



ΑΝΩΤΕΡΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΣ ΣΧΟΛΕΣ
ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

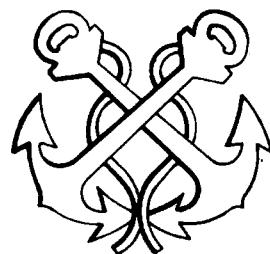
ΦΥΣΙΚΗ II

ΤΟΜΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟΣ



ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ



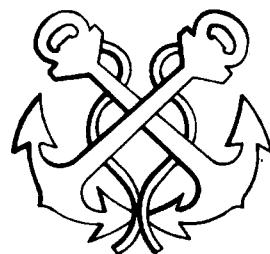
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ

Α.Δ.Σ.Ε.Ν.

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟΥ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ

ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ



ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ

Α.Δ.Σ.Ε.Ν.

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟΥ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ



I ΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΤΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

ΦΥΣΙΚΗ II

Μέρος Πρώτο

ΠΟΛΥΞΕΝΗΣ Ι. ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΥ - ΛΑΣΚΑΡΑΤΟΥ

Μέρος Δεύτερο

ΣΠΥΡΙΔΩΝΟΣ Ν. ΒΑΣΙΛΑΚΟΠΟΥΛΟΥ

Μέρος Τρίτο

ΖΑΧΑΡΙΑ Δ. ΤΣΟΥΚΑΛΑ

Μέρος Τέταρτο

ΙΩΑΝΝΟΥ ΑΘ. ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΥ
ΦΡΑΓΚΙΣΚΟΥ Β. ΤΟΠΑΛΗ

ΑΘΗΝΑ
1996





ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Ο Ευγένιος Ευγενίδης ιδρυτής και χορηγός του «Ιδρύματος Ευγενίδου» προείδε ενωρίτατα και σχημάτισε τη βαθιά πεποίθηση ότι αναγκαίο παράγοντα για την πρόδοτο του έθνους θα αποτελούσε η άρτια κατάρτιση των τεχνικών μας σε συνδυασμό προς την ηθική τους αγωγή.

Την πεποίθησή του αυτή τη μετέτρεψε σε γενναία πράξη ευεργεσίας, διαν κληροδότησε σεβαστό ποσό για τη σύσταση Ιδρύματος που θα είχε ως σκοπό να συμβάλλει στην τεχνική εκπαίδευση των νέων της Ελλάδας.

Με το Β. Διάταγμα της 10ης Φεβρουαρίου 1956, συνεστήθη το Ίδρυμα Ευγενίδου και κατά την επιθυμία του διαθέτη του ανέλαβε τη διοίκηση η αδελφή του κυρία Μαρ. Σίμου. Από τη στιγμή εκείνη άρχισαν πραγματοποιούμενοι οι σκοποί που οραματίσθηκε ο Ευγένιος Ευγενίδης και συγχρόνως η εκπλήρωση μιας από τις βασικότερες ανάγκες του εθνικού μας βίου.

Κατά την κλιμάκωση των σκοπών του, το Ίδρυμα πρόταξε την έκδοση τεχνικών βιβλίων τόσο για λόγους θεωρητικούς όσο και πρακτικούς. Διαπιστώθηκε πράγματι ότι αποτελεί πρωταρχική ανάγκη ο εφοδιασμός των μαθητών με σειρές από βιβλία, τα οποία θα έθεταν ορθά θεμέλια στην παιδεία τους και θα αποτελούσαν συγχρόνως πολύτιμη βιβλιοθήκη για κάθε τεχνικό.

Ειδικότερα, δύον αφορά στα εκπαιδευτικά βιβλία των σπουδαστών των Δημοσίων Σχολών Εμπορικού Ναυτικού, το Ίδρυμα ανέλαβε την έκδοσή τους σε πλήρη και στενή συνεργασία με τη Διεύθυνση Ναυτικής Εκπαίδευσεως του Υπουργείου Εμπορικής Ναυτιλίας, υπό την εποπτεία του οποίου υπάγονται οι Σχολές αυτές.

Η ανάθεση στο Ίδρυμα έγινε με την υπ' αριθ. 61288/5031, της 9ης Αυγούστου 1966, απόφαση του Υπουργείου Εμπορικής Ναυτιλίας, οπότε και συγκροτήθηκε και η Επιτροπή Εκδόσεων.

Κύριος σκοπός των εκδόσεων αυτών, των οποίων το περιεχόμενο είναι σύμφωνο με τα εκάστοτε ισχύοντα αναλυτικά προγράμματα του Υ.Ε.Ν., είναι η παροχή προς τους σπουδαστές των ναυτικών σχολών ΑΔΣΕΝ και Ναυτικών Λυκείων των αναγκαίων εκπαιδευτικών κειμένων, τα οποία αντιστοιχούν προς τα μαθήματα που διδάσκονται στις Σχολές αυτές.

Επίσης ελήφθη πρόνοια, ώστε τα βιβλία αυτά να είναι γενικότερα χρήσιμα για όλους τους αξιωματικούς του Εμπορικού Ναυτικού, που ασκούν ήδη το επάγγελμα και εξελίσσονται στην ιεραρχία του κλάδου τους, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι επέρχεται μεταβολή στη στάθμη του περιεχομένου τους.

Οι συγγραφείς και η Επιτροπή Εκδόσεων του Ιδρύματος καταθάλλουν κάθε προσπάθεια, ώστε τα βιβλία να είναι επιστημονικώς άρτια αλλά και προσαρμοσμένα στις ανάγκες και τις δυνατότητες των σπουδαστών. Γι' αυτό και τα βιβλία αυτά έχουν προσεγμένη γλωσσική διατύπωση και η διαπραγμάτευση των θεμάτων είναι ανάλογη προς τη στάθμη της εκπαίδευσεως για την οποία προορίζεται κάθε σειρά των βιβλίων.

Έτσι προσφέρονται στους καθηγητές, τους σπουδαστές της ναυτικής μας εκπαίδευσεως και όλους τους αξιωματικούς του Ε.Ν. οι εκδόσεις του Ιδρύματος, των οποίων η συμβολή στην πραγματοποίηση του σκοπού του Ευγενίου Ευγενίδου ελπίζεται να είναι μεγάλη.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Μιχαήλ Αγγελόπουλος, καθηγητής ΕΜΠ, Πρόεδρος.

Αλέξανδρος Σταυρόπουλος, καθηγητής Α.Β.Σ. Πειραιώς, Αντιπρόεδρος.

Ιωάννης Τεγόπουλος, καθηγητής ΕΜΠ.

Φώτιος Ψαρράς, πλοϊαρχος Λ.Σ., Διευθ. Ναυτ. Εκπ. Υ.Ε.Ν.

Σύμβουλος επί των εκδόσεων του Ιδρύματος Κων. Μανάφης, καθηγ. Φιλ. Σχολής Παν/μίου Αθηνών.

Γραμματέας της Επιτροπής, Γεώργιος Ανδρεάκος.



ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

1) Ηλεκτρολύτες – Ηλεκτρόλυση – Νόμος Faraday.

Εάν στο θετικό και αρνητικό πόλο μιας πηγής συνεχούς ρεύματος συνδέθουν δυο αγωγοί (σύρματα) (σχ. 1) και τα ελεύθερά τους άκρα βυθιστούν σε δοχείο που περιέχει υγρό, θα παρατηρηθεί ένα απ' τα πιο κάτω δυο φαινόμενα:

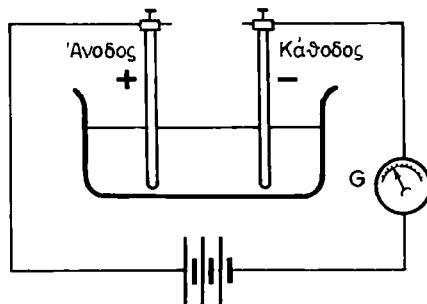
α) Το υγρό διακόπτει το ηλεκτρικό κύκλωμα, δηλαδή συμπεριφέρεται σαν μονωτικό υλικό. Αυτό συμβαίνει, όταν το υγρό αυτό είναι καθαρό νερό, πετρέλαιο, θενζίνη ή άλλο καθαρό υγρό.

β) Το ηλεκτρικό κύκλωμα κλείνει διά μέσου του υγρού και το ρεύμα κυκλοφορεί κανονικά, πράγμα που συμβαίνει, όταν το υγρό είναι υδράργυρος, μέταλλο σε ρευστή κατάσταση, αραιό οξύ, διάλυμα μεταλλικού άλατος κ.λ.π. Στην περίπτωση αυτή το υγρό είναι καλός αγώγος του ηλεκτρισμού.

Εάν το αγώγιμο υγρό είναι υδράργυρος ή μέταλλο σε ρευστή κατάσταση, το ρεύμα διέρχεται μέσα απ' αυτό, χωρίς να του προκαλεί χημική αλλοίωση.

Εάν όμως το αγώγιμο υγρό είναι νερό ή κάποιο διαλυτικό (οινόπνευμα, αμμωνία κ.λ.π.) και μέσα σ' αυτό υπάρχει διαλυμένο οξύ, βάση ή αλάτι, τότε η διέλευση του ρεύματος έχει σαν αποτέλεσμα τη χημική αποσύνθεση του διαλύματος των μορίων του σε κινούμενα, ηλεκτρικά φορτισμένα θετικά και αρνητικά σωματίδια που λέγονται ιόντα.

Τα υγρά, που αποσυντίθενται με τη διέλευση του ρεύματος, λέγονται ηλεκτρολύτες ή αγωγοί δεύτερου είδους και το φαινόμενο της αποσυνθέσεως ονομάζεται ηλεκτρόλυση. Αγωγοί πρώτου είδους ονομάζονται τα αγώγιμα



Σχ. 1.

σώματα (στερεά ή υγρά), που δεν αποσυντίθενται με τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος. Τα δυο αγώγιμα σύρματα, που βυθίζονται στο υγρό, ονομάζονται ηλεκτρόδια. Ονομάζομε κάθοδο το ηλεκτρόδιο που έχει συνδεθεί με τον αρνητικό πόλο και άνοδο το ηλεκτρόδιο που συνδέεται με το θετικό πόλο της πηγής. Μεταξύ αυτών των δυο ηλεκτροδίων, λόγω της διαφοράς δυναμικού τους, υφίσταται ένα ηλεκτρικό πεδίο που έχει διεύθυνση από την άνοδο προς την κάθοδο και εξαιτίας του οποίου ασκούνται δυνάμεις $F = q \cdot E$ πάνω στα ιόντα του ηλεκτρολύτη με αποτέλεσμα τα θετικά ιόντα να κινούνται προς την κάθοδο (κατιόντα) και τα αρνητικά προς την άνοδο (ανιόντα). Τα κατιόντα όταν φθάσουν στην κάθοδο παίρνουν τα ηλεκτρόνια που τους λείπουν και εκφορτίζονται. Τα ανιόντα αφήνουν στην άνοδο τα ηλεκτρόνια που τους περισσεύουν και εκφορτίζονται. Η ηλεκτρόλυση πραγματοποιείται μόνο με ρεύμα συνεχές και τα προϊόντα της διασπάσεως των ηλεκτρολυτών απελευθερώνονται μόνον πάνω στα ηλεκτρόδια και ποτέ στη μάζα του ηλεκτρολύτη.

Για να υπολογίσουμε τη μάζα m του στοιχείου που εμφανίζεται στα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$m = \frac{1}{96.500} \cdot \frac{A}{n} \cdot Q = \frac{1}{96.500} \frac{A}{n} It$$

Νόμος του Faraday

όπου A το ατομικό βάρος του στοιχείου, n το σθένος του και I το ρεύμα που διέρχεται από το βολτάμετρο σε χρόνο t .

2) Ηλεκτρικά στοιχεία – Πόλωση των ηλεκτροδίων.

Όταν ένα μέταλλο έρχεται σ' επαφή με ηλεκτρολύτη, τότε προκαλείται διάσπαση μερικών ατόμων του μετάλλου και αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στον ηλεκτρολύτη και στο μέταλλο.

Όταν π.χ. βυθίσουμε μέσα σε H_2SO_4 ένα ηλεκτρόδιο από Zn, τότε δυο διαδικασίες λαμβάνουν χώρα: Κατά την πρώτη διαδικασία ο ηλεκτρολύτης προκαλεί τη διάσπαση ορισμένων ατόμων του Zn σε θετικά ιόντα Zn^{++} και δυο ηλεκτρόνια ($Zn \rightarrow Zn^{++} + Ze^-$). Τα ιόντα Zn^{++} εισέρχονται στο διάλυμα και το φορτίζουν θετικά, ενώ τα ηλεκτρόνια παραμένουν στο ηλεκτρόδιο του Zn και το φορτίζουν αρνητικά. Κατά τη δεύτερη διαδικασία, ορισμένα από τα ιόντα Zn^{++} που βρίσκονται στο διάλυμα επιστρέφουν στο μεταλλικό έλασμα λόγω των ελκτικών δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ τους και μεταξύ των ηλεκτρονίων του μετάλλου και εγκαθίστανται σαν άτομα Zn ($Zn^{++} + Ze^- \rightarrow Zn$). Κατά τη διαδικασία αυτή είναι δυνατόν να προκληθεί έλλειψη ηλεκτρονίων στο μεταλλικό έλασμα, οπότε αυτό φορτίζεται θετικά ως προς το διάλυμα.

