η μέτρηση του συντελεστή ισχύος σε συμμετρικά τριφασικά κυκλώματα μπορεί να γίνει άμεσα ως εξής. Χρησιμοποιούνται δύο βαττόμετρα σε διάταξη Αρον. Από τις σχέσεις 12.20 και 12.21 προκύπτει

$$P_{1,2} + P_{2,3} = 3VI\cos\varphi \quad (12.35)$$

αφού υπάρχει συμμετρία. Επίσης εύκολα φαίνεται ότι

$$P_{2,3} - P_{1,2} = \sqrt{3}VI\sin\varphi \quad (12.36)$$

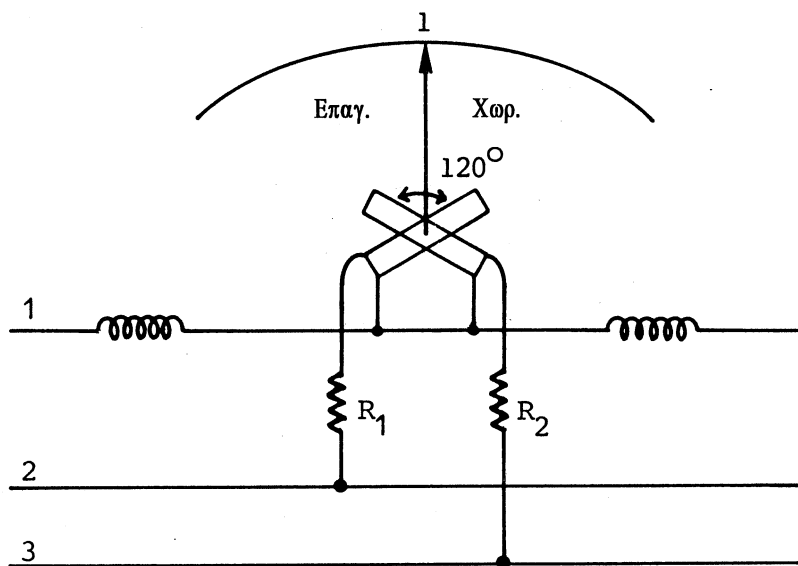
Άρα

$$\varepsilon\varphi = \frac{\sqrt{3(P_{2,3} - P_{1,2})}}{P_{1,2} + P_{2,3}} \quad (12.37)$$

Από την εξίσωση 12.37 υπολογίζεται η διαφορά φάσης φ και στη συνέχεια ο συντελεστής ισχύος $\cos\varphi$.

Επίσης ο συντελεστής ισχύος συμμετρικού τριφασικού συστήματος μπορεί να μετρηθεί άμεσα από τριφασικό μετρητή συντελεστή ισχύος. Ένας τύπος τρι-

φασικού μετρητή συντελεστή ισχύος φαίνεται στο σχήμα 12.13. Η κατασκευή του μοιάζει με εκείνη του μονοφασικού μετρητή με τη διαφορά ότι τα διασταυρωμένα πηνία σχηματίζουν γωνία 120° . Επίσης εδώ δεν απαιτείται κύκλωμα για τη δημιουργία φασικής απόκλισης γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί η φασική απόκλιση μεταξύ των τάσεων του δικτύου.



Σχ. 12.13.

Μετρητές συντελεστή ισχύος που χρησιμοποιούν μόνο αντιστάσεις (δηλαδή δεν χρησιμοποιούν αυτεπαγωγές για δημιουργία φασικής απόκλισης) παρέχουν ενδείξεις ανεξάρτητες από τη συχνότητα για μια περιοχή συχνοτήτων. Αντίθετα μετρητές που δεν χρησιμοποιούν μόνο ωμικές αντιστάσεις πρέπει να βαθμολογούνται στη συχνότητα του δικτύου στο οποίο θα χρησιμοποιηθούν.

Τέλος αναφέρουμε ότι υπάρχουν και μετρητές συντελεστή ισχύος που στηρίζονται στην αρχή των οργάνων κινητού σιδήρου.

12.5. Μέτρηση συμμετρικών συνιστωσών.

Ένα τριφασικό σύστημα $\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \overset{\circ}{x}_3$ μπορεί να γραφεί σαν άθροισμα τριών συμμετρικών συστημάτων, τα οποία λέγονται συμμετρικές συνιστώσες

$$\begin{aligned}\overset{\circ}{x}_1 &= \overset{\circ}{x}_{01} + \overset{\circ}{x}_{d1} + \overset{\circ}{x}_{i1} \\ \overset{\circ}{x}_2 &= \overset{\circ}{x}_{02} + \overset{\circ}{x}_{d2} + \overset{\circ}{x}_{i2} \\ \overset{\circ}{x}_3 &= \overset{\circ}{x}_{03} + \overset{\circ}{x}_{d3} + \overset{\circ}{x}_{i3}\end{aligned}\quad (12.38)$$

όπου

α) Το $\overset{\circ}{x}_{01}, \overset{\circ}{x}_{02}, \overset{\circ}{x}_{03}$ είναι το ομοπολικό σύστημα.

β) Το $\overset{\circ}{x}_{d1}, \overset{\circ}{x}_{d2}, \overset{\circ}{x}_{d3}$ είναι το ευθύ σύστημα, και

γ) Το $\overset{\circ}{x}_{i1}, \overset{\circ}{x}_{i2}, \overset{\circ}{x}_{i3}$ είναι το αντίστροφο σύστημα.

Όπως είναι γνωστό

$$\overset{\circ}{x}_{01} = \overset{\circ}{x}_{02} = \overset{\circ}{x}_{03} = \overset{\circ}{x}_0 \quad (12.39)$$

$$\overset{\circ}{x}_{d1} = \overset{\circ}{x}_d$$

$$\overset{\circ}{x}_{d2} = \alpha^2 \overset{\circ}{x}_d \quad (12.40)$$

$$\overset{\circ}{x}_{d3} = \alpha \overset{\circ}{x}_d$$

και

$$\overset{\circ}{x}_{i1} = \overset{\circ}{x}_i$$

$$\overset{\circ}{x}_{i2} = \alpha \overset{\circ}{x}_i \quad (12.41)$$

$$\overset{\circ}{x}_{i3} = \alpha^2 \overset{\circ}{x}_i$$

όπου

$$\alpha = e^{j \frac{2\pi}{3}} \quad (12.42)$$

Επομένως βάσει των εξισώσεων 12.39 - 12.41 οι εξισώσεις 12.38 γράφονται

$$\begin{aligned}\overset{\circ}{x}_1 &= \overset{\circ}{x}_0 + \overset{\circ}{x}_d + \overset{\circ}{x}_i \\ \overset{\circ}{x}_2 &= \overset{\circ}{x}_0 + \alpha^2 \overset{\circ}{x}_d + \alpha \overset{\circ}{x}_i \\ \overset{\circ}{x}_3 &= \overset{\circ}{x}_0 + \alpha \overset{\circ}{x}_d + \alpha^2 \overset{\circ}{x}_i\end{aligned}\tag{12.43}$$

Λύνοντας ως προς $\overset{\circ}{x}_0, \overset{\circ}{x}_d, \overset{\circ}{x}_i$ προκύπτει

$$\overset{\circ}{x}_0 = \frac{\overset{\circ}{x}_1 + \overset{\circ}{x}_2 + \overset{\circ}{x}_3}{3}\tag{12.44α}$$

$$\overset{\circ}{x}_d = \frac{\overset{\circ}{x}_1 + \alpha \overset{\circ}{x}_2 + \alpha^2 \overset{\circ}{x}_3}{3}\tag{12.44β}$$

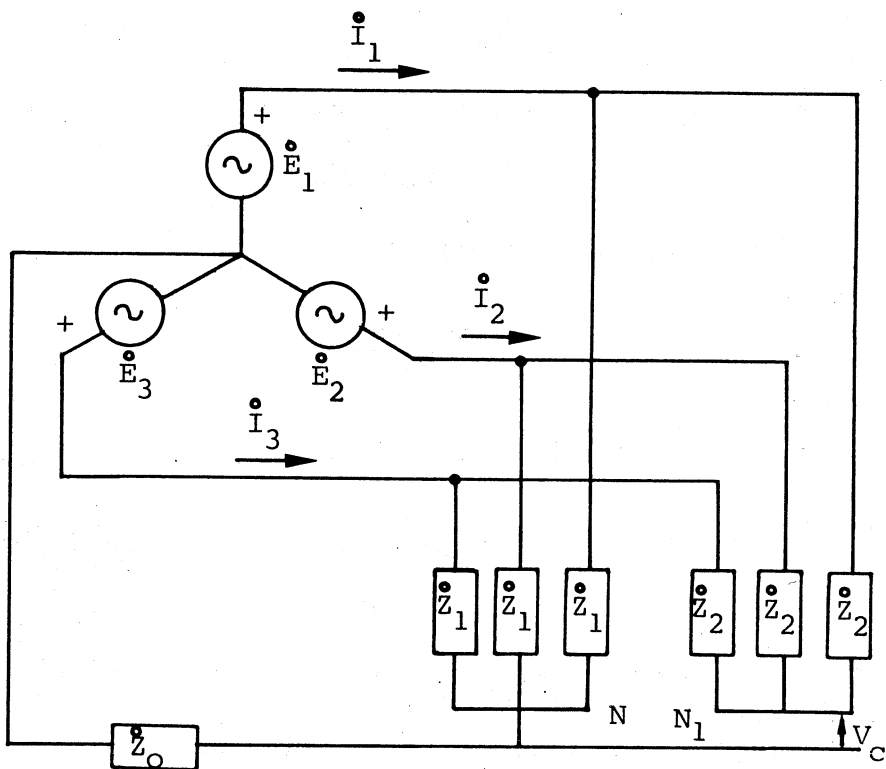
$$\overset{\circ}{x}_i = \frac{\overset{\circ}{x}_1 + \alpha^2 \overset{\circ}{x}_2 + \alpha \overset{\circ}{x}_3}{3}\tag{12.44γ}$$

Όπως είναι φανερό, αν το άθροισμα $\overset{\circ}{x}_1 + \overset{\circ}{x}_2 + \overset{\circ}{x}_3$ είναι μηδέν και η ομοπολική συνιστώσα είναι μηδέν.

Προφανώς όταν τα $\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \overset{\circ}{x}_3$ αποτελούν ευθύ σύστημα τότε

$$\overset{\circ}{x}_0 = \overset{\circ}{x}_i = 0 \quad \overset{\circ}{x}_d = \overset{\circ}{x}_1$$

Θα εξετάσουμε τώρα την περίπτωση του σχήματος 12.14, και θα αναλύσουμε σε συμμετρικές συνιστώσες τις φασικές και πολικές τάσεις καθώς και τις εντάσεις γραμμής.



Σχ. 12.14.

Αν \dot{V}_1, \dot{V}_2 και \dot{V}_3 είναι οι φασικές τάσεις οι συμμετρικές τους συνιστώσες είναι,

$$\dot{V}_0 = \frac{\dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3}{3}, \quad \dot{V}_1 = \dot{V}_0 + \dot{V}_d + \dot{V}_i \quad (12.45\alpha)$$

$$\dot{V}_d = \frac{\dot{V}_1 + \alpha \dot{V}_2 + \alpha^2 \dot{V}_3}{3}, \quad \dot{V}_2 = \dot{V}_0 + \alpha^2 \dot{V}_d + \alpha \dot{V}_i \quad (12.45\beta)$$

$$\dot{V}_i = \frac{\dot{V}_1 + \alpha^2 \dot{V}_2 + \alpha \dot{V}_3}{3}, \quad \dot{V}_3 = \dot{V}_0 + \alpha \dot{V}_d + \alpha^2 \dot{V}_i \quad (12.45\gamma)$$

Αν \dot{U}_{12} , \dot{U}_{23} και \dot{U}_{31} είναι οι πολικές τάσεις οι συμμετρικές τους συνιστώσες είναι,

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_{12} + \dot{U}_{23} + \dot{U}_{31}}{3}, \quad \dot{U}_{12} = \dot{U}_0 + \dot{U}_d + \dot{U}_i \quad (12.46\alpha)$$

$$\dot{U}_d = \frac{\dot{U}_{12} + \alpha \dot{U}_{23} + \alpha^2 \dot{U}_{31}}{3}, \quad \dot{U}_{23} = \dot{U}_0 + \alpha^2 \dot{U}_d + \alpha \dot{U}_i \quad (12.46\beta)$$

$$\dot{U}_i = \frac{\dot{U}_{12} + \alpha^2 \dot{U}_{23} + \alpha \dot{U}_{31}}{3}, \quad \dot{U}_{31} = \dot{U}_0 + \alpha \dot{U}_d + \alpha^2 \dot{U}_i \quad (12.46\gamma)$$

Επειδή το άθροισμα των πολικών τάσεων είναι πάντα μηδέν από την εξίσωση 12.46α φαίνεται ότι η ομοπολική συνιστώσα \dot{U}_0 των πολικών τάσεων είναι μηδενική.

Όπως είναι γνωστό (και εύκολα αποδεικνύεται) σε περίπτωση συμμετρικών φορτίων και μη συμμετρικών τάσεων η τάση του κόμβου N1 είναι ίση με την ομοπολική συνιστώσα των φασικών τάσεων.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 12.45 με τις εξισώσεις

$$\begin{aligned} \dot{U}_{12} &= \dot{V}_1 - \dot{V}_2 \\ \dot{U}_{23} &= \dot{V}_2 - \dot{V}_3 \\ \dot{U}_{31} &= \dot{V}_3 - \dot{V}_1 \end{aligned} \quad (12.47)$$

προκύπτουν οι πολικές τάσεις συναρτήσει των συμμετρικών συνιστωσών των φασικών τάσεων,

$$\dot{U}_{12} = (1 - \alpha^2) \dot{V}_d + (1 - \alpha) \dot{V}_i \quad (12.48\alpha)$$

$$\dot{U}_{23} = \alpha^2 (1 - \alpha^2) \dot{V}_d + \alpha (1 - \alpha) \dot{V}_i \quad (12.48\beta)$$

$$\dot{U}_{31} = \alpha (1 - \alpha^2) \dot{V}_d + \alpha^2 (1 - \alpha) \dot{V}_i \quad (12.48\gamma)$$

Δηλαδή οι πολικές τάσεις αναλύονται σε δύο συμμετρικά συστήματα

α) ένα ευθύ με $\dot{U}_d = (1 - \alpha^2) \dot{V}_d$

και β) ένα αντίστροφο με $\dot{U}_i = (1 - \alpha) \dot{V}_i$

Η δε ομοπολική συνιστώσα είναι μηδενική.

Οι εντάσεις των γραμμών αναλύονται σε συμμετρικές συνιστώσες ως εξής:

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3}{3}, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_d + \dot{I}_i \quad (12.49\alpha)$$

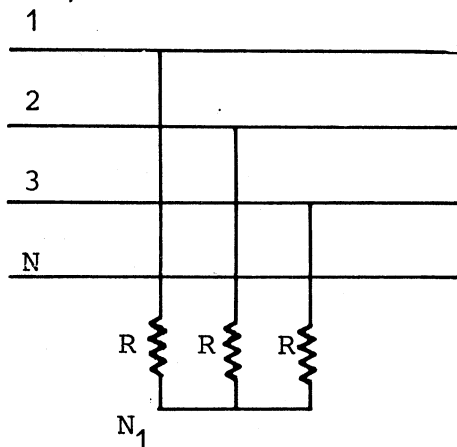
$$\dot{I}_d = \frac{\dot{I}_1 + \alpha \dot{I}_2 + \alpha^2 \dot{I}_3}{3}, \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_0 + \alpha^2 \dot{I}_d + \alpha \dot{I}_i \quad (12.49\beta)$$

$$\dot{I}_i = \frac{\dot{I}_1 + \alpha^2 \dot{I}_2 + \alpha \dot{I}_3}{3}, \quad \dot{I}_3 = \dot{I}_0 + \alpha \dot{I}_d + \alpha^2 \dot{I}_i \quad (12.49\gamma)$$

Όπως είναι γνωστό η ένταση του ουδέτερου αγωγού είναι ίση με το τριπλάσιο της ομοπολικής συνιστώσας I_0 της έντασης γραμμής.

Μέτρηση της ομοπολικής συνιστώσας.

Στο σχήμα 12.15 φαίνεται η δημιουργία μέσω ίσων αντιστάσεων ενός τεχνητού ουδέτερου κόμβου N1. Σε περίπτωση που υπάρχει φορτίο σε αστέρα δεν χρειάζεται η δημιουργία τεχνητού ουδέτερου κόμβου αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο κόμβος του αστέρα.



Σχ. 12.15.