Αυτό βέβαια δεν θα συνεχίζεται για πολύ χρόνο, αλλά θα έλθει στιγμή όπου ο αριθμός των ιόντων ψευδαργύρου που εισέρχονται στο διάλυμα θα είναι ίσος με τον αριθμό των ιόντων που επιστρέφουν στο μεταλλικό έλασμα. Στην κατάσταση αυτή (κατάσταση ισορροπίας) μεταξύ του ηλεκτροδίου του ψευδαργύρου και του διαλύματος έχει αναπτυχθεί μία διαφορά δυναμικού (και μάλιστα έχει λάθει τη μέγιστη τιμή της) που ονομάζεται ηλεκτρολυτικό δυναμικό ($Zn \rightleftharpoons Zn^{++} + Ze^-$).

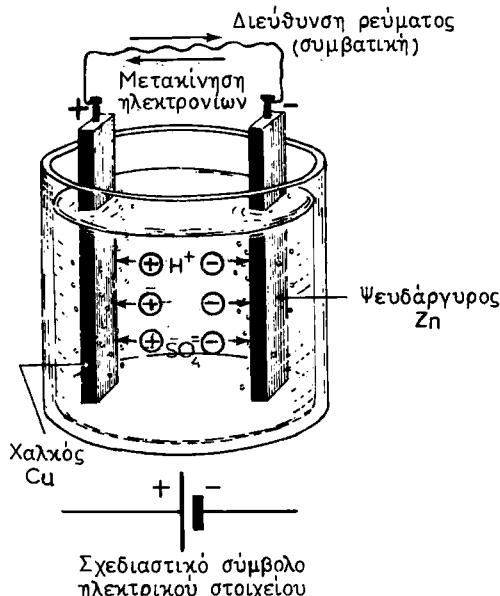
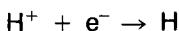
Το ηλεκτρολυτικό δυναμικό μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό ως προς τον ηλεκτρολύτη ανάλογα εάν το μεταλλικό έλασμα είναι θετικό ή αρνητικό ως προς αυτόν όταν επέρχεται ισορροπία. Αυτό εξαρτάται από τη θερμοκρασία, από τη φύση του μετάλλου και του ηλεκτρολύτη και από τη συγκέντρωση των ιόντων.

Έτσι, ο Zn εμφανίζει ως προς τον ηλεκτρολύτη H_2SO_4 αρνητικό δυναμικό $-0,77$ V, ενώ ο Cu εμφανίζει ως προς τον ίδιο ηλεκτρολύτη θετικό δυναμικό $+0,33$ V. Από τα παραπάνω συμπεραίνομε ότι εάν μέσα στον ίδιο ηλεκτρολύτη έχουμε τοποθετήσει δυο διαφορετικά ηλεκτρόδια, αυτά θα έχουν διαφορετικά ηλεκτρολυτικά δυναμικά και επομένως θα υπάρχει μια διαφορά δυναμικού μεταξύ τους, ίση με τη διαφορά των ηλεκτρολυτικών δυναμικών των δυο μετάλλων. Τη διαφορά αυτή δυναμικού ονομάζομε ηλεκτρεγερτική δύναμη.

Το σύστημα από δυο διαφορετικά μέταλλα που είναι υθισμένα στον ίδιο ηλεκτρολύτη αποτελεί επομένως ηλεκτρική πηγή. Η πηγή αυτή, που μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική, ονομάζεται ηλεκτρικό στοιχείο.

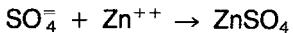
Στο σχήμα 2 φαίνεται το ηλεκτρικό στοιχείο Cu – H_2SO_4 – Zn και τα δυο ηλεκτρόδια που συνδέονται με αγωγό. Παρατηρείται ότι ηλεκτρόνια μετακινούνται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο (Zn) προς το θετικό (Cu).

Τα ηλεκτρόνια αυτά, που μεταφέρονται στο θετικό ηλεκτρόδιο, έλκουν ένα αντίστοιχο αριθμό θετικών ιόντων $H_2SO_4 \rightarrow 2H^+ + SO_4^{2-}$ και μετατρέπονται έτσι σε ουδέτερα άτομα:



Σχ. 2.

Τα ουδέτερα άτομα υδρογόνου ανέρχονται με τη μορφή φυσαλίδων και διασκορπίζονται στην ελεύθερη επιφάνεια του ηλεκτρολύτη. Ταυτόχρονα επειδή ελαττώνεται το φορτίο ηλεκτρονίων του αρνητικού ηλεκτροδίου, αντίστοιχος αριθμός ιόντων SO_4^{\equiv} του ηλεκτρολύτη ενώνεται με θετικά ιόντα ψευδαργύρου:



Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή νέων ηλεκτρονίων ($\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{++} + \text{Ze}^-$). Ο Zn στη συνέχεια διασπάται σε Zn^{++} που εισέρχονται στο διάλυμα και σε ηλεκτρόνια, γι' αυτό και φθείρεται) στο αρνητικό ηλεκτρόδιο του ψευδαργύρου, έτσι ώστε ο αριθμός των ηλεκτρονίων στο αρνητικό ηλεκτρόδιο να παραμένει σταθερός. Έτσι κατά τη λειτουργία του στοιχείου η ΗΕΔ προκαλεί:

α) Έξω από την πηγή συνεχή μετακίνηση ηλεκτρονίων από τον αρνητικό πόλο στο θετικό.

.ιβ) Μέσα στην πηγή διπλή μετακίνηση ιόντων.

Στο στοιχείο που περιγράψαμε παραπάνω, ένα μέρος από το παραγόμενο υδρογόνο (το μεγαλύτερο μέρος διαφεύγει με μορφή φυσαλίδων) περιβάλλει την κάθιδο και σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα. Ο χαλκός τώρα, που περιβάλλεται από το μονωτικό στρώμα του υδρογόνου, δεν έρχεται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα:

α) Αισθητή αύξηση της αντιστάσεως στην επιφάνεια επαφής μεταξύ ηλεκτροδίων και ηλεκτρολύτη, δηλαδή αύξηση της εσωτερικής αντιστάσεως του στοιχείου και επομένως αύξηση της πτώσεως τάσεως στην εσωτερική αντίσταση του στοιχείου.

β) Το υδρογόνο σε συνδυασμό με το θετικό ηλεκτρόδιο του χαλκού δημιουργεί ΗΕΔ, που έχει αντίθετη πολικότητα από την ΗΕΔ του στοιχείου (αντιηλεκτρεγερτική δύναμη).

Και τα δυο αυτά αποτελέσματα συνεργάζονται για τη μείωση του ρεύματος στο κύκλωμα που πραγματικά ύστερα από λίγο χρόνο γίνεται ασήμαντο. Ανάλογα φαινόμενα συμβαίνουν σε όλους σχεδόν τους τύπους ηλεκτρικών στοιχείων.

Το φαινόμενο που έχει σαν αποτέλεσμα τη ριζική αλλοίωση των επιφανειών επαφής των ηλεκτροδίων με τον ηλεκτρολύτη ονομάζεται πόλωση.

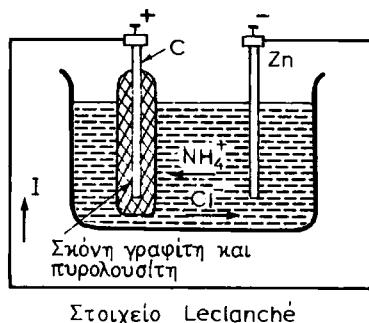
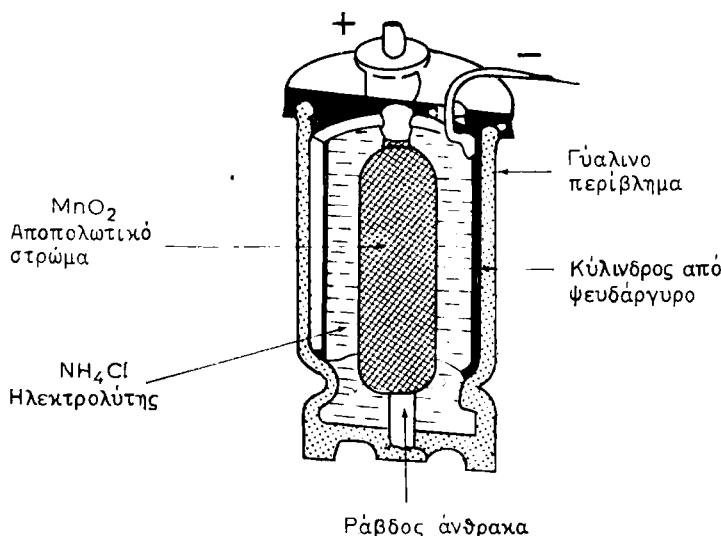
Για να είναι δυνατή η συνεχής λειτουργία του στοιχείου χρησιμοποιούμε **αντιπολωτικές διατάξεις**.

3) Διάφοροι τύποι πρωτογενών ηλεκτρικών στοιχείων.

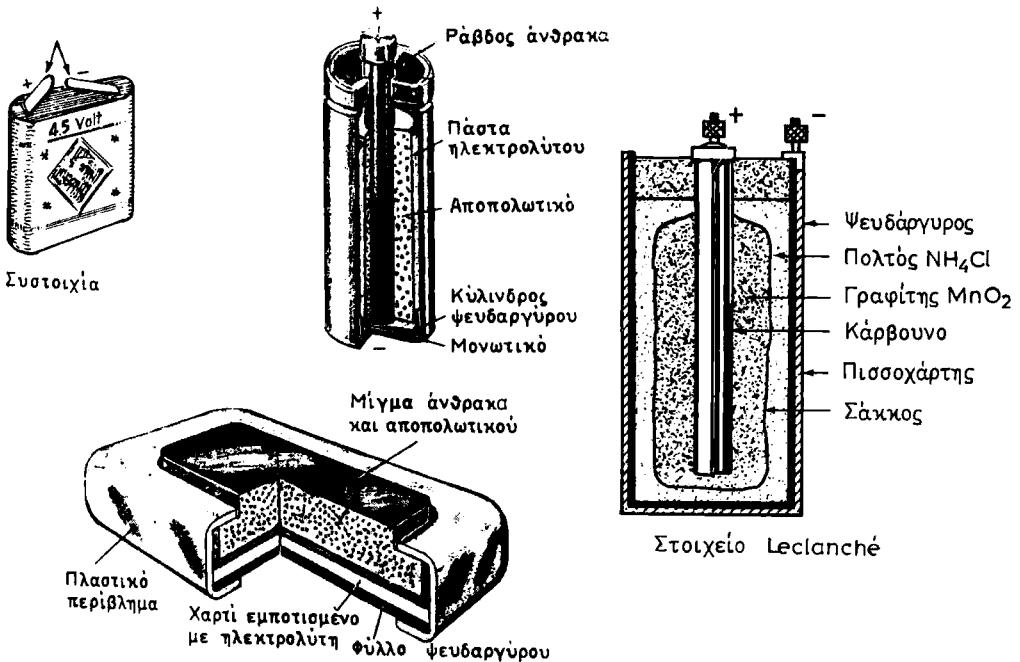
Τα περισσότερο διαδεδομένα ηλεκτρικά στοιχεία είναι το στοιχείο ψευδαργύρου-άνθρακα, διοξειδίου του μαγγανίου σε αλκαλικό περιβάλλον, οξειδίου του υδραργύρου και οξειδίου του αργύρου. Όλα αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται ανόδους από ψευδάργυρο (Zn), αλλά διαφορετικούς ηλεκτρολύτες και καθόδους. Αυτά τα τέσσερα συστήματα πρωτογενών ηλεκτρικών στοιχείων χρησιμοποιούνται για την παροχή ενέργειας στο 90% των φορητών συσκευών που κατασκευάζονται σήμερα.