Αν συνδεθεί μεταξύ του κόμβου N1 και του ουδέτερου N ένα βολτόμετρο η ένδειξή του θα είναι η ενδεικνύμενη τιμή της ομοπολικής συνιστώσας της φασικής τάσης, V_0 . Αν συνδεθεί αμπερόμετρο η ένδειξη του θα είναι το τριπλάσιο ($3I_0$) της ενδεικνύμενης τιμής της ομοπολικής συνιστώσας της έντασης γραμμής.

Επειδή

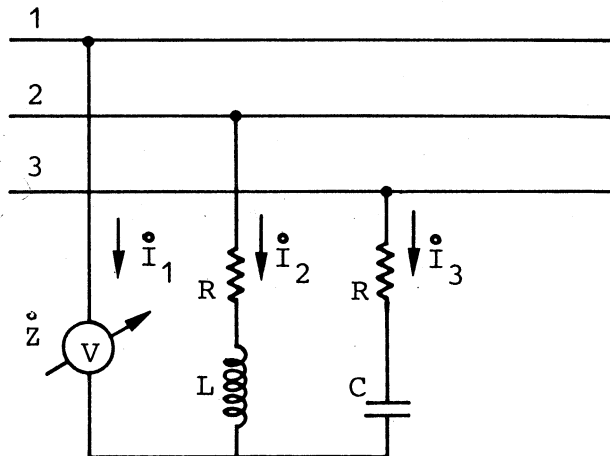
$$\dot{V}_0 = R\dot{I}_0 \quad (12.50)$$

αν μετρηθεί η μια ομοπολική συνιστώσα μπορεί να υπολογισθεί η άλλη.

Το αμπερόμετρο για τη μέτρηση της I_0 μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνον αν ο κόμβος N1 δεν είναι τεχνητός αλλά κόμβος κάποιου φορτίου και είναι συνδεδεμένος με τον ουδέτερο αγωγό. Αν ο κόμβος δεν είναι συνδεδεμένος με τον ουδέτερο αγωγό τότε η χρήση αμπερομέτρου αλλάζει το κύκλωμα. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί βολτόμετρο. Πάντως σε κάθε περίπτωση η εσωτερική αντίσταση του βολτομέτρου πρέπει να είναι μεγάλη και του αμπερομέτρου μικρή.

Μέτρηση της ευθείας και αντίστροφης συνιστώσας.

Στο σχήμα 12.16 φαίνεται η διάταξη για τη μέτρηση της ευθείας και αντίστροφης συνιστώσας της φασικής τάσης.



Σχ. 12.16.

Αν $\overset{\circ}{z}$ η εσωτερική αντίσταση του βολτομέτρου τότε

$$\overset{\circ}{z}_1 = \overset{\circ}{z}$$

$$\overset{\circ}{z}_2 = R + j\omega L \quad (12.51)$$

$$\overset{\circ}{z}_3 = R - j \frac{1}{\omega C}$$

Η τιμή του πηνίου και του πυκνωτή εκλέγεται έτσι ώστε

$$\omega L = \sqrt{3} R$$

$$\frac{1}{\omega C} = \sqrt{3} R$$

και

$$\overset{\circ}{z}_2 = -2\alpha^2 R \quad (12.52)$$

$$\overset{\circ}{z}_3 = -2\alpha R$$

Από τις εξισώσεις 12.48 προκύπτει

$$\overset{\circ}{U}_{12} - \alpha^2 \overset{\circ}{U}_{23} = (1 - \alpha^2) \overset{\circ}{V}_d - \alpha(1 - \alpha^2) \overset{\circ}{V}_d = 3 \overset{\circ}{V}_d \quad (12.53)$$

Εφαρμόζοντας το δεύτερο νόμο του Kirchhoff προκύπτει

$$\overset{\circ}{U}_{12} = \overset{\circ}{z}_1 \overset{\circ}{I}_1 - \overset{\circ}{z}_2 \overset{\circ}{I}_2 = \overset{\circ}{z}_1 \overset{\circ}{I}_1 + 2\alpha^2 R \overset{\circ}{I}_2 \quad (12.54)$$

$$\overset{\circ}{U}_{23} = \overset{\circ}{z}_2 \overset{\circ}{I}_2 - \overset{\circ}{z}_3 \overset{\circ}{I}_3 = -2\alpha^2 R \overset{\circ}{I}_2 + 2\alpha R \overset{\circ}{I}_3 \quad (12.55)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 12.54 και 12.55 στην εξίσωση 12.53 προκύπτει

$$\begin{aligned} 3 \overset{\circ}{V}_d &= \overset{\circ}{z}_1 \overset{\circ}{I}_1 + 2R \overset{\circ}{I}_2 (\alpha + \alpha^2) - 2R \overset{\circ}{I}_3 \\ &= \overset{\circ}{z}_1 \overset{\circ}{I}_1 - 2R \overset{\circ}{I}_2 - 2R \overset{\circ}{I}_3 = (\overset{\circ}{z}_1 + 2R) \overset{\circ}{I}_1 \end{aligned} \quad (12.56)$$

όπου η τελευταία ισότητα προέκυψε από την προφανή σχέση

$$\overset{\circ}{I}_1 + \overset{\circ}{I}_2 + \overset{\circ}{I}_3 = 0$$

Η τάση του βολτομέτρου είναι

$$\overset{\circ}{V} = \overset{\circ}{z}_1 \overset{\circ}{I}_1 = \overset{\circ}{z}_1 \frac{3}{\overset{\circ}{z}_1 + 2R} \overset{\circ}{V}_d \quad (12.57)$$

και αν $\overset{\circ}{z}_1 \gg R$ προκύπτει

$$\overset{\circ}{V} = 3 \overset{\circ}{V}_d \quad (12.58)$$

Από τη σχέση 12.58 φαίνεται ότι σε αυτή την περίπτωση η ένδειξη του βολτομέτρου θα είναι $3V_d$.

Αν $\overset{\circ}{z}_1 = R$ τότε

$$\overset{\circ}{V} = \overset{\circ}{V}_d$$

και η ένδειξη του βολτομέτρου θα είναι V_d .

Αν το πηνίο τοποθετηθεί στη φάση 3 και ο πυκνωτής τοποθετηθεί στη φάση 2 τότε μπορεί να μετρηθεί η αντίστροφη συνιστώσα της πολικής τάσης V_i .

12.6. Μέτρηση ενέργειας.

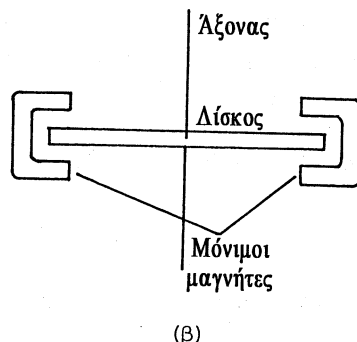
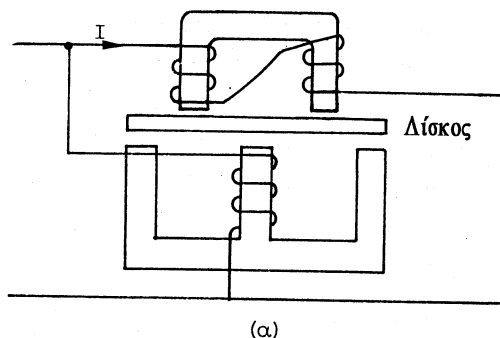
Για τη μέτρηση της ενέργειας χρησιμοποιούνται ευρύτατα οι *επαγωγικοί μετρητές*. Η χρήση αυτών των μετρητών δεν είναι τόσο εργαστηριακή όσο εμπορική. Δηλαδή για τη χρέωση μιας κατανάλωσης.

Η αρχή λειτουργίας των επαγωγικών μετρητών είναι η ίδια με την αρχή λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα.

Αποτελούνται από δύο πυρήνες από ελάσματα σιδήρου όπως φαίνεται στο σχήμα 12.17α. Ο ένας πυρήνας έχει τύλιγμα με πολλές σπείρες το οποίο συνδέεται παράλληλα στο δίκτυο και λέγεται πηνίο τάσης. Ο άλλος πυρήνας έχει πηνίο λίγων σπειρών από χοντρό σύρμα το οποίο συνδέεται σε σειρά με το δίκτυο και λέγεται πηνίο έντασης. Μεταξύ των πυρήνων υπάρχει ελαφρός δίσκος αλουμινίου ο οποίος μπορεί να περιστραφεί γύρω από ένα άξονα και ο οποίος περνάει μέσα από τους πόλους μόνιμου μαγνήτη (Σχ. 12.17β).

Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου έντασης είναι σε φάση με το ρεύμα του δικτύου. Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου τάσης είναι σε φάση με το ρεύμα του πηνίου τάσης το οποίο όμως υστερεί κατά 90° ως προς την τάση του δικτύου. Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται κυρίως στην αυτεπαγωγή του πηνίου τάσης.

Τα δινορρέυματα που εμφανίζονται στο δίσκο σε συνδυασμό με τα μαγνητικά πεδία δημιουργούν μια ροπή στο δίσκο η οποία είναι ανάλογη των δύο μαγνητικών πεδίων. Ο αριθμός των περιστροφών του δίσκου σε ένα χρονικό διά-



Σχ. 12.17.

στημα είναι ανάλογος με την ενέργεια που μεταφέρεται από το δίκτυο στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Ο άξονας του δίσκου συνδέεται μέσω οδοντωτών τροχών με ένα απαριθμητή. Έτσι ο απαριθμητής μετράει την ενέργεια που μεταφέρεται από το δίκτυο σε ένα χρονικό διάστημα.

Όταν η ισχύς που μεταφέρεται από το δίκτυο είναι μικρή η ταχύτητα περιστροφής του δίσκου είναι μικρή και οι τριβές είναι μεγάλες πράγμα που οδηγεί σε σφάλμα. Η αντιστάθμιση των αυξημένων τριβών σε μικρές ταχύτητες γίνεται με την προσθήκη μιας χάλκινης σπείρας στο κέντρο του πηνίου τάσης η οποία αυξάνει την ροπή που ασκείται στον δίσκο.

Η μέτρηση ενέργειας σε τριφασικά δίκτυα γίνεται με τριφασικούς μετρητές ενέργειας. Σε σύστημα τριών αγωγών (τρεις φάσεις) χρησιμοποιείται τριφασικός μετρητής τριών αγωγών ο οποίος αποτελείται από δύο επαγωγικούς μετρητές σε διάταξη Αγοπ με κοινό άξονα και απαριθμητή. Σε σύστημα τεσσάρων αγωγών (τρεις φάσεις και ουδέτερος) χρησιμοποιείται τριφασικός μετρητής τεσσάρων αγωγών ο οποίος αποτελείται από τρεις επαγωγικούς μετρητές με κοινό άξονα και απαριθμητή.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των επαγωγικών μετρητών είναι:

- α) Ονομαστικό ρεύμα το οποίο είναι το αναγραφόμενο στον μετρητή.
- β) Ονομαστική τάση, η οποία είναι η αναγραφόμενη στον μετρητή.
- γ) Ονομαστική ισχύς, η οποία είναι η αναγραφόμενη στον μετρητή (αναφέρεται σε ωμική κατανάλωση).
- δ) Ονομαστική συχνότητα, η οποία είναι η αναγραφόμενη στον μετρητή και η οποία αναφέρεται στην κανονική λειτουργία του.
- ε) Μέγιστο ρεύμα το οποίο είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα.
- στ) Σταθερά περιστροφών η οποία είναι ο αριθμός περιστροφών που αντιστοιχεί σε μία KWh. Οι συνηθισμένοι μονοφασικοί μετρητές οικιακής παροχής έχουν σταθερή περιστροφών 375 περιστροφές / KWh.

Επειδή εδώ δεν υπάρχει μέγιστη ένδειξη αλλά αθροιστική μέτρηση το σφάλμα του μετρητή αναφέρεται στην εκάστοτε ένδειξη του απαριθμητή.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Ποιά είναι τα κυριότερα σφάλματα των βαττομέτρων;
2. Ποιά λέγονται αντισταθμισμένα βαττόμετρα;
3. Ο μετρητής συντελεστή ισχύος του σχήματος 12.13 επηρεάζεται από τη συχνότητα του δικτύου;
4. Ποιά είναι τα βασικά χαρακτηριστικά ενός επαγωγικού μετρητή ενέργειας;

ΑΛΥΤΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Αναφερόμενοι στα σχήματα 12.1α και 12.1β να υπολογισθούν οι ενδείξεις του βαττομέτρου και στις δύο συνδεσμολογίες καθώς και η καταναλισκόμενη ισχύς στον καταναλωτή K αν:

$$U = 220V$$

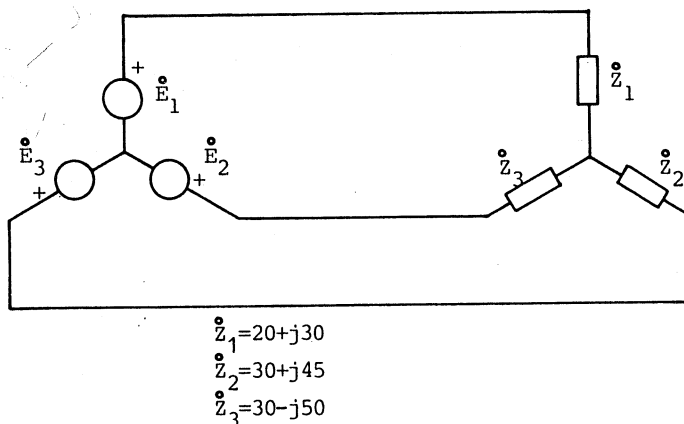
$$r_E = 10\Omega$$

$$r_T + R_o = 2K\Omega$$

Ο καταναλωτής είναι ωμικός, $R_K = 50\Omega$.

2. Να υπολογισθεί η ένδειξη του βαττομέτρου του σχήματος 12.3α αν η τάση του δικτύου είναι 2,2KV η ένταση του 10A και οι χρησιμοποιούμενοι μετασχηματιστές τάσης και έντασης έχουν λόγο μεταφοράς 10:1. Ο συντελεστής ισχύος είναι 0,8.

3.

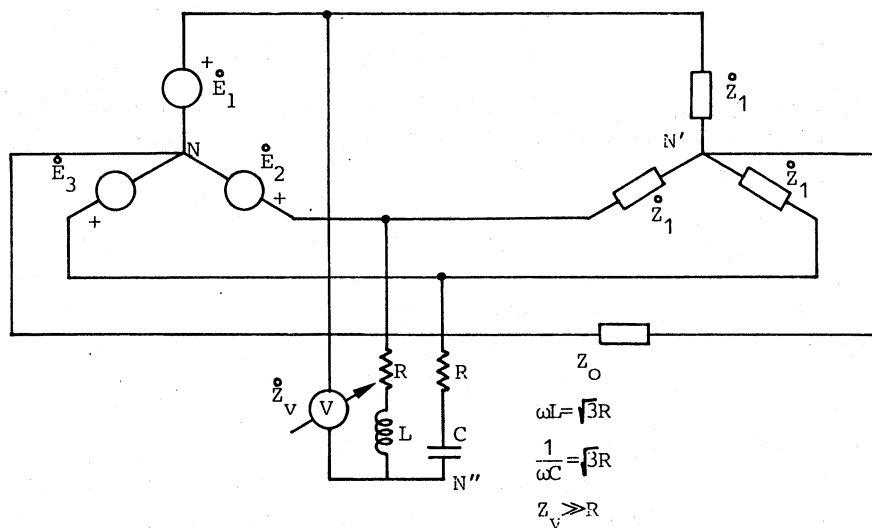


Αν η ισχύς του παραπάνω κυκλώματος μετριέται με διάταξη Aron να υπολογισθούν οι ενδείξεις των βαττομέτρων. Οι πηγές αποτελούν συμμετρικό τριφασικό σύστημα 220V και συχνότητας 50Hz.

4. Στο κύκλωμα της άσκησης 3 να υπολογισθούν οι ενδείξεις των τριών βαττομέτρων όταν συνδεθούν όπως στο σχήμα 12.10 για την μέτρηση της αέργου ισχύος.

5. Αν στο κύκλωμα της άσκησης 3 είναι $\dot{Z}_2 = \dot{Z}_3 = \dot{Z}_1 = 20 + j30$ να υπολογισθεί ο συντελεστής ισχύος βάσει των ενδείξεων των βαττομέτρων σε διάταξη Aron.

6.



Αν οι $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dot{E}_3$ αποτελούν τριφασικό σύστημα με μεταξύ τους γωνίες 120° και μέτρα $E_1 = 220V, E_2 = 150V, E_3 = 200V$ να υπολογισθεί η ένδειξη του βολτομέτρου του σχήματος και ενός βολτομέτρου που συνδέεται μεταξύ των κόμβων N και N'.

7. Η σταθερή περιστροφών ενός μετρητή είναι 375 περιστροφές / KWh. Αν μετρηθούν 10 περιστροφές του δίσκου σε ένα λεπτό να υπολογισθεί η ισχύς του δικτύου.

13. ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΙ

13.1. Γενικά.

Ο παλμογράφος είναι ένα όργανο που μπορεί να παρουσιάσει σε οθόνη τη γραφική παράσταση ενός μεγέθους συναρτήσει ενός άλλου μεγέθους. Για παράδειγμα μπορεί να παρουσιάσει τη μεταβολή μίας τάσης συναρτήσει του χρόνου ή συναρτήσει μίας παραμέτρου. Αυτή είναι η βασική λειτουργία ενός παλμογράφου. Βέβαια υπάρχουν σήμερα παλμογράφοι με πολύ περισσότερες δυνατότητες από την απλή παρουσίαση μίας συνάρτησης.

Ο παλμογράφος είναι ένα όργανο γενικής χρήσης. Η μεγάλη του χρησιμότητα έγκειται στο ότι μπορεί να καταγράψει δυναμικά φαινόμενα η δε ταχύτητα απόκρισής του είναι πάρα πολύ μεγάλη.

Πιο ειδικά, οι βασικές λειτουργίες ενός παλμογράφου είναι η

- α) σύλληψη,
- β) απεικόνιση,
- γ) ανάλυση,

δυναμικών φαινομένων.

Ας πάρουμε για παράδειγμα την παρουσίαση μιας ημιτονοειδούς τάσης στην οθόνη του. Πρώτα γίνεται η σύλληψη και μετά η απεικόνισή της στην οθόνη. Η ανάλυση στην πιο απλή της μορφή συνίσταται στο ότι μπορεί να μετρηθεί το πλάτος της τάσης, η περίοδος της κ.λ.π. Σε πιο πολύπλοκους παλμογράφους μπορεί να γίνει μεγάλης κλίμακας ανάλυση ακόμη και ψηφιακή επεξεργασία της κυματομορφής.

Τα βασικά συστήματα ενός παλμογράφου όπως φαίνονται και στο σχήμα 13.1 είναι:

- α) Ο καθοδικός σωλήνας γνωστός σαν CRT (Cathode Ray Tube).
- β) Το σύστημα κάθετης εκτροπής που περιλαμβάνει κυρίως τον ενισχυτή κάθετης εκτροπής.
- γ) Το σύστημα οριζόντιας εκτροπής που περιλαμβάνει τον ενισχυτή οριζόντιας εκτροπής και το κύκλωμα σάρωσης.
- δ) Τα κυκλώματα συγχρονισμού.
- ε) Τις πηγές τροφοδοσίας. Υπάρχουν πηγές τροφοδοσίας υψηλής και χαμηλής τάσης.

Οι παλμογράφοι χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ως προς το εύρος ζώνης συχνοτήτων:

α) *Χαμηλής συχνότητας.* Το εύρος ζώνης συχνοτήτων του ενισχυτή κάθετης εκτροπής είναι περίπου 10MHz έως 20MHz.

β) *Υψηλής συχνότητας.* Το εύρος ζώνης συχνοτήτων του ενισχυτή κάθετης εκτροπής είναι μερικές εκατοντάδες MHz.

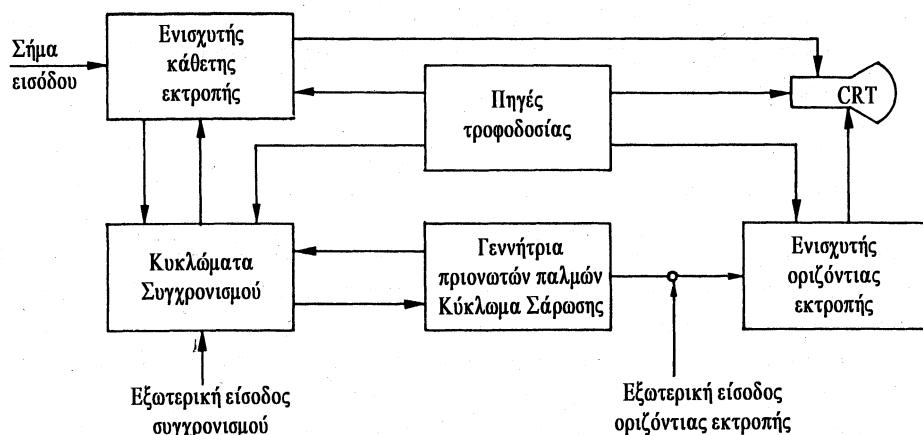
γ) *Παλμογράφοι δειγματοληψίας* όπου το εισερχόμενο σήμα υπόκειται σε δειγματοληψία. Αυτού του τύπου οι παλμογράφοι μπορούν να απεικονίσουν περιοδικά σήματα με συχνότητα άνω των 10GHz.

Επίσης οι παλμογράφοι χωρίζονται σε

α) παλμογράφους με μνήμη, και σε

β) απλούς.

Οι παλμογράφοι με μνήμη μπορούν να διατηρήσουν μία κυματομορφή που εμφανίστηκε μια φορά, χωρίς να επαναλαμβάνεται, για κάποιο χρονικό διάστημα. Οι απλοί παλμογράφοι δεν μπορούν να διατηρήσουν την κυματομορφή η οποία πρέπει να επαναλαμβάνεται ώστε το ίχνος της οθόνης να επαναλαμβάνεται τουλάχιστον 20 φορές / sec για να φαίνεται σταθερό στο ανθρώπινο μάτι.



Σχ. 13.1.

13.2. Ο καθοδικός σωλήνας.

Τα βασικά στοιχεία ενός καθοδικού σωλήνα είναι τα εξής (σχ. 13.2).

α) *Το ηλεκτρονικό πυροβόλο* το οποίο περιλαμβάνει το σύστημα της παραγωγής των ηλεκτρονίων, το σύστημα προεπιτάχυνσης τους και το σύστημα της εστίασής τους προς παραγωγή μιας ηλεκτρονικής δέσμης.

β) *Το σύστημα ηλεκτροδίων κάθετης εκτροπής* όπου γίνεται η κάθετη εκτροπή της δέσμης.

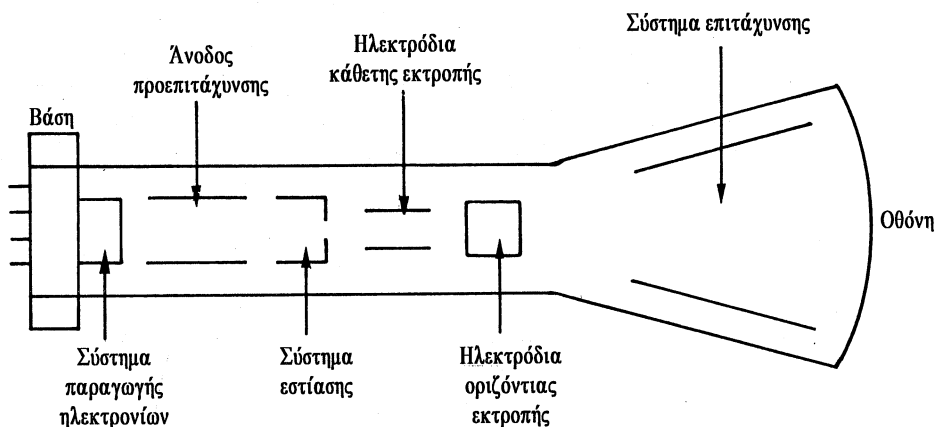
γ) Το σύστημα ηλεκτροδίων οριζόντιας εκτροπής όπου γίνεται η οριζόντια εκτροπή της δέσμης.

δ) Το σύστημα επιτάχυνσης όπου γίνεται η επιτάχυνση των ηλεκτρονίων πριν φθάσουν στην οθόνη. Σε πολλούς καθοδικούς σωλήνες δεν υπάρχει αυτό το σύστημα και τα ηλεκτρόνια κινούνται με την ενέργεια που απόκτησαν κατά την επιτάχυνση μέσα στο ηλεκτρονικό πυροβόλο.

ε) Η βάση η οποία είναι ένα μεταλλικό τμήμα μέσω του οποίου γίνονται οι συνδέσεις με τα διάφορα στοιχεία που βρίσκονται μέσα στον καθοδικό σωλήνα.

Ανάλογα με τον αριθμό δεσμών που παράγουν οι καθοδικοί σωλήνες χωρίζονται σε

- α) απλής δέσμης,
- β) διπλής δέσμης, και
- γ) πολλών δεσμών.



Σχ. 13.2.

Η εκτροπή της δέσμης μπορεί να γίνεται

- α) ηλεκτροστατικά,
- β) ηλεκτρομαγνητικά.