Τα περισσότερα ηλεκτρικά στοιχεία περιέχουν υγρούς ηλεκτρολύτες. Εν τούτοις όμως, όταν το υγρό του ηλεκτρολύτη απορροφηθεί και μετατραπεί σε

παχύρρευστη μάζα, τότε στην ουσία προκύπτει ένα «ξηρό» ηλεκτρικό στοιχείο. Τα «ξηρά» στοιχεία περιέχουν μια μετρημένη ποσότητα νερού (εκτός από τα συστήματα λιθίου που περιέχουν μη υδατικά διαλυτικά υγρά). Η υγρασία στα στοιχεία αυτά εξαφανίζεται όταν αποθηκεύονται για μακρύ χρονικό διάστημα, οπότε και η ικανότητά τους μειώνεται. Τα «ξηρά» στοιχεία επίσης περιέχουν ενεργά συστατικά σ' επαφή, τα οποία σε περιορισμένη έκταση προκαλούν χημικές αντιδράσεις όταν τα στοιχεία αποθηκεύονται επί μακρύ χρονικό διάστημα. Οι αντιδράσεις αυτές προκαλούν μόνιμη απώλεια ενέργειας, οπότε τελικά τα στοιχεία καθίστανται άχρηστα. Στα σχήματα 3α και 3β φαίνονται διάφορα είδη υγρών και ξηρών στοιχείων αντίστοιχα.



Σχ. 3α.
Υγρά στοιχεία.



Σχ. 38.
Ξηρά στοιχεία.

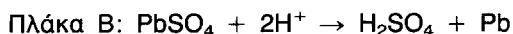
4) Δευτερογενή στοιχεία (συσσωρευτές) – Λειτουργία συσσωρευτών μολύβδου.

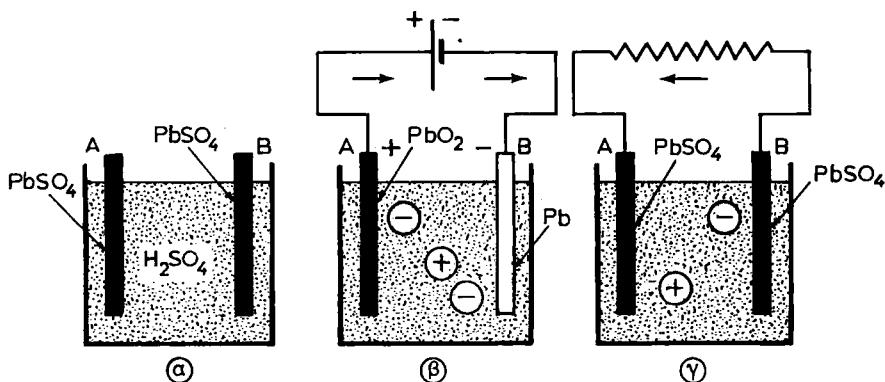
Ο συσσωρευτής αποτελείται από δυο όμοια ηλεκτρόδια (άρα δεν μπορεί να λειτουργήσει σαν ηλεκτρική πηγή) που είναι βυθισμένα μέσα σε ηλεκτρολυτικό διάλυμα. Αν ενώσουμε τα ηλεκτρόδια με τους πόλους μιας ηλεκτρικής πηγής (φόρτιση), τότε προκαλείται πόλωση των ηλεκτροδίων (δηλαδή μεταβάλλεται ριζικά η υφή της επιφάνειάς τους) και τα δυο ηλεκτρόδια γίνονται ανόμοια. Τώρα ο συσσωρευτής μπορεί να λειτουργήσει σαν ηλεκτρική πηγή (εκφόρτιση).

Ο συσσωρευτής δηλαδή είναι συσκευή που όταν είναι φορτισμένος λειτουργεί σαν ηλεκτρική πηγή, όταν όμως είναι αφόρτιστος δεν μπορεί να λειτουργήσει σαν ηλεκτρική πηγή εκτός εάν πολωθεί οπότε μετατρέπεται σε φορτισμένο συσσωρευτή.

Οι συσσωρευτές μολύβδου έχουν σαν ηλεκτρολύτη διάλυμα H_2SO_4 και σαν ηλεκτρόδια πλάκες μολύβδου. Οι πλάκες μόλις βυθισθούν μέσα στο H_2SO_4 καλύπτονται από στρώμα $PbSO_4$.

Εάν συνδέσουμε τα ηλεκτρόδια αφόρτιστου συσσωρευτή με εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος (φόρτιση) [σχ. 4a(θ)], τότε τα θετικά ιόντα υδρογόνου H^+ έρχονται στην κάθοδο B και τα αρνητικά SO_4^{2-} έρχονται στην άνοδο A:





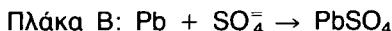
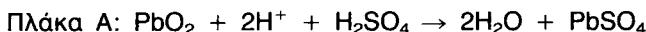
Σχ. 4α.

Στοιχείο συσσωρευτή μολύβδου.

α) Αφόρτιστο. β) Κατά τη φόρτιση. γ) Κατά την εκφόρτιση.

Παρατηρούμε ότι με τη φόρτιση του συσσωρευτή οι επιφάνειες των ηλεκτροδίων A και B μετατρέπονται αντίστοιχα σε PbO_2 και Pb . Ο συσσωρευτής μπορεί τώρα να λειτουργήσει σαν πηγή που έχει ΗΕΔ περίπου 2 V.

Αν απομακρύνουμε λοιπόν την πηγή και στη θέση της θάλομε μια αντίσταση [σχ. 4α(γ)], αυτή θα διαρρέεται από ρεύμα και οι αντιδράσεις στα δύο ηλεκτρόδια θα είναι:

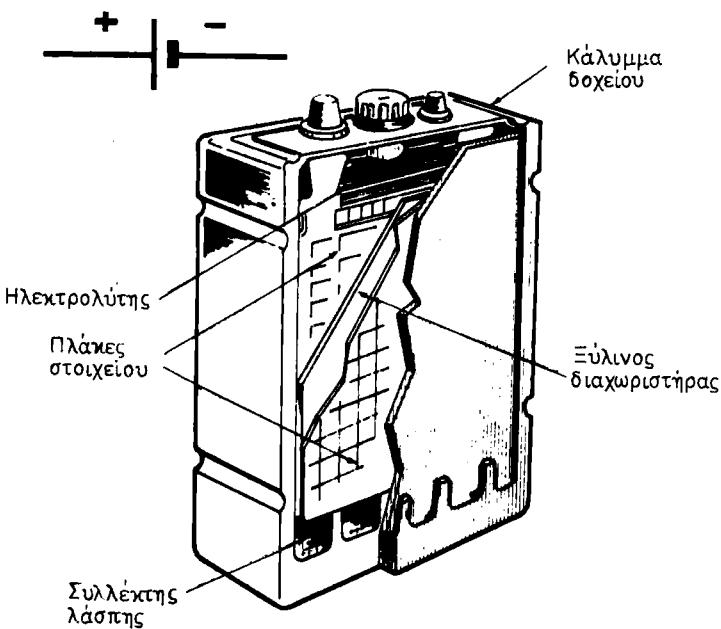


Παρατηρούμε δηλαδή ότι μετά από την εκφόρτιση τα ηλεκτρόδια επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση και ο συσσωρευτής για να λειτουργήσει πάλι σαν πηγή χρειάζεται να τον ξαναφορτίσουμε.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι κατά τη φόρτιση δημιουργείται H_2SO_4 που κάνει τον ηλεκτρολύτη **πυκνότερο** και κατά την εκφόρτιση παράγεται H_2O που κάνει τον ηλεκτρολύτη **αραιότερο**.

Αν παρακολουθήσουμε διαδοχικές φορτίσεις και εκφορτίσεις, θα παρατηρήσουμε ότι σε κάθε νέα φόρτιση σχηματίζονται περισσότερα στρώματα (σπογγώδους) μολύβδου και PbO_2 στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Όπως όμως γνωρίζομε από τα ηλεκτρικά στοιχεία η χωρητικότητά τους είναι ανάλογη των διαστάσεων των ηλεκτροδίων. Όσο λοιπόν αυξάνονται αυτά τα στρώματα που ονομάζονται και **ενεργά** στρώματα, τόσο μεγαλώνει η χωρητικότητα του συσσωρευτή.

Στο σχήμα 4b φαίνεται το στοιχείο ενός βιομηχανικού συσσωρευτή μολύβδου. Οι πλάκες των βιομηχανικών συσσωρευτών κατασκευάζονται από αντιμονιούχο μόλυβδο για να έχουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή και έχουν σχήμα δικτυωτού (σχάρας). Μέσα στα διάκενα των πλακών τοποθετούνται με πίεση τα ενεργά υλικά (σε μορφή πάστας) που έχουν πολλούς πόρους, για να είναι εύκολη η δίοδος των ιόντων του ηλεκτρολύτη και η δημιουργία μέσα σε λίγο χρόνο παχέων ενεργών στρωμάτων.



Σχ. 46.
Στοιχείο συσσωρευτή μολύβδου.

Τα ενεργά υλικά για τις θετικές πλάκες είναι **μίνιο** (Pb_3O_4) και για τις αρνητικές **λιθάργυρος** (PbO). Αμέσως με τις πρώτες φορτοεκφορτίσεις σχηματίζονται τα ενεργά στρώματα. Οι θετικές πλάκες παίρνουν θαθυκάστανο χρώμα (PbO_2), οι αρνητικές γκρίζο (Pb) και ο συσσωρευτής είναι έτοιμος για λειτουργία.

Για τη συγκρότηση συσσωρευτών μεγάλης χωρητικότητας χρησιμοποιούνται πολλές θετικές και αρνητικές πλάκες. Οι πλάκες τοποθετούνται σε δοχείο (αρνητική - θετική - αρνητική κ.λ.π.) και χωρίζονται με μονωτικούς διαχωριστήρες (ξύλο, νάϋλον, καουτσούκ) για να μην έλθουν σε επαφή και προκληθεί βραχυκύκλωση του στοιχείου.

'Όλες οι θετικές πλάκες συνδέονται σ' ένα βραχίονα που καταλήγει σε κεφαλή. Το ίδιο συμβαίνει και με τις αρνητικές. Με τη βοήθεια των κεφαλών οι πλάκες στερεώνονται στο μονωτικό κάλυμμα του δοχείου και τοποθετούνται μέσα στο δοχείο, ενώ οι κεφαλές χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και σαν ακροδέκτες (πόλοι) του στοιχείου. Οι αρνητικές πλάκες είναι κατά μία περισσότερες από τις θετικές. Αυτό είναι απαραίτητο για να εργάζονται και οι δυο επιφάνειες των θετικών πλακών και να μην κάμπτονται κατά τη φόρτιση, όπου παρατηρείται διόγκωση των ενεργών υλικών, από τη μετατροπή τους σε PbO_2 .

Το δοχείο κατασκευάζεται από μονωτικό υλικό που δεν προσβάλλεται από το H_2SO_4 (συνθετικό υλικό, γυαλί κ.λ.π.).

Το πάνω μέρος του δοχείου καλύπτεται με πλάκα από πίσσα.

Στο κέντρο της υπάρχει οπή με πώμα που μπορεί να ανοίγεται για

επιθεώρηση του διαλύματος. Το πώμα έχει κι αυτό μία μικρή οπή για την έξοδο των σχηματιζομένων αερίων.

Ο ηλεκτρολύτης παρασκευάζεται από H_2SO_4 που αραιώνεται σε απεσταγμένο νερό. Το H_2SO_4 που χρησιμοποιείται έχει συνήθως ειδικό βάρος $1,84 \text{ gr/cm}^3$. Όταν αναμιχθεί με νερό αραιώνεται και το ειδικό του βάρος γίνεται $1,18 \text{ gr/cm}^3$. Η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη μετράται και σε βαθμούς Μπωμέ ($^{\circ}\text{Bé}$). Το απεσταγμένο νερό (ειδ. βάρος 1) αντιστοιχεί σε 0° Bé ενώ το H_2SO_4 (ειδικό βάρος 1,84) αντιστοιχεί σε 66° Bé .

Από το ειδικό βάρος υπολογίζομε την πυκνότητα σε $^{\circ}\text{Bé}$ με την εμπειρική σχέση:

$$^{\circ}\text{Bé} = 144,3 \left(1 - \frac{1}{\text{ειδ. βάρος}} \right)$$

Η πυκνότητα μετράται με ειδικά όργανα που ονομάζονται **πυκνόμετρα**. Αυτά αποτελούνται από μικρό γυάλινο σωλήνα βαθμολογημένο σε $^{\circ}\text{Bé}$.