Η εστίαση της δέσμης μπορεί να γίνεται επίσης

- α) ηλεκτροστατικά,
- β) ηλεκτρομαγνητικά.

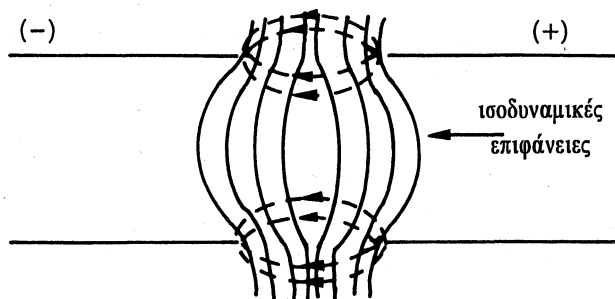
Οι παλμογράφοι χρησιμοποιούν κυρίως καθοδικούς σωλήνες με ηλεκτροστατική εστίαση και εκτροπή ενώ οι τηλεοράσεις και πολλά ιατρικά μηχανήματα καταγραφής χρησιμοποιούν κυρίως καθοδικούς σωλήνες με ηλεκτρομαγνητική εστίαση και εκτροπή.

Το ηλεκτρονικό πυροβόλο.

Η παραγωγή των ηλεκτρονίων γίνεται από μία *θερμιονική κάθοδο* που θερμαίνεται έμμεσα. Τα ηλεκτρόνια μετά περνούν από ένα λεπτό άνοιγμα του *πλέγματος ελέγχου*. Το πλέγμα ελέγχου είναι συνήθως ένας κύλινδρος με ένα άνοιγμα στη μέση. Μετά το πλέγμα ελέγχου τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από το υψηλό δυναμικό (μερικά KV ως προς την κάθοδο) της *άνοδου επιτάχυνσης*. Μετά την άνοδο τα ηλεκτρόνια εστιάζονται από την *άνοδο εστίασης*. Τόσο η άνοδος επιτάχυνσης όσο και η άνοδος εστίασης είναι συνήθως κυλινδρικής μορφής.

Η τάση του πλέγματος ελέγχου ελέγχει τον αριθμό ηλεκτρονίων που θα περάσουν μέσα από το άνοιγμα του πλέγματος και κατά συνέπεια ελέγχει την ένταση του ίχνους της δέσμης στην οθόνη.

Η εστίαση όπως είπαμε μπορεί να είναι ηλεκτροστατική που χρησιμοποιείται κυρίως στους παλμογράφους ή ηλεκτρομαγνητική. Η ηλεκτροστατική εστίαση στηρίζεται στον λεγόμενο «ηλεκτρονικό φακό» που δημιουργείται από το ηλεκτροστατικό πεδίο στο διάστημα μεταξύ δύο κυλίνδρων, (σχ. 13.3). Όταν τοποθετηθούν δύο κύλινδροι κατά μήκος όπως φαίνεται στο σχήμα 13.3 και υπάρχει μία διαφορά δυναμικού μεταξύ των κυλίνδρων το ηλεκτροστατικό πεδίο δεν είναι ομοιόμορφο αλλά έχει τη μορφή του σχήματος 13.3. Ένα τέτοιο πεδίο δρά σε μία δέσμη ηλεκτρονίων συγκεντρωτικά όπως ένας φακός δρά σε μία δέσμη φωτός.



Σχ. 13.3.

Κάθετη και οριζόντια εκτροπή.

Η ηλεκτροστατική εκτροπή στηρίζεται στην απόκλιση της ηλεκτρονικής δέσμης όταν διέρχεται μέσα από φορτισμένα, υπό μορφή πυκνωτή, ηλεκτρόδια.

Η ηλεκτρομαγνητική εκτροπή επιτυγχάνεται με μεταβολές του μαγνητικού πεδίου οι οποίες γίνονται με μεταβολή του ρεύματος που διαρρέει ένα πηνίο.

Προφανώς στις υψηλές συχνότητες χρειάζονται πηνία με λίγες σπείρες και μεγάλα ρεύματα. Αυτό όμως σημαίνει μεγάλη κατανάλωση ισχύος. Αντίθετα η ηλεκτροστατική εκτροπή για το ίδιο κόστος ενισχυτή εκτροπής μπορεί να πετύχει ταχύτητες πολύ μεγαλύτερες από εκείνες τις ηλεκτρομαγνητικής εκτροπής. Γι' αυτό το λόγο σε παλμογράφους, οι οποίοι πρέπει να αποκρίνονται σε υψηλές συχνότητες, χρησιμοποιείται ηλεκτροστατική εκτροπή.

Παράμετροι που ενδιαφέρουν από πρακτικής σκοπιάς είναι

α) η ευαισθησία, και

β) η γραμμικότητα

της εκτροπής.

Ευαισθησία εκτροπής είναι ο λόγος της τάσης που απαιτείται να εφαρμοσθεί στα ηλεκτρόδια κάθετης εκτροπής προς το μέγεθος της εκτροπής που επιτυγχάνεται στην οθόνη μετρούμενη σε υποδιαιρέσεις της οθόνης. Κυρίως ενδιαφέρει η ευαισθησία της κάθετης εκτροπής.

Το αντίστροφο της ευαισθησίας, S , λέγεται *συντελεστής εκτροπής* f . Ισχύει δε η σχέση 13.1 για την ηλεκτροστατική εκτροπή.

$$S = \frac{l}{f} = \frac{lL}{kV_b d} \quad (13.1)$$

όπου l : το μήκος των ηλεκτροδίων εκτροπής σε μέτρα,

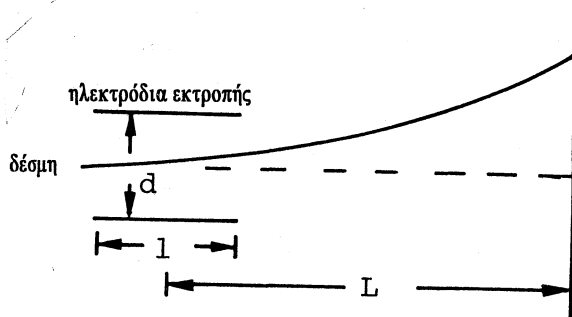
L : η απόσταση σε μέτρα από το μέσο των ηλεκτροδίων εκτροπής μέχρι την οθόνη,

K : μία σταθερή,

V_b : η τάση προεπιτάχυνσης της δέσμης σε Volt,

d : η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων εκτροπής σε μέτρα.

Η έννοια της ευαισθησίας γίνεται καλύτερα αντιληπτή από το σχήμα 13.4.



Σχ. 13.4.

Επομένως η ευαισθησία ενός καθοδικού σωλήνα με ηλεκτροστατική εκτροπή αυξάνεται ανάλογα με το μήκος του σωλήνα και των ηλεκτροδίων εκτροπής και αντίστροφα με την απόσταση των ηλεκτροδίων εκτροπής και την ενέργεια της δέσμης.

Η γραμμικότητα αναφέρεται στο κατά πόσο η ευαισθησία είναι η ίδια για εκτροπές γύρω από το κέντρο της οθόνης με την ευαισθησία για εκτροπές στις άκρες της οθόνης.

Σύστημα επιτάχυνσης.

Σε καθοδικούς σωλήνες με ηλεκτροστατική εκτροπή η τάση προεπιτάχυνσης είναι μόνο μερικά KV (συνήθως 4KV) για να υπάρχει μεγάλη ευαισθησία. Έτσι όταν η δέσμη κινείται με μεγάλη ταχύτητα στην οθόνη, δηλαδή σε υψηλές συχνότητες σήματος, η ενέργεια αυτή της δέσμης δεν είναι αρκετή για να δημιουργήσει ένα έντονο ίχνος. Χρειάζεται λοιπόν σε αυτή την περίπτωση επιτάχυνση της δέσμης μετά την εκτροπή της.

Καθοδικοί σωλήνες χωρίς σύστημα επιτάχυνσης λειτουργούν καλά για συχνότητες μέχρι π.χ. 10MHz.. Επάνω από αυτές τις συχνότητες χρειάζεται επιτάχυνση.

Υπάρχουν διάφορα συστήματα επιτάχυνσης. Συστήματα «διαμορφωμένου πεδίου», «ακτινωτού πεδίου» κ.λ.π. αλλά δεν θα αναφερθούμε εδώ σε λεπτομέρειες αυτών των συστημάτων.

13.3. Οθόνες παλμογράφου.

Η οθόνη του παλμογράφου είναι συνήθως μία επίπεδη επιφάνεια διαστάσεων 10cm × 10cm.

Το υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως για τη δημιουργία του ίχνους είναι ο φωσφόρος. Όταν η δέσμη προσπέσει επάνω στο φωσφόρο η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων απορροφάται από τα άτομα του φωσφόρου και μετατρέπεται σε φωτεινή ενέργεια στην περιοχή του ορατού φάσματος. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό σαν φαινόμενο φθορισμού. Και μετά την απομάκρυνση της δέσμης όμως συνεχίζει η εκπομπή φωτός για κάποιο χρονικό διάστημα (φωσφορισμός).

Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η εκπομπή φωτός συνεχίζεται και μετά την απομάκρυνση της δέσμης (δηλ. μετά την διέγερση) λέγεται *διάρκεια εκπομπής*.

Ανάλογα με το μέγεθος της διάρκειας εκπομπής οι διάφοροι τύποι φωσφόρου χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες

- α) μικρής διάρκειας εκπομπής,
- β) μέσης διάρκειας εκπομπής, και
- γ) μεγάλης διάρκειας εκπομπής.

Ο χρόνος που απαιτείται για τη μείωση της έντασης του εκπεμπομένου φωτός στο e^{-1} της έντασης τη στιγμή της διέγερσης είναι:

—Για τύπους φωσφόρου μικρής διάρκειας εκπομπής μικρότερος από 1ms.

—Για τύπους φωσφόρου μέσης διάρκειας εκπομπής μικρότερος από 2s.

—Για τύπους φωσφόρου μεγάλης διάρκειας εκπομπής μεγαλύτερος από μερικά λεπτά ίσως και ώρες.

Ανάλογα με τη χρήση της οθόνης απαιτείται και τύπος φωσφόρου ανάλογης διάρκειας εκπομπής. Για παράδειγμα για μικρές ταχύτητες της δέσμης όπως συμβαίνει στα ιατρικά καταγραφικά (monitors) απαιτείται φωσφόρος μέσης διάρκειας εκπομπής.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται μερικοί τύποι φωσφόρου με τα χαρακτηριστικά τους.

Τύπος φωσφόρου	Χρώμα ίχνους		Διάρκεια εκπομπής	Εφαρμογές
	Κατά τη διέγερση	μετά τη διέγερση		
P1	Κιτρινοπράσινο	Κιτρινοπράσινο	Μέση	Παλμογράφοι, ραντάρ
P2	Μπλε-πράσινο	Κιτρινοπράσινο	Μέση	Παλμογράφοι
P4	Άσπρο	Άσπρο-κίτρινο	Μέση	Ασπρόμαυρη τηλεόραση
P7	Μπλε-άσπρο	Κιτρινοπράσινο	Μεγάλη	Ιατρικά, ραντάρ
P11	Μπλε	Μπλε	Μικρή προς μέση	Φωτογραφικές εφαρμογές
P16	Μπλε-βιολετί	Μπλε-βιολετί	Πολύ μικρή	Τηλεόραση
P18	Άσπρο	Άσπρο	Μέση	Τηλεόραση
P19	Πορτοκαλί	Πορτοκαλί	Μεγάλη	Ραντάρ
P26	Πορτοκαλί	Πορτοκαλί	Πολύ μεγάλη	Ραντάρ
P28	Κιτρινοπράσινο	Κιτρινοπράσινο	Μεγάλη	Ραντάρ, ιατρικά
P31	Πράσινο	Πράσινο	Μικρή προς μέση	Παλμογράφοι
P33	Πορτοκαλί	Πορτοκαλί	Πολύ μεγάλη	Ραντάρ
P39	Πράσινο	Πράσινο	Μέση προς μεγάλη	Υπολογιστές για οθόνες σχημάτων

Πίνακας 13.1.

Ένα μέρος της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων της δέσμης μετατρέπεται σε φωτεινή ενέργεια ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία μπορεί να μειώσει την απόδοση του φωσφόρου ή ακόμη και να κάψει ένα σημείο της οθόνης αν κρατιέται η δέσμη σε ένα σημείο για μεγάλο χρονικό διάστημα και αν η ένταση της είναι μεγάλη.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

Α

Αισθητήριο, 271-273, 289, 428
Ακρίβεια, 24, 291
Ακρίβεια διασποράς, 24, 291
Άμεση γείωση, 44
Αναλογικό φίλτρο, 270, 448, 449
Ανιχνευτής, 273
 ακτίνων, X, 436
 αντικειμένων, 360, 361, 437-439
 pH, 436
 πάχους, 437
 ραδιενέργειας, 436
 υγρασίας, 436
Άνοδος εστίασης, 224
Αντιστάθμιση, 122-125
Αντισταθμισμένο βατόμετρο, 197
Αντίσταση γείωσης, 45
Αντίσταση διάχυσης, 45
Αντίσταση εισόδου, 291
Απόκλιση, 450, 451
Απόλυτο σφάλμα, 25
Απόλυτοι μετατροπείς ταχύτητας, 369
 επιτάχυνσης, 369
Απόσταση ανίχνευσης, 439
Αρση διάταξη, 202-204
Αυτόματοι για έλλειψη τάσης, 52
Αυτόματοι διαδοχής φάσεων, 52

Β

Βηματική είσοδος, 298
Bourdon σωλήνες, 384, 385

Γ

Γαλβανική απομόνωση, 446, 449
Γέφυρα, 448
 Schering, 156
 Thomson, 144-147
 Wagner, 164
 Wien, 161
 Wheatstone, 138-142
Γείωση, 42-46
 λειτουργίας, 43
 προστασίας, 44
ΓΜΔΜ, 303, 329-333
Γραμμικοποίηση, 432, 449, 450
Γραμμικότητα μέτρησης, 294
Γωνία απωλειών, 148-152

Δ

Διακόπτες διαφυγής, 42, 48-50
 έντασης, 49, 50
 τάσης, 49, 50
Διακριτική ικανότητα, 25, 291, 454, 456,
 457, 472
Διακοπτόμενος τρόπος απεικόνισης, 233
Διάρκεια εκπομπής, 226
Διάφραγμα, 384, 385, 392, 394
Διαφορικός συγχροπομπός ελέγχου, 307,
 314, 315
 ροπής, 308, 317-319
Διμεταλλικό στοιχείο, 419
Διπολικός μετατροπέας, 454
Δυναμική συμπεριφορά, 296-300

Ε

Είσοδος, 287, 291
Είσοδος θορύβου ή παρεμβολής, 291
 διαμόρφωσης, 291, 292
 επιθυμητή, 291
Ελαστικά μηχανικά στοιχεία, 384-386
Εναλλασσόμενος τρόπος απεικόνισης, 233
Ενεργοποιητής, 271
Ενισχυτής, 450-453
 απομόνωσης, 450, 452, 453
 μέτρησης, 450, 452
 τελεστικός, 450, 451
Ένωση αναφοράς, 424
Έξοδος, 287
Επαγωγική σύζευξη, 57, 59, 60
Επαγωγικοί μετρητές, 217
Επέκταση κλίμακας, 116-118
Επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόχου, 370-375
 κλειστού βρόχου, 375, 376
Επιταχυνσιόμετρα με ΓΜΔΜ, 371
 με πιεζοαντίσταση, 371
 με ποτενσιόμετρο, 370
Εσωτερική αντίσταση, 68, 291
Ευαισθησία, 25, 294
Ευαισθησία εκτροπής, 225
Εύρος ζώνης συχνοτήτων, 234, 300
Εύρος μετατροπής, 453, 454

Ζ

Ζεύγος ελέγχου, 312
 ροπής, 316, 317

Η

Ηλεκτρική αντιστάθμιση θερμοκρασίας
 αναφοράς, 427
Ηλεκτρομαγνητική σύζευξη, 57, 60
Ηλεκτρονικό βολτόμετρο, 174-178

Ηλεκτροπληξία, 41
Ηλεκτροστατική σύζευξη, 56-59
Ημιαγωγικοί μετατροπείς θερμοκρασί-
 ας, 433

Θ

Θεμελιώδη μεγέθη, 13, 16, 17
Θερμιοδική κάθοδος, 224
Θερμίστορ, 280, 418, 430-432
 γραμμικοποίηση, 432
Θερμοζεύγος, 418, 419-426
 Τύποι, 421
Θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη, 420, 422, 423
Θερμοκρασία αναφοράς, 424
Θερμόμετρο διαστολής, 418
Θερμόμετρο πλήρους εμβάπτισης, 419
 μερικής εμβάπτισης, 419
 πίεσης, 419
Θεώρημα Blondel, 199, 200
Θόρυβος ηλεκτρικός, (πηγές) 56