5) Τεχνικά χαρακτηριστικά.

a) **Η ΗΕΔ του συσσωρευτή** εξαρτάται από το ειδικό βάρος του διαλύματος και υπολογίζεται πρακτικά με τη σχέση:

$$\text{ΗΕΔ} = 0,84 + \text{ειδ. βάρος}$$

Η ΗΕΔ π.χ. όταν το ειδικό βάρος του διαλύματος είναι 1,26 (πυκνότητα 30° Bé) θα είναι:

$$\text{ΗΕΔ} = 0,84 + 1,26 = 2,1 \text{ V}$$

Η ΗΕΔ παραμένει πρακτικά σταθερή στη διάρκεια της φορτίσεως - εκφορτίσεως του συσσωρευτή. Μόνο στην αρχή και στο τέλος της φορτίσεως (εκφορτίσεως) η ΗΕΔ μεταβάλλεται, επειδή μεταβάλλεται η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη.

b) **Η εσωτερική αντίσταση** του συσσωρευτή είναι σχετικά πολύ μικρή ($0,01 - 0,001 \Omega$) και εξαρτάται από τις διαστάσεις και τη θέση των πλακών.

γ) **Η χωρητικότητα του συσσωρευτή**, δηλαδή το συνολικό φορτίο που μπορεί να αποδώσει ο συσσωρευτής σε μία πλήρη κανονική εκφόρτισή του, εξαρτάται από τον αριθμό και τις διαστάσεις των πλακών. Μετράται σε Ah (1 Ah = 3600 Cb).

δ) **To κανονικό ρεύμα** φορτίσεως (ή εκφορτίσεως) καθορίζεται στο $1/10$ της χωρητικότητας του συσσωρευτή. Έτσι συσσωρευτής που έχει χωρητικότητα 100 Ah μπορεί να φορτίζεται με ρεύμα το πολύ 10 A . Μεγαλύτερο ρεύμα προκαλεί βλάβες.

ε) **Η πολική τάση** είναι η τάση που παρέχει ο συσσωρευτής όταν τροφοδοτεί φορτίο: $U = E - Ir = E$, γιατί η r είναι πολύ μικρή. Η πολική τάση είναι πρακτικά σταθερή (περίπου 2 V) και μόνο στο τέλος της εκφορτίσεως πέφτει στο $1,8 \text{ V}$.

στ) **Η απόδοση** του συσσωρευτή, δηλαδή ο λόγος της ηλεκτρικής ενέργειας που μας παρέχει ο συσσωρευτής σε μία πλήρη εκφόρτιση προς την ενέργεια που καταναλώσαμε για να τον φορτίσουμε, εξαρτάται από την κατασκευή του. Η

απόδοση των συσσωρευτών μολύθδου ανέρχεται σε 80% και των αλκαλικών σε 50%.

Η απόδοση πολλές φορές ορίζεται· και σαν το πηλίκο των αμπερώριών που παρέχει ο συσσωρευτής σε μία πλήρη εκφόρτισή του, προς τα αμπερώρια που δαπανήσαμε για τη φόρτισή του.

6) Φόρτιση και εκφόρτιση συσσωρευτών.

Ο συσσωρευτής όταν φορτίζεται λειτουργεί σαν αποδέκτης, γιατί μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια, που του παρέχει η πηγή, σε χημική ενέργεια. Άρα θα εμφανίζει ΑΗΕΔ Ε' και εσωτερική αντίσταση r' . Για να κυκλοφορήσει ρεύμα φορτίσεως κανονικής εντάσεως απαιτείται για κάθε στοιχείο τάση 2,3 μέχρι 2,5 V, ώστε να υπερνικηθεί η ΑΗΕΔ κάθε στοιχείου της συστοιχίας. (Για συστοιχία π.χ. 3 στοιχείων σε σειρά απαιτείται τάση 6,9 μέχρι 7,5 V).

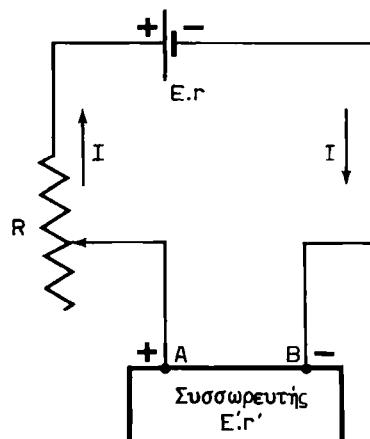
Ο θετικός πόλος της συστοιχίας θα συνδεθεί με το θετικό πόλο της πηγής και ο αρνητικός με τον αρνητικό πόλο της πηγής (σχ. 6a). Συνήθως όμως η διαθέσιμη τάση είναι πολύ μεγάλη (110 ή 220 V), γι' αυτό παρεμβάλλεται σε σειρά αντίσταση που προκαλεί πτώση τάσεως, ώστε να εφαρμόζεται στη συστοιχία η τάση που απαιτείται. Συνήθως η αντίσταση φορτίσεως είναι μεταβλητή και ονομάζεται **ροοστάτης φορτίσεως R**.

Σε μερικές περιπτώσεις η R μπορεί να αντικατασταθεί από λαμπτήρες φωτισμού που συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους ώστε να παρουσιάζουν τέτοια αντίσταση που να προκαλεί την πτώση τάσεως που απαιτείται.

Η φόρτιση γίνεται συνήθως με τη μέθοδο της **σταθερής τάσεως**.

Με τη μέθοδο αυτή υπολογίζομε την αντίσταση φορτίσεως, ώστε στη συστοιχία να εφαρμόζεται η τάση U_{AB} που απαιτείται για κάθε στοιχείο. (Στην πράξη ρυθμίζομε το ροοστάτη φορτίσεως).

Στη διάρκεια της φορτίσεως η ΑΗΕΔ Ε' του συσσωρευτή μεταβάλλεται όπως



Σχ. 6a.

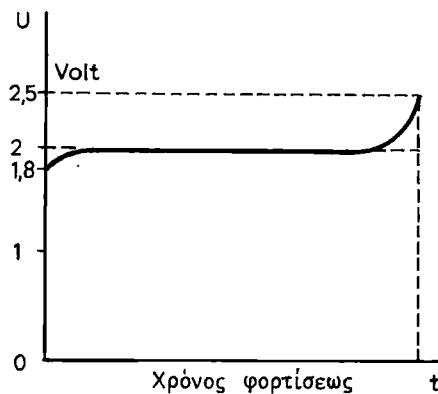
Κύκλωμα φορτίσεως συστοιχίας συσσωρευτή.

στο σχήμα 66, γιατί αυξάνεται η πυκνότητα του διαλύματος και στο τέλος της φορτίσεως φθάνει τα 2,7 V περίπου. Επειδή η τάση της πηγής παραμένει

σταθερή το ρεύμα: $I = \frac{E - E'}{R_p + r + r}$ έχει μειωθεί αρκετά στο τέλος της φορτίσεως.

Η τάση U_{AB} στους πόλους του συσσωρευτή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$U_{AB} = E' + Ir'$$



Σχ. 66.

Μεταβολή της τάσεως (ΑΗΕΔ) του συσσωρευτή κατά τη φόρτισή του.

(Η U_{AB} είναι περίπου ίση με την E' γιατί η r' είναι πολύ μικρή).

Κατά τη μέθοδο του **σταθερού ρεύματος** το ρεύμα μένει σταθερό σ' όλη τη διάρκεια της φορτίσεως (μικρότερο ή το πολύ ίσο με το 1/10 της χωρητικότητας).

Στην αρχή της φορτίσεως η ΑΗΕΔ E' είναι μικρή και η αντίσταση που παρεμβάλλεται με το ροοστάτη είναι μεγάλη ώστε να περιορίζεται το ρεύμα φορτίσεως στην κανονική τιμή.

Στη διάρκεια της φορτίσεως η ΑΗΕΔ της συστοιχίας αυξάνει, επομένως το ρεύμα ελαττώνεται, οπότε ελαττώνεται την τιμή της αντιστάσεως που παρεμβάλλεται με το ροοστάτη, ώστε το ρεύμα να διατηρεί σταθερή κανονική τιμή μέχρι το τέλος της φορτίσεως.

Όταν διαθέτομε εναλλασσόμενο ρεύμα χρησιμοποιούμε ανορθωτικά συστήματα που μετατρέπουν το εναλλασσόμενο σε συνεχές.

Οι ενδείξεις για το τέλος της φορτίσεως είναι:

a) **Η ΑΗΕΔ κάθε στοιχείου φθάνει τα 2,7 V.**

Μετά την αποσύνδεση του συσσωρευτή εμφανίζεται ΗΕΔ 2,2 V περίπου που σε λίγο σταθεροποιείται στα 2,1 V.

b) **Η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη ανέρχεται στους 27 έως 30° Bé.**

γ) Εμφανίζονται φυσαλίδες στην επιφάνεια του ηλεκτρολύτη (μίγμα αερίων υδρογόνου και οξυγόνου που παράγονται από την ηλεκτρόλυση του H_2SO_4).

δ) Οι θετικές πλάκες παίρνουν το κανονικό βαθυκάστανο χρώμα τους και οι αρνητικές γίνονται γκρίζες.

Όταν διαπιστώσουμε ότι συμπληρώθηκε η φόρτιση του συσσωρευτή, τότε πρέπει να τον αποσυνδέσουμε από το κύκλωμα φορτίσεως, γιατί η συνέχιση της φορτίσεως είναι επιζήμια για το συσσωρευτή.

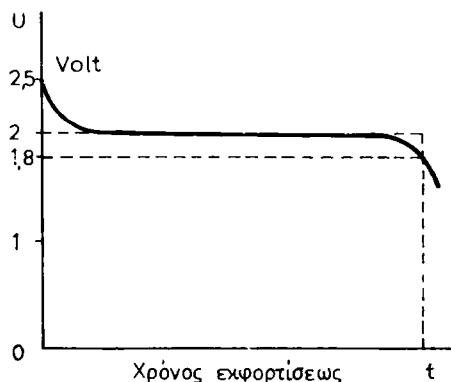
Οι ενδείξεις για το τέλος της εκφορτίσεως είναι:

α) Η τάση σε κάθε στοιχείο μειώνεται στα 1,8 V (σχ. 6γ).

β) Η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη πέφτει στους $18^\circ Be$.

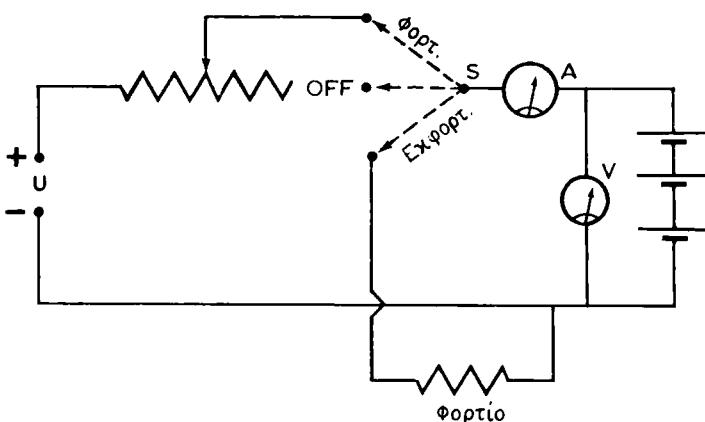
Τυπικό κύκλωμα φορτίσεως - εκφορτίσεως φαίνεται στο σχήμα 6δ.

Όταν ο διακόπτης (τριών θέσεων) S θρίσκεται στη θέση ΦΟΡΤ. η συστοιχία



Σχ. 6γ.

Μεταβολή της τάσεως του συσσωρευτή κατά την εκφόρτισή του.



Σχ. 6δ.

Τυπικό κύκλωμα φορτίσεως-εκφορτίσεως συστοιχίας.

συνδέεται στην πηγή και φορτίζεται. Στη θέση OFF έχουμε ανοικτό κύκλωμα ενώ στη θέση EKFOOPT. η συστοιχία παρέχει τάση στη συσκευή που προορίζεται να τροφοδοτεί και εκφορτίζεται.

Στη θέση FOPT. το αμπερόμετρο δείχνει την ένταση του ρεύματος φορτίσεως και το βολτόμετρο την τάση φορτίσεως.

Στη θέση EKFOOPT. το αμπερόμετρο δείχνει την ένταση του ρεύματος εκφορτίσεως και το βολτόμετρο την πολική τάση της συστοιχίας.

Τέλος στη θέση OFF το αμπερόμετρο δείχνει μηδέν, ενώ το βολτόμετρο δείχνει την ΗΕΔ της συστοιχίας.

7) Ασθένειες και βλάβες συσσωρευτών μολύθδου.

a) Πτώση ενεργών υλικών.

Οι ψηλές εντάσεις ρεύματος κατά τη φόρτιση, προκαλούν ηλεκτρόλυση του νερού που περιέχεται στον ηλεκτρολύτη και έκλυση αερίων. Οι φυσαλίδες των αερίων αυτών αποσπούν κομμάτια των ενεργών υλικών, που βρίσκονται μέσα στις σχάρες των πλακών, τα οποία πέφτουν στον πυθμένα του δοχείου και δεν παίρνουν πλέον μέρος στις χημικές αντιδράσεις του στοιχείου.

β) Διάθρωση των σχαρών και των ενεργών υλικών των πλακών.

Αυτή οφείλεται στην παρουσία ξένων οξέων μέσα στον ηλεκτρολύτη τα οποία προσβάλλουν το μόλυβδο.

γ) Αυτόματη εκφόρτιση.

Οι συσσωρευτές λόγω της κατασκευής τους και όταν ακόμα δεν παρέχουν ρεύμα, όταν δηλαδή το εξωτερικό τους κύκλωμα είναι ανοικτό, εκφορτίζονται με αργό ρυθμό και χάνουν μέχρι 1% της χωρητικότητάς τους κάθε μέρα. Το φαινόμενο λέγεται αυτοεκφόρτιση και είναι τόσο εντονότερο, όσο ψηλότερη είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος που βρίσκεται ο συσσωρευτής και όσο λιγότερο καθαρός είναι ο ηλεκτρολύτης. Λόγω του φαινομένου αυτού, οι συσσωρευτές δεν πρέπει να μένουν αχρησιμοποίητοι περισσότερο από 20 μέρες, γιατί αν ο συσσωρευτής εκφορτισθεί πέρα από ορισμένο όριο, καταστρέφεται.

δ) Θειίκωση.

Είναι η σοθαρότερη απ' όλες τις ασθένειες των συσσωρευτών μολύθδου. Όταν ο συσσωρευτής αμέσως μετά την εκφόρτιση τεθεί σε φόρτιση, τα στρώματα του $PbSO_4$ που έχουν καλύψει τις πλάκες κατά την εκφόρτιση μετατρέπονται σε στρώματα Pb και PbO_2 . Όταν όμως ο συσσωρευτής παραμείνει για μεγάλο χρονικό διάστημα αφόρτιστος, τότε ο $PbSO_4$ κρυσταλλώνεται και δεν μπορεί με τη φόρτιση να διαλυθεί, γιατί ο κρυσταλλωμένος $PbSO_4$ έχει πολύ λίγους πόρους.

Όταν επίσης το ρεύμα εκφορτίσεως είναι μεγαλύτερο από το κανονικό, τότε η ποσότητα του $PbSO_4$ που σχηματίζεται είναι μεγάλη, κλείνει τους πόρους των ενεργών υλικών και δεν απορροφάται, οπότε κρυσταλλώνεται και δεν διαλύεται στη φόρτιση:

Κρυστάλλωση του $PbSO_4$ παρατηρείται και όταν ο ηλεκτρολύτης είναι πολύ πυκνός. Η βλάβη αυτή ονομάζεται **θειίκωση των πλακών**.

Τα συμπτώματα ενός θειικωμένου στοιχείου είναι:

- Η ελάττωση της χωρητικότητας του συσσωρευτή (γιατί ένα μέρος από την επιφάνεια των πλακών καλύπτεται από τα αδιάλυτα στρώματα του $PbSO_4$, και έτσι ελαττώνεται η ενεργός επιφάνεια των πλακών).
- Κατά τη φόρτιση η τάση του θειικωμένου στοιχείου είναι ψηλή και κατά την εκφόρτιση χαμηλή, λόγω αυξήσεως της εσωτερικής του αντιστάσεως από την παρουσία του κρυσταλλωμένου $PbSO_4$.
- Για το λόγο αυτό στο θειικωμένο στοιχείο παρατηρείται θέρμανση και κατά τη φόρτιση, και κατά την εκφόρτιση.
- Στο τέλος της φορτίσεως το θειικωμένο στοιχείο παρουσιάζει χαμηλή πυκνότητα, γιατί, αφού ο $PbSO_4$ δεν διαλύεται, δεν παράγεται από τις αντιδράσεις που συμβαίνουν στη φόρτιση αρκετή ποσότητα H_2SO_4 .
- Εάν η θειίκωση είναι προχωρημένη, οι πλάκες έχουν χρώμα λευκό.
- Η επιφάνεια των πλακών είναι σκληρή και δεν διαπερνάται εύκολα με καρφί.

Θειίκωση προκαλείται στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Όταν η εκφόρτιση παρατείνεται πέρα απ' το επιτρεπόμενο όριο.
- Όταν μετά από πλήρη εκφόρτιση δεν γίνεται αμέσως φόρτιση.
- Όταν οι συσσωρευτές αφήνονται αφόρτιστοι επί πολύ χρόνου.
- Όταν γίνονται πολλές κατά σειρά ατελείς φορτίσεις.
- Όταν οι πλάκες εκτίθενται στον ατμοσφαιρικό αέρα (όταν δηλαδή δεν καλύπτονται πλήρως απ' τον ηλεκτρολύτη).

Τη θειίκωση υποβοθιθούν:

- Οι ψηλές πυκνότητες του ηλεκτρολύτη.
- Οι ακαθαρσίες μέσα στον ηλεκτρολύτη.
- Οι μεταβολές της θερμοκρασίας.

Η θειίκωση μπορεί να θεραπευθεί (όταν δεν έχει προχωρήσει πολύ) με συνεχείς φορτοεκφορτώσεις με μικρό ρεύμα (2/10 του κανονικού).

Το μικρό ρεύμα παρέχει το χρόνο στα ιόντα του ηλεκτρολύτη να περάσουν μέσα από τους λίγους πόρους του $PbSO_4$ και να τον διαλύσουν.

Σε ορισμένες περιπτώσεις πολύ προχωρημένης θειικώσεως, η συστοιχία υποβάλλεται στην εξής θεραπεία, που ονομάζεται λουτρό ύδρογόνου.

Ο ηλεκτρολύτης αντικαθίσταται με απεσταγμένο νερό και εν συνεχεία φορτίζονται τα στοιχεία υπό χαμηλή ένταση ρεύματος, μέχρις ότου παρατηρηθεί σταθερή πυκνότητα του ηλεκτρολύτη επί 7 ως 8 ώρες. Εάν η πυκνότητα ανέβει πάνω από 15° Μπωμέ, καλό είναι να αντικατασταθεί πάλι ο ηλεκτρολύτης με απεσταγμένο νερό και να επαναληφθεί η φόρτιση.

Φόρτιση κατά την οποία παρέχονται αμπερώρια διπλάσια της μέγιστης χωρητικότητας της συστοιχίας, αρκεί για την αποθειίκωσή της. Αφού τελειώσει το λουτρό ύδρογόνου, γίνεται ρύθμιση της πυκνότητας.

Καμιά φορά αντί για απεσταγμένο νερό, χρησιμοποιείται για το λουτρό ύδρογόνου ηλεκτρολύτης πυκνότητας 5° ως 10° Μπωμέ.

Η θεραπεία για τη θειίκωση είναι πολύ αποτελεσματική, όταν η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη είναι ψηλή, δηλαδή γύρω στους $40^\circ C$.

ε) Εσωτερικά βραχυκυκλώματα.

Συμπτώματα εσωτερικά βραχυκυκλωμένου στοιχείου είναι:

- Χαμηλή τάση, ιδίως στο τέλος της φορτίσεως, γιατί η εσωτερική αντίσταση είναι ελαττωμένη.
- Χαμηλή πυκνότητα στο τέλος της φορτίσεως.
- Ψηλή θερμοκρασία κατά τη φόρτιση, εκφόρτιση ή άεργο κατάσταση του συσσωρευτή.
- Στο τέλος της φορτίσεως το στοιχείο ή δεν έχει αναθράσει ή αργεί να αναθράσει, ενώ η φόρτιση συνεχίζεται.

Αίτια των εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων είναι:

- Είσοδος ξένου σώματος, μεταλλικού ή μη, κυρίως όταν αυτό καλύπτεται ταυτόχρονα από πολτό ενεργών υλικών που έχουν πέσει από τις σχάρες των πλακών μέσα στον ηλεκτρολύτη. Αυτά συσσωρεύονται στον πυθμένα του δοχείου και με την πάροδο του χρόνου έρχονται σε επαφή με τα κάτω άκρα των πλακών και τις βραχυκυκλώμουν.
 - Απ' ευθείας επαφή μεταξύ δυο διαδοχικών πλακών λόγω σκεβρώσεως και καταστροφής των μεταξύ τους διαχωριστήρων.
 - Ένωση μεταξύ δυο διαδοχικών πλακών, λόγω κάποιου κομματιού ενεργών υλικών που έχει σφηνωθεί μεταξύ τους.
 - Ανωμαλίες πάνω στην επιφάνεια των πλακών που δεν αφαιρέθηκαν κατά την αρχική τους επίχριση με ενεργά υλικά.
 - Χωριστήρες ξύλινοι κακής ποιότητας που παρουσιάζουν ρωγμές.
- Θεραπεία για τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα μπορεί να γίνει ως εξής:
- Αν ανακαλυφθεί ξένο σώμα, να αφαιρεθεί και να φορτισθεί το στοιχείο υπό χαμηλή ένταση ρεύματος.
 - Να αφαιρεθούν όλα τα κατάλοιπα από τον πυθμένα του δοχείου.

στ) Εξωτερικό βραχυκύκλωμα.

Αυτό μπορεί να συμβεί αν οι ακροδέκτες του συσσωρευτή έλθουν σε επαφή, με τη βοήθεια μεταλλικού αντικειμένου, ή από τυχαίο βραχυκύκλωμα στο εξωτερικό κύκλωμα. (Στην περίπτωση αυτή μπορεί να προκληθεί και εσωτερικό βραχυκύκλωμα επειδή θα κυκλοφορήσει ρεύμα υπερβολικής εντάσεως). Γι' αυτό τα κυκλώματα των συσσωρευτών πρέπει πάντοτε να προστατεύονται από καλά υπολογισμένες ασφάλειες.

ζ) Αποκεφαλισμός των πλακών.

Επειδή, με την πάροδο του χρόνου, εξατμίζεται το νερό του ηλεκτρολύτη, η στάθμη του διαλύματος θα κατέρχεται, με αποτέλεσμα ένα τμήμα των κεφαλών των πλακών να έρχεται σε επαφή με τον αέρα και να οξειδώνεται. Η οξειδώση μπορεί να προχωρήσει πολύ και να αποκόψει τις κεφαλές, οπότε παύουν να είναι σε επαφή με τους ακροδέκτες.

Για να αποφύγουμε τον αποκεφαλισμό των πλακών, πρέπει να παρακολουθούμε τη στάθμη του ηλεκτρολύτη (πρέπει να θρίσκεται τουλάχιστον 1 cm πάνω από τις κορυφές των διαχωριστήρων) και να συμπληρώνομε, αν έχει κατέθει, με απεσταγμένο νερό.

8) Συντήρηση των συσσωρευτών μολύβδου.

a) Όταν οι συσσωρευτές είναι σε λειτουργία.

- 1) Φορτίζετε και εκφορτίζετε με το κανονικό ρεύμα.
- 2) Μην εκφορτίζετε ποτέ κάτω από την τάση των 1,8 V.
- 3) Μην αφήνετε αφόρτιστο το συσσωρευτή.

Οι άρεργες συστοιχίες πρέπει να φορτίζονται κάθε δεκαπενθήμερο υπό χαμηλή ένταση ρεύματος. Συστοιχίες που υφίστανται ελαφρές εκφορτίσεις, πρέπει να φορτίζονται αμέσως μόλις θα έχουν ξοδέψει το 1/3 της συνολικής τους χωρητικότητας. Πάντως τα διαλείμματα μεταξύ δυο διαδοχικών φορτίσεων δεν πρέπει να υπερβαίνουν το δεκαπενθήμερο.

- 4) Μην αφήνετε φορτισμένους τους συσσωρευτές για πολύ χρόνο.
- 5) Το εισαγόμενο στα στοιχεία νερό πρέπει να είναι απεσταγμένο ή βρόχινο.

Η στάθμη του ηλεκτρολύτη πρέπει να είναι τουλάχιστον 5 πμ πάνω από τους ξύλινους χωριστήρες των πλακών. Τη συμπλήρωση στάθμης του ηλεκτρολύτη πρέπει να ακολουθεί φόρτιση το ταχύτερο δυνατό, για να γίνεται τέλεια ανάμιξη νερού και ηλεκτρολύτη. Απαγορεύεται η προσθήκη οξέος στα στοιχεία, εκτός εάν έχει εξακριβωθεί ότι προηγήθηκε απώλεια ηλεκτρολύτη. Στην περίπτωση αυτή προστίθεται αμέσως ο ηλεκτρολύτης της ίδιας ακριβώς πυκνότητας με τον υπάρχοντα ηλεκτρολύτη του στοιχείου. Μετά την προσθήκη πρέπει να γίνεται φόρτιση και στο τέλος μέτρηση της πυκνότητας.