Ι

Ιντάκτοζυν, 323-325

Κ

Καθοδικός σωλήνας, 222-223
Καταμεριστές τάσης, 253, 254
Κλάση, 26, 27
Κλίμακα Fahrenheit, 417, 418
 θερμοδυναμική, 417
 Κελσίου, 417, 418
 Kelvin, 417
 πρακτική, 417
Κώδικας BCD, 455, 456, 458
 δυναδικός, 455, 457
 δυναδικός με πόλωση, 458, 459
 Gray, 455, 457

πρόσημο και μέγεθος, 458, 459
συμπλήρωμα του δύο, 458, 459
συμπλήρωμα του ένα, 458, 459
Κωδικοποιητής, 303, 333
επαφής, 333, 336
οπτικός απόλυτος, 333, 335
οπτικός μεταβολής, 333, 334

Λ

Lissajous σχήματα, 242-246
Λόγος απόρριψης κοινού σήματος, 450-452

Μ

Μαγνητική σύζευξη, 57, 59, 60
Μανόμετρα, 382-384
Μέθοδος Murray, 166
Μετασχηματιστές, 127, 255-265
απομόνωσης, 42, 47, 48
Μετατροπέας A/D, 271, 453-468
D/A, 271, 469-473
τάση ρεύματος, 469
διαδοχικών προσεγγίσεων, 462, 463
κλιμακωτής ανόδου, 462
ολοκλήρωσης, 462-465
παράλληλος, 462, 466
Μετατροπέας, 272-289
διαφορικού M/T, 272, 276, 277
εισόδου, 271
εξόδου, 271
ενεργός, 272
επαγωγικός, 273, 281, 282
ηλεκτρομηχανικός, 272, 274, 275
ημιαγωγικός, 273, 280, 281, 433
θερμοδιαστολής, 272, 280
θερμοηλεκτρικός, 272, 280
Hall, 273, 282-284, 439-441
μαγνητοαντίσταση, 272, 284

μεταβλητής αντίστασης, 272, 280
παθητικός, 272
πιεζοαντίστασης, 272, 277, 278, 349-352
πιεζοηλεκτρικός, 272, 279, 280
ποτενσιομέτρου, 272, 275, 276
ταλαντωτή, 273, 282
φωτοηλεκτρικός, 272, 278, 279
χωρητικός, 273, 281
Μετατροπείς βάρους με πιεζοαντίσταση, 350, 351
Μετατροπείς δύναμης με ΓΜΔΜ, 352, 353
μεταβλητής επαγωγής, 352, 353
πιεζοαντίστασης, 349-352
πιεζοηλεκτρικός, 352, 353
Μετατροπείς επιτάχυνσης, 366-374
Μετατροπείς θέσης, 303
μεταβλητής επαγωγής, 337, 338
χωρητικοί, 337, 338-340
Μετατροπείς κλίσης, 340
Μετατροπείς ταλαντώσεων, 376-378
Μετατροπείς ταχύτητας, 359-366
Μετατροπείς πίεσης, 381-397
ΓΜΔΜ, 390-392
επαγωγικός, 390, 392
πιεζοαντίστασης, 390, 393, 394
πιεζοηλεκτρικός, 386-390, 395
ποτενσιόμετρο, 390, 395, 396
χωρητικός, 390, 392, 393
ωμικός, 390, 396
Μετατροπείς ροπής, 353-355
Μετρητής παροχής, 399-412
ακροφυσίου, 401, 403, 404
διαφορικού τύπου, 401
διαφράγματος, 401-403
δοσομετρικός, 411, 412
ηλεκτρομαγνητικός, 404-407
στροβίλου, 412
Venturi, 401, 403, 404

Μετρητής παροχής υπερήχων, 407-410
Doppler, 407, 409, 410
Χρόνου μετάβασης, 407-409
Μετρητής στάθμης, 413-415
με μέτρησης πίεσης, 413
με βυθιζόμενο σώμα, 413, 414
με επιπλέον σώμα, 413, 414, 415
με χωρητικό μετατροπέα, 413, 415
με υπερήχους, 413, 415
με H/M ακτινοβολία ή Laser, 413, 415
Μονοπολικός μετατροπέας (A/D, D/A),
454
Μπουρντόν, 384, 385
Μνήμη πλέγματος, 228, 229
Μνήμη φωσφόρου, 228, 229
Μονάδες, 13-17
Μονώσεις, 42, 43

Ο

Ολίσθηση, 427, 450, 451
Όργανα αναλογικά, 67
ψηφιακά, 67
με δείκτη, 67-122
μηδενισμού, 67
κινητού πηνίου, 73, 90
διασταυρωμένων, πηνίων 90-92
κινητού μαγνήτη, 92-94
με ανορθωτή, 94-102
κινητού σιδήρου, 102-104
ηλεκτροδυναμικά, 104-110
ηλεκτροστατικά, 110-111
θερμικά, 111, 112
Ουδετέρωση, 44

Π

Παλμογράφος δειγματοληψίας, 222, 238,
239
Παράγωγα μεγέθη, 13, 16, 17

Περιοχή μέτρησης, 68, 291
Περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας, 300
Πιεζοαντίσταση, 272, 277, 278, 343-347
ελεύθερη, 278, 345-347
προσκολλημένη, 278, 344, 345
συντελεστής μεταβολής, 277, 347
Πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, 386-389
συντελεστής, 387
Πίεση απόλυτη, 382
διαφορική, 382
σχετική, 382
Πολύμετρα, 113, 114
Πολυπλέκτης, 468
Πόλωση, 25, 291, 449
Πρότυπα, 18

Ρ

Ρεύμα πόλωσης, 450, 451
Ρεύμα σκότους, 444
Ρύθμιση, 292-294
καμπύλη, 293
Ρύθμιση οργάνων, 114-115
RDC, 327
RTD, 280, 428-430

Σ

Scott σύνδεση, 326
Στατική συμπεριφορά, 291
Στροβοσκοπική μέθοδος, 362, 363
Σύγχρο, συγχροαναλυτές, 307-325
Συγχροπομπός ελέγχου, 307, 311, 312
ροπής, 308, 315, 316
Συγχρομετασχηματιστής ελέγχου, 307,
312-314
Συγχροδέκτης ροπής, 308, 316
Συγχροζεύγος ελέγχου, 312
Συγκράτηση (κύκλωμα), 467, 468
Σύζευξη κοινής αντίστασης, 57, 61-63

Συμμετρικές συνιστώσες, 210-217
 Συνάρτηση μεταφοράς, 287
 ημιτονοειδής, 299
 Συντελεστής απωλειών, 148-152
 Συντελεστής εκροής, 402
 Σύστημα επεξεργασίας, 270
 μετάδοσης, 270, 453
 προσαρμογής, 270, 326-328, 355, 356,
 397, 426, 448
 τάξη, 296, 297
 Συχνόμετρο, 246-251
 Σφάλμα διακεκριμενοποίησης, 460
 διαφορικής γραμμικότητας, 460
 επικάλυψης, 449
 κλίμακας (κέρδους), 461
 πόλωσης, 472
 Σφάλματα, 22-30
 Σχετικό σφάλμα, 25

T

Ταχογεννήτρια ac, dc, 364, 365
 Τυπικές τάσεις σύγχρο, 310
 συγχροαναλυτή, 320

Y

Υπερφόρτιση, 68
 Υπερφόρτιση δυναμική, 295
 στατική, 295
 Υστέρηση, 295
 VTVM, 177

Φ

Φαινόμενο Peltier, 420, 421
 Seebeck, 420
 Thomson, 420, 421
 Φυσητήρας, 384-386
 Φωτεινή ισχύς, 442
 ένταση, 442
 Φωτισμός, 442
 Φωτοεκπομπή, 278, 442
 Φωτοαγωγιμότητα, 278, 442
 Φωτοβολταϊκή δράση, 278, 442
 Φωτολυχνία, 278, 442, 443
 Φωτοαντίσταση, 443
 Φωτοδίοδος, 278, 444, 445
 Φωτοβολταϊκό στοιχείο, 445
 Φωτοτρανζίστορ, 445

X

Χρόνος ανόδου, 234, 235
 Χρόνος αποκατάστασης, 473
 απόκρισης, 297
 μετατροπής, 454, 469, 473
 Χωρητική σύζευξη, 56-59

Ω

Ωμικός μετατροπέας, 390, 396
 Ωμόμετρα, 86-90