6) Όταν παρασκευάζετε ηλεκτρολύτη ρίχνετε θειικό οξύ σε νερό και ποτέ νερό σε θειικό οξύ. (Το H_2SO_4 είναι πολύ υδρόφιλο).

7) Απαγορεύεται αυστηρά για λόγους ασφάλειας η έναρξη φορτίσεως, πριν εξακριβωθεί ότι ο αερισμός του διαμερίσματος φορτίσεως συσσωρευτών είναι ικανοποιητικός. Επίσης στο διαμέρισμα φορτίσεως απαγορεύεται το κάπνισμα.

8) Γενικά οι συσσωρευτές μολύβδου εκλύουν υδρογόνο και οξυγόνο σε ανοικτό κύκλωμα και κατά την εκφόρτιση.

Η ποσότητα των εκλυομένων αερίων εξαρτάται:

- Από την ηλικία της συστοιχίας.
- Από το χρόνο που πέρασε από την τελευταία φόρτισή της.
- Από τη θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη.

Μίγμα υδρογόνου και οξυγόνου ή αέρα περιέχον 7% και άνω υδρογόνο, όταν αναφλεγεί από σπινθήρα ή φλόγα, εκρήγνυται επικίνδυνα.

9) Σε καμιά περίπτωση δεν επιτρέπεται η φόρτιση υπό θερμοκρασία πάνω από 45° C.

10) Το ότι η διαδικασία της φορτίσεως τέλειωσε, το δείχνουν τα εξής φαινόμενα:

- Στις πλάκες παρατηρείται άφθονη και συνεχής παραγωγή αερίων, η οποία δημιουργεί αναθρασμό του ηλεκτρολύτη.
- Εάν συνεχισθεί ακόμα η φόρτιση, η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη σταματάει ν' ανεβαίνει.
- Η τάση στους ακροδέκτες των στοιχείων, η οποία προς το τέλος της φορτίσεως υψώνεται γρήγορα και συνέχεια, σταθεροποιείται και παραμένει αμετάβλητη, ανεξάρτητα αν συνεχίζεται η φόρτιση.

11) Χρησιμοποιείτε πάντοτε προστατευτικές ασφάλειες (καλά υπολογισμέ-

νες) στα κυκλώματα των συσσωρευτών.

12) Στο κύκλωμα φορτίσεως πρέπει να υπάρχει αυτόματος διακόπτης που να αποσυνδέει το συσσωρευτή από την πηγή, όταν αυτή παύει να λειτουργεί, για να μην εκφορτίζεται ο συσσωρευτής μέσα από την αντίσταση της πηγής.

8) Όταν οι συσσωρευτές είναι σε ανάπauση.

1) Μην αφήνετε τους συσσωρευτές φορτισμένους για πολύ χρόνο χωρίς συμπληρωματικές φορτίσεις.

2) Όταν πρόκειται να μείνουν αχρησιμοποίητοι οι συσσωρευτές για πολύ χρόνο (πάνω από μήνα) τότε:

α) Εκφορτίζουμε τους συσσωρευτές.

β) Αντικαθιστούμε τον ηλεκτρολύτη με απεσταγμένο νερό.

γ) Αφήνουμε τις πλάκες στο νερό για 24 ώρες.

δ) Χύνουμε το νερό και αποξηραίνουμε τις πλάκες.

ε) Αποθηκεύουμε τους συσσωρευτές σε ξηρό χώρο.

9) Αλκαλικοί συσσωρευτές.

Στο σχήμα 9 φαίνεται ένας αλκαλικός συσσωρευτής. Αλκαλικοί συσσωρευτές υπάρχουν πολλών ειδών.

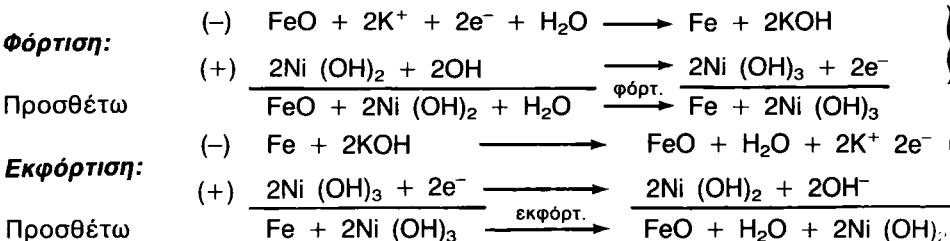
α) Συσσωρευτές σιδηρονικελίου (Edison).

Ο σκελετός των πλακών καθώς και τα δοχεία των συσσωρευτών κατασκευάζονται από επινικελωμένο χάλυβα. Σαν ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται διάλυμα 21% καυστικού καλλίου (ΚΟΗ) που έχει πυκνότητα 24° Βέ (ειδ. βάρος 1,2 gr/cm³). Στο διάλυμα περιέχεται και μικρή ποσότητα υδροξειδίου του λιθίου.

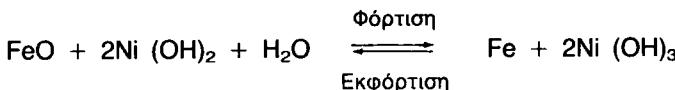
Η άνοδος (θετικές πλάκες) αποτελείται από υδροξειδίο του νικελίου $\text{Ni}(\text{OH})_2$ που τοποθετείται μέσα σε λεπτούς διάτρητους σωλήνες από σιδηρονικέλιο, και η κάθοδος (αρνητικές πλάκες) από μίγμα σιδήρου και οξειδίου του υδραργύρου.

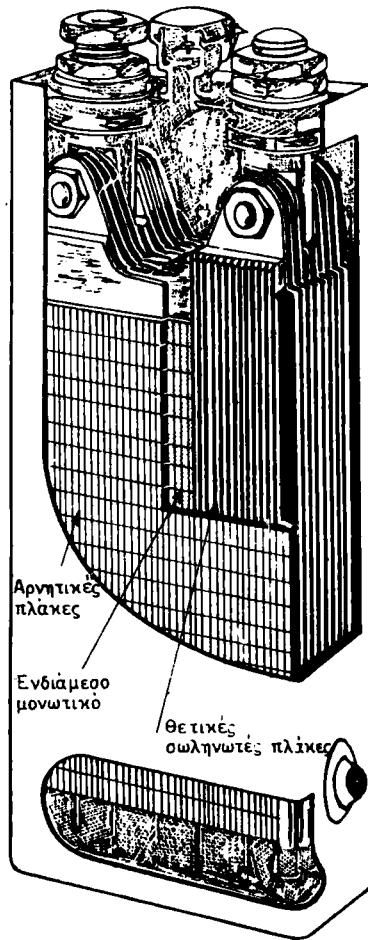
Μεταξύ των θετικών και αρνητικών πλακών τοποθετούνται διαχωριστήρες από σκληρό καουτσούκ. Επίσης μεταξύ των πλακών και των τοιχωμάτων του δοχείου τοποθετούνται στηρίγματα από καουτσούκ.

Οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν είναι οι ακόλουθες:



Δηλαδή οι χημικές αντιδράσεις μπορούν να περιγραφούν από την ακόλουθη αμφίδρομη εξίσωση:





Σχ. 9.
Αλκαλικός συσσωρευτής.

Παρατηρούμε ότι ο ηλεκτρολύτης δεν λαμβάνει τελικά μέρος στην αντίδραση με αποτέλεσμα η **πυκνότητά του να διατηρείται σταθερή**.

Η ΗΕΔ του συσσωρευτή είναι σε πλήρη φόρτιση 1,4 V.

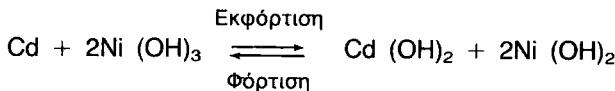
Η πολική τάση (κατά την εκφόρτιση) είναι 1,2 V αλλά στο τέλος της εκφορτίσεως εμφανίζει σοβαρή πτώση (1 έως 0,8 V).

Η ΗΕΔ του συσσωρευτή στο τέλος της φορτίσεως φθάνει τα 1,7 V (για κάθε στοιχείο και με το συσσωρευτή στο κύκλωμα φορτίσεως). Αυτή είναι και η μοναδική ένδειξη του τέλους φορτίσεως των αλκαλικών συσσωρευτών.

8) Συσσωρευτές καδμιονικελίου.

Η διαφορά τους από τους συσσωρευτές Edison είναι ότι οι αρνητικές πλάκες περιέχουν μίγμα οξειδίου του καδμίου και οξειδίου του σιδήρου σαν ενεργό ύλη.

Οι χημικές αντιδράσεις περιγράφονται συνοπτικά από την αμφίδρομη εξίσωση:



γ) Συσσωρευτές λιθίου.

Οι συσσωρευτές λιθίου είναι οι σημαντικότεροι απ' τους αλκαλικούς συσσωρευτές. Σημαντικές ιδιότητες που καθιστούν πλεονεκτική τη χρήση λιθίου σε ανόδους αλκαλικών συσσωρευτών, είναι:

- 1) Η μεγαλύτερη τάση ηλεκτροδίου – 3045 V.
- 2) Η μεγαλύτερη ειδική χωρητικότητα.
- 3) Το λίθιο είναι το σκληρότερο από τα αλκαλικά μέταλλα.
- 4) Το λίθιο έχει το ψηλότερο σημείο τήξεως απ' όλα τ' αλκαλικά μέταλλα.

Βέβαια, χρήση διαφορετικών καθόδων δίνει διαφορετικές τάσεις ανοικτού κυκλώματος, αλλά ακόμη και η μικρότερη ΗΕΔ ενός στοιχείου λιθίου είναι μεγαλύτερη απ' οποιουδήποτε άλλου πρωτογενούς ηλεκτρικού στοιχείου.

Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί πώς οι συσσωρευτές λιθίου έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από άλλους αλκαλικούς συσσωρευτές και λειτουργούν πολύ καλά σε χαμηλές θερμοκρασίες επειδή ο ηλεκτρολύτης είναι μη υδατώδης και η αγωγιμότητά τους σε κρύες θερμοκρασίες είναι πολύ καλύτερη από την αγωγιμότητα άλλων συσσωρευτών.

Σε ορισμένες εφαρμογές, η διάρκεια ζωής των συστημάτων λιθίου είναι σημαντικό πλεονέκτημα. Τα αλκαλικά στοιχεία γενικά έχουν καλύτερη διάρκεια ζωής από άλλα πρωτογενή ηλεκτρικά στοιχεία, αλλά τα συστήματα λιθίου υπερτερούν κατά πολύ από οποιοδήποτε πρωτογενές ηλεκτρικό σύστημα.

Σήμερα κατασκευάζονται συσσωρευτές λιθίου με ανόδους από λίθιο, αλλά με διαφορετικούς ηλεκτρολύτες και καθόδους. Το σύστημα (Li)/SO₂ είναι το καλύτερο και το σχετικά φθηνότερο και είναι το πρώτο σύστημα λιθίου που παράγεται σε μεγάλες ποσότητες. Χρησιμοποιεί άνοδο λιθίου, και μια κάθοδο SO₂ σε μορφή αερίου που διαλύεται σε ακετονιτρίλιο το οποίο ανάγεται πάνω σε ηλεκτρόδιο από άνθρακα. Έχει τάση ανοικτού κυκλώματος 2,92 V και τυπική τάση 2,7 V υπό ονομαστικό φορτίο. Είναι ένα σύστημα σχετικά μεγάλης πιέσεως και τα στοιχεία του πρέπει να περιέχουν ασφαλιστικές βαλβίδες για περιπτώσεις υπερπιέσεων. Οι περιπτώσεις διαφυγής αερίων σε καλά κατασκευασμένους συσσωρευτές λιθίου είναι εξαιρετικά μικρή υπό κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πιέσεως. Αν όμως αυτό συμβεί σε κάποια συσκευή κατά τη χρήση της πρέπει κανείς να είναι προσεκτικός για τη διαφυγή SO₂ που μπορεί να εισπνέυσθεί και έχει αντίδραση διαβρωτική.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

α) Πλεονεκτήματα των αλκαλικών συσσωρευτών.

1) Έχουν μικρότερο βάρος και παρουσιάζουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή από τους συσσωρευτές μολύβδου (γιατί δοχείο και πλάκες κατασκευάζονται από χάλυβα).

- 2) Μπορούν να φορτισθούν ή εκφορτισθούν με ρεύματα μεγάλης εντάσεως, χωρίς κανένα κίνδυνο βλάβης.
- 3) Εκλύουν μικρή ποσότητα αερίων γι' αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ηλεκτροφωτισμό μεταλλείων.
- 4) Μπορούν να παραμείνουν φορτισμένοι ή αφόρτιστοι για πολύ χρόνο γιατί ο ηλεκτρολύτης δεν προσβάλλει τα ηλεκτρόδια.
- 5) Δεν απαιτούν επιμελημένη και δαπανηρή συντήρηση και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
- 6) Ο ηλεκτρολύτης τους δεν παρουσιάζει τους κινδύνους του οξέος.
- 7) Η πολύ μικρή εσωτερική αντίσταση δεν προκαλεί αισθητή πτώση τάσεως.

6) Μειονεκτήματα.

- 1) Παρουσιάζουν μικρή ΗΕΔ.
- 2) Έχουν μικρή απόδοση (50%).
- 3) Έχουν μεγάλο κόστος.

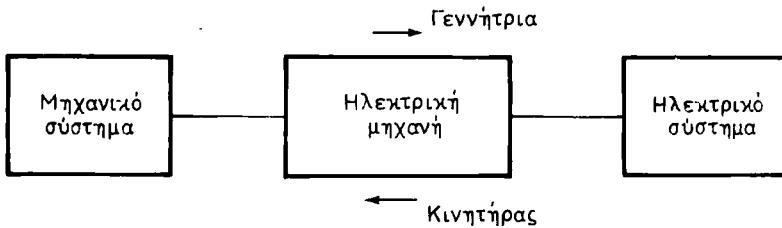
Για τους παραπάνω λόγους οι αλκαλικοί συσσωρευτές δεν χρησιμοποιούνται τόσο πολύ όσο οι συσσωρευτές μολύβδου.

**ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ**

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Είδη ηλεκτρικών μηχανών και κύρια χαρακτηριστικά αυτών.

Οι ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, ή αντίστροφα, της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική. Στην πρώτη περίπτωση, οι μηχανές ονομάζονται «γεννήτριες» ενώ στη δεύτερη «κινητήρες» (σχ. 1.1).



Σχ. 1.1.
Σχηματική παράσταση της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής.

Στην περίπτωση που η ηλεκτρική μηχανή είναι γεννήτρια, το «μηχανικό σύστημα» (σχ. 1.1), μπορεί να είναι μία οποιαδήποτε κινητήρια μηχανή, π.χ. ένας δηζελοκινητήρας, ενώ το «ηλεκτρικό σύστημα» ένα «ηλεκτρικό δίκτυο» (π.χ. μιας βιομηχανίας ή ενός πλοίου) που τροφοδοτεί διάφορες συσκευές καταναλώσεως, όπως π.χ. λυχνίες φωτισμού, ηλεκτρικούς κινητήρες κλπ. Στην περίπτωση που η ηλεκτρική μηχανή είναι κινητήρας, το «ηλεκτρικό σύστημα» είναι π.χ. το ηλεκτρικό δίκτυο που προαναφέρθηκε και το «μηχανικό σύστημα», μία μηχανή που εκτελεί ένα ορισμένο έργο, π.χ. μία αντλία νερού, ένα ανυψωτικό μηχάνημα κλπ.

Ανάλογα με το είδος του ρεύματος που παράγουν, αν πρόκειται για γεννήτριες ή, με το οποίο τροφοδοτούνται, αν πρόκειται για κινητήρες, οι ηλεκτρικές μηχανές διακρίνονται σε συνεχούς ρεύματος (SP) ή εναλλασσόμενου ρεύματος (EP).

Είναι αξιοσημείωτο ότι όλα τα είδη των στρεφομένων ηλεκτρικών μηχανών

περιλαμβάνουν τα βασικά τμήματα που δείχνονται στο σχήμα 1.2, ήτοι:

- Το σταθερό τμήμα που ονομάζεται «στάτης» και περιλαμβάνει το μεταλλικό περίβλημα – βάση της μηχανής, το «μαγνητικό κύκλωμα» και το «τύλιγμα» του στάτη.
- Το στρεφόμενο τμήμα που ονομάζεται «δρομέας» ή «ρότορας» και περιλαμβάνει τον άξονα, το «μαγνητικό κύκλωμα» και το «τύλιγμα» του δρομέα.

Επί πλέον υπάρχουν διάφορα άλλα στοιχεία, όπως π.χ. οι διατάξεις συνδέσεως των τυλιγμάτων προς τα εξωτερικά κυκλώματα που διαφέρουν ανάλογα με την κατηγορία των μηχανών (ΣΡ ή ΕΡ).

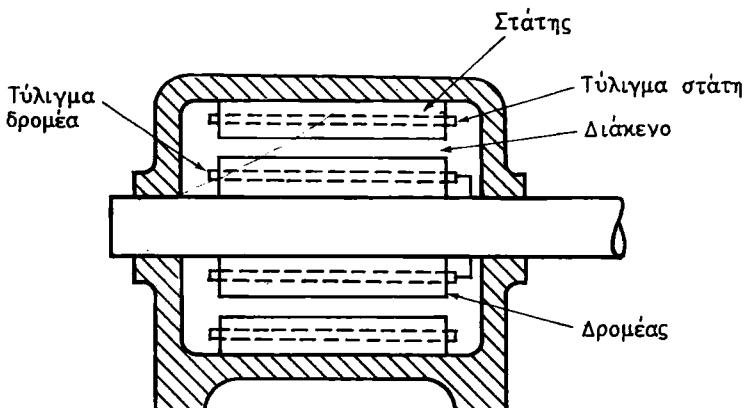
Τα ρεύματα που διαρρέουν τα τυλίγματα προκαλούν ηλεκτρομαγνητικά πεδία, των οποίων η αλληλοεπίδραση στο «διάκενο» αέρα, μεταξύ στάτη και δρομέα, έχει ως αποτέλεσμα την ηλεκτρομηχανική μετατροπή. Σημειώνεται τέλος ότι η λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών είναι πάντοτε «αντιστρεπτή», δηλαδή η ίδια μηχανή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σαν γεννήτρια είτε σαν κινητήρας.

Εκτός των στρεφομένων στις ηλεκτρικές μηχανές εντάσσονται και οι ακόλουθες τρεις κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών:

Οι μετασχηματιστές που χρησιμεύουν για την ανύψωση ή υποβίβασμό της τάσεως του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Οι στρεφόμενοι μετατροπείς και τα **ζεύγη κινητήρα-γεννήτριας**, που μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές και αντίστροφα.

Οι ανορθωτές που χρησιμεύουν για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές. Οι ανορθωτές δεν έχουν περιστρεφόμενα μέρη και για το λόγο αυτό ονομάζονται και **στατοί** ανορθωτές.



Σχ. 1.2.
Βασική στρεφόμενη μηχανή.

1.2 Χρήση και εφαρμογή των ηλεκτρικών μηχανών.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα οι ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιούνται τόσο για την παραγωγή (γεννήτριες) όσο και για τη χρήση (κινητήρες) της

ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γεννήτριες κατασκευάζονται σε ισχείς από μερικά kW, όταν χρησιμοποιούνται σε μικρά «ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη», μέχρι και άνω των 1000 MW, όταν χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση «συστημάτων παραγωγής - μεταφοράς» ηλεκτρικής ενέργειας που καλύπτουν μια ολόκληρη χώρα, όπως π.χ. το σύστημα της ΔΕΗ στη χώρα μας. Οι κινητήρες κατασκευάζονται από ισχείς εκατοστών του Watt, όταν π.χ. χρησιμοποιούνται ως στοιχεία ευαισθήτων οργάνων, μέχρι και άνω των 50 MW όταν χρησιμοποιούνται σε μεγάλες βιομηχανικές ή άλλες εγκαταστάσεις.

Ιδιαίτερη ανάπτυξη παρουσιάζουν τα τελευταία χρόνια οι διατάξεις ελέγχου των κινητήρων με τη χρήση στοιχείων από ημιαγωγούς (θυρίστορ).

Το τεράστιο πλήθος των ηλεκτρικών μηχανών που σήμερα κατασκευάζονται, θασίζεται στις ίδιες θασικές αρχές, ανεξάρτητα αν πρόκειται για μηχανή ολίγων Watt ή πολλών MW. Στα κεφάλαια που ακολουθούν αποσκοπείται κυρίως η παρουσίαση των αρχών αυτών, ανάλογα με την ιδιαίτερη κατηγορία και είδος της μηχανής (γεννήτρια-κινητήρας, συνεχούς-εναλλασσόμενου ρεύματος κλπ).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

2.1 Αρχή λειτουργίας των γεννητριών συνεχούς ρεύματος.

2.1.1 Ηλεκτρεγερτική δύναμη σε κινούμενο αγωγό.

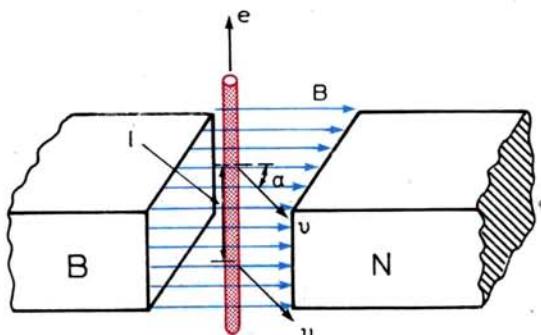
Από την Ηλεκτροτεχνία είναι γνωστό ότι, όταν ένας αγωγός κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο έτσι ώστε να κόβει τις μαγνητικές γραμμές, τότε μέσα στον αγωγό δημιουργείται **ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή**. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται και **φαινόμενο γεννητρίας**.

Το σχήμα 2.1α παριστάνει έναν αγωγό κινούμενο μέσα στο ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται μεταξύ των πόλων B και N ενός μόνιμου μαγνήτη. Ο αγωγός είναι κάθετος στις μαγνητικές γραμμές και κινείται προς την κατεύθυνση που δείχνουν τα βέλη u στο σχήμα. Τα βέλη αυτά είναι κάθετα στον αγωγό και σχηματίζουν γωνία α με την κατεύθυνση των μαγνητικών γραμμών. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη που δημιουργείται από επαγωγή σε ένα τέτοιο αγωγό δίνεται από τη σχέση:

$$e = B \cdot l \cdot u \cdot \eta_{ma} \quad \text{σε V}$$

όπου: B είναι η μαγνητική επαγωγή του ομοιόμορφου πεδίου σε T (Vs/m^2),
 l το μήκος σε m του αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο και
 u η ταχύτητα του αγωγού σε m/s .

Από την παραπάνω σχέση συμπεραίνουμε ότι όταν ο αγωγός κινείται παράλληλα



Σχ. 2.1α.

Αγωγός κινούμενος μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

προς τις μαγνητικές γραμμές ($\alpha = 0$ και $\eta\mu = 0$) δεν δημιουργείται ηλεκτρεγερτική δύναμη στον αγωγό. Όταν ο αγωγός κινείται κάθετα προς τις μαγνητικές γραμμές, η ηλεκτρεγερτική δύναμη που δημιουργείται σε αυτόν παίρνει τη μέγιστη τιμή της ($\alpha = 90^\circ$ και $\eta\mu = 1$). Αυτός είναι ο λόγος που στις ηλεκτρικές μηχανές η κατασκευή τους γίνεται έτσι, ώστε οι αγωγοί να κινούνται πάντοτε σε διεύθυνση κάθετη προς τις μαγνητικές γραμμές.

Παράδειγμα.

Ένας αγωγός κινείται με ταχύτητα 30 m/s σε ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο που έχει μαγνητική επαγωγή $0,6 \text{ T}$. Το μήκος του αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο είναι $0,4 \text{ m}$. Ποια είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή που δημιουργείται στον αγωγό;

- Όταν κινείται με γωνία 30° προς τις μαγνητικές γραμμές και
- όταν κινείται κάθετα προς αυτές.

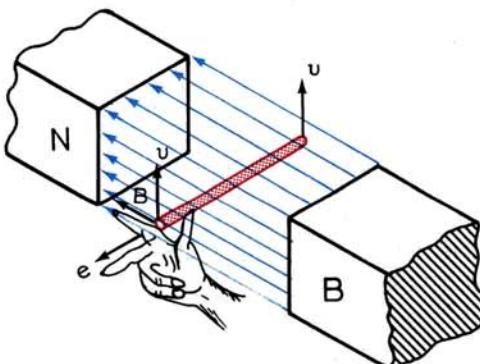
Λύση.

$$\text{a) } e = B \cdot l \cdot u \cdot \eta\mu 30^\circ \quad \text{σε V}$$

$$e = 0,6 \times 0,4 \times 30 \times \frac{1}{2} = 3,6 \text{ V}$$

$$\text{b) } e = B \cdot l \cdot u \cdot \eta\mu 90^\circ \quad \text{σε V}$$

$$e = 0,6 \times 0,4 \times 30 \times 1 = 7,2 \text{ V}$$



Σχ. 2.1β.
Κανόνας δεξιού χεριού.

Η φορά της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως που δημιουργείται από επαγωγή σε αγωγό κινούμενο μέσα σε μαγνητικό πεδίο δίνεται από τον **κανόνα του δεξιού χεριού**, όπως εξηγείται στο σχήμα 2.1β. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, **όταν ο αντίχειρας του δεξιού χεριού δείχνει την κατεύθυνση της κινήσεως του αγωγού και ο δείκτης την κατεύθυνση των μαγνητικών γραμμών (από το βόρειο πόλο στο νότιο), τότε το μεσαίο δάκτυλο, αν το προσανατολίσουμε παράλληλα προς τον αγωγό, θα δείχνει τη φορά της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως που δημιουργείται σε αυτόν.** Η

φορά αυτή θα είναι και η φορά κινήσεως του ρεύματος που θα κυκλοφορήσει μέσα στον αγωγό, αν συνδέσομε τα άκρα του με ένα ηλεκτρικό φορτίο.

Με τη βοήθεια του κανόνα του δεξιού χεριού είναι εύκολο να διαπιστώσει κανείς ότι **η φορά της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως που δημιουργείται στον αγωγό, δηλαδή η πολικότητά της, αλλάζει όταν αλλάζει η πολικότητα του μαγνητικού πεδίου.** Ομοίως η φορά της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως αλλάζει όταν αντιστραφεί η κατεύθυνση της κινήσεως του αγωγού. Αν όμως αλλάξουν και τα δυο, η πολικότητα της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως δεν αλλάζει.

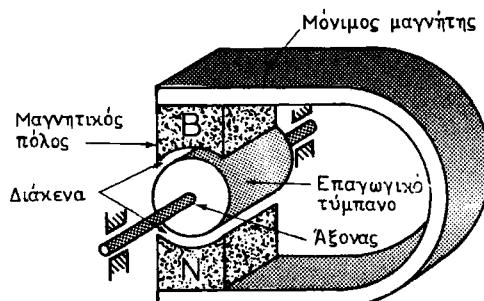
Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για τη δημιουργία ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως από επαγωγή μέσα στον αγωγό που κινείται σε μαγνητικό πεδίο ισχύουν και όταν ο αγωγός μένει ακίνητος και κινείται το μαγνητικό πεδίο. Αν ο αγωγός κόβει τις μαγνητικές γραμμές του κινούμενου πεδίου δημιουργείται πάλι σε αυτόν ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή που το μέγεθός της το δίνει η ίδια σχέση που αναφέρθηκε προηγουμένως. Για να βρούμε τη φορά της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως στην περίπτωση αυτή εφαρμόζομε πάλι τον κανόνα του δεξιού χεριού, με τη διαφορά ότι ο αντίχειρας θα πρέπει να δείχνει αντίθετα από την κατεύθυνση κινήσεως του μαγνητικού πεδίου.

2.1.2 Ηλεκτρεγερτική δύναμη σε σπείρα (στοιχειώδης γεννητρία).

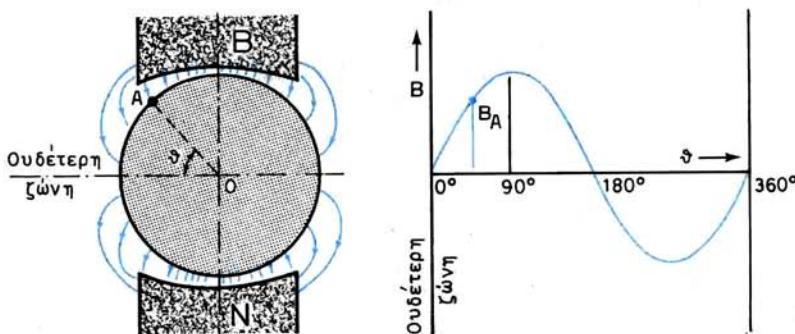
Για να περιγράψουμε την αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών γεννητριών, ας φαντασθούμε μια στοιχειώδη γεννητρία, που να αποτελείται από ένα μόνιμο πεταλοειδή μαγνήτη (σχ. 2.1γ) και ένα κυλινδρικό τύμπανο από σιδηρομαγνητικό υλικό, που να μπορεί να περιστραφεί γύρω από τον αξονά του. Το κυλινδρικό αυτό τύμπανο μαζί με τους αγωγούς, που όπως θα δούμε φέρει στην κυλινδρική επιφάνειά του, ονομάζεται **επαγωγικό τύμπανο** και βρίσκεται μεταξύ των πόλων του μόνιμου μαγνήτη, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1γ. Οι μαγνητικές γραμμές ακολουθούν τη διαδρομή: βόρειος πόλος μαγνήτη-διάκενο (μεταξύ πόλου και τυμπάνου) - επαγωγικό τύμπανο - διάκενο - νότιος πόλος μαγνήτη.

Στο αριστερό μέρος του σχήματος 2.1δ φαίνεται με τη συμβατική σχεδίαση (μπλε γραμμές στο σχήμα) το μαγνητικό πεδίο όπως διαμορφώνεται στα διάκενα της μηχανής. Όπως είναι γνωστό, οι μαγνητικές γραμμές συναντούν κάθετα τους πόλους του μαγνήτη και το τύμπανο από σιδηρομαγνητικό υλικό.

Η μεταβολή από θέση σε θέση της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο εξαρτάται από τη διαμόρφωση της μηχανής και κυρίως των μαγνητικών πόλων. Η μαγνητική



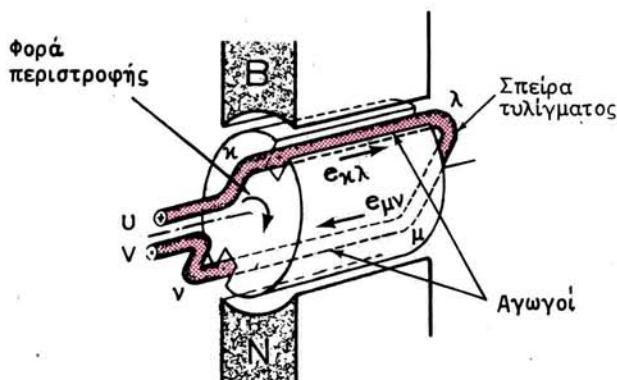
Σχ. 2.1γ.
Στοιχειώδης ηλεκτρική μηχανή.



Σχ. 2.16.
Μαγνητικό πεδίο στο διάκενο.

επαγωγή είναι μέγιστη στο μέσο των πόλων και μικραίνει όσο πλησιάζομε στην **ουδέτερη ζώνη**, όπου γίνεται μηδενική. Η καμπύλη στο δεξιό μέρος στο σχήμα 2.1δ παριστάνει πώς μεταβάλλεται η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο σε συνάρτηση με τη γωνία θ . Δηλαδή μας δίνει τη μαγνητική επαγωγή στα διάφορα σημεία Α στην επιφάνεια του επαγωγικού τυμπάνου, όταν η γωνία θ , που σχηματίζει η ακτίνα OA με την ουδέτερη ζώνη, μεταβάλλεται από 0° μέχρι 360° . Στο διάγραμμα αυτό έχουν θεωρηθεί θετικές οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής όταν οι μαγνητικές γραμμές έχουν φορά προς το τύμπανο και αρνητικές όταν απομακρύνονται από αυτό.

Ας υποθέσουμε τώρα ότι σε δυο οδοντώσεις, που υπάρχουν στην κυλινδρική επιφάνεια του επαγωγικού τυμπάνου σε διαμετρικά αντίθετα σημεία, έχουν τοποθετηθεί δυο αγωγοί κ-λ και ν-μ. Οι δυο αγωγοί ενώνονται στο πίσω μέρος του τυμπάνου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1ε ώστε να αποτελούν μια **σπείρα του τυλίγματος** της μηχανής. Όταν το τύμπανο περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα,



Σχ. 2.1ε.
Ηλεκτρεγερτική δύναμη σε σπείρα.

κάθε ένας από τους αγωγούς της σπείρας αυτής τέμνει τις μαγνητικές γραμμές που υπάρχουν στο διάκενο και μάλιστα κάθετα, αφού όπως είπαμε αυτές διευθύνονται κάθετα προς το τύμπανο. Άρα σε κάθε ένα αγωγό δημιουργείται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή, που το μέγεθός της δίνεται από τη σχέση του εδαφίου 2.1.1. Εδώ ω είναι η περιφερειακή ταχύτητα των αγωγών και ημα = 1.ι. Αν ω είναι η ταχύτητα περιστροφής (σε στρ/s) και r η ακτίνα (σε m) του επαγωγικού τυμπάνου, τότε:

$$u = 2\pi \cdot r \cdot \text{σε m/s}$$

Επειδή σε διαμετρικά αντίθετα σημεία του τυμπάνου η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο έχει την ίδια απόλυτη τιμή (όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1δ) συμπεραίνομε ότι την ίδια τιμή θα έχουν και οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις των δύο αγωγών:

$$\epsilon_{KL} = \epsilon_{MV}$$

Με τη βοήθεια του κανόνα του δεξιού χεριού είναι εύκολο να αποδείξουμε ότι, για τη φορά περιστροφής που σημειώνεται με ένα τόξο στο σχήμα 2.1ε και για τη χρονική στιγμή που δείχνει το σχήμα αυτό, στον αγωγό κ-λ η ηλεκτρεγερτική δύναμη θα έχει φορά από το κ προς το λ και στον αγωγό ν-μ από το μ προς το ν, όπως έχουν σημειωθεί με βέλη στο ίδιο σχήμα. Δηλαδή οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις των δύο αγωγών αθροίζονται. Αυτό γίνεται κάθε χρονική στιγμή, όπου κι αν βρίσκεται το τύμπανο κατά την περιστροφή του. Άρα η ηλεκτρεγερτική δύναμη ε της σπείρας κάποια χρονική στιγμή θα δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon = \epsilon_{KL} + \epsilon_{MV} = 2 \cdot B \cdot I \cdot u \quad \text{σε V}$$

όπου: B είναι η μαγνητική επαγωγή σε T (Wb/m² ή Vs/m²) στο σημείο του διάκενου που βρίσκεται ο ένας αγωγός της σπείρας τη στιγμή αυτή,

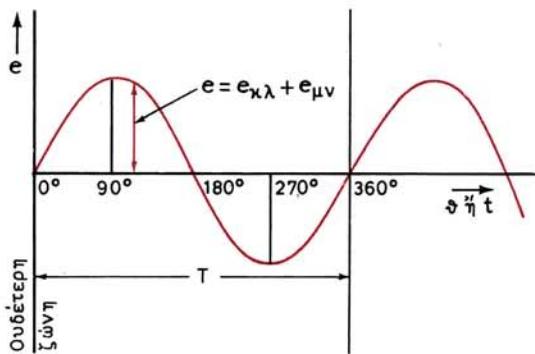
I το μήκος σε m του αγωγού που βρίσκεται μέσα στην οδόντωση του τυμπάνου και

u η σταθερή περιφερειακή ταχύτητα των αγωγών σε m/s.

Από τη σχέση αυτή παρατηρούμε ότι, αφού τα I και ω είναι σταθερά, η ηλεκτρεγερτική δύναμη στη σπείρα για τις διάφορες θέσεις από τις οποίες περνούν οι αγωγοί της κατά την περιστροφή του τυμπάνου μεταβάλλεται όπως και η μαγνητική γωγοί της κατά την περιστροφή του τυμπάνου μεταβάλλεται όπως μεταβάλλεται και η μαγνητική επαγωγή B. Δηλαδή μια καμπύλη σαν αυτή που δίνει τη μεταβολή του B (σχ. 2.1δ) θα μας δίνει και τη μεταβολή της ε, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1στ.

Στο διάγραμμα αυτό θετική είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη της σπείρας όταν έχει φορά από το κ προς το λ και από το μ προς το ν. Όταν η ηλεκτρεγερτική δύναμη έχει αντίθετη φορά είναι αρνητική.

Στον οριζόντιο άξονα αντί για τη γωνία θ μπορούμε να βάλομε το χρόνο t που χρειάσθηκε η σπείρα (ο αγωγός της σπείρας) για να έλθει από την ουδέτερη ζώνη στην αντίστοιχη θέση. Όταν η σπείρα συμπληρώσει μια στροφή από 360°, η ηλεκτρεγερτική δύναμη θα έχει συμπληρώσει μια πλήρη μεταβολή, που ονομάζεται **κύκλος**. Ο χρόνος που χρειάζεται για να συμπληρωθεί ένας κύκλος ονομάζεται **περίοδος** και παριστάνεται με το T. Μετά την πρώτη περίοδο η ηλεκτρεγερτική δύναμη στην περιστρεφόμενη σπείρα θα επαναλάβει μια όμοια μεταβολή, δηλαδή ένα δεύτερο κύκλο, έπειτα ένα τρίτο κ.ο.κ. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη που μεταβάλλε-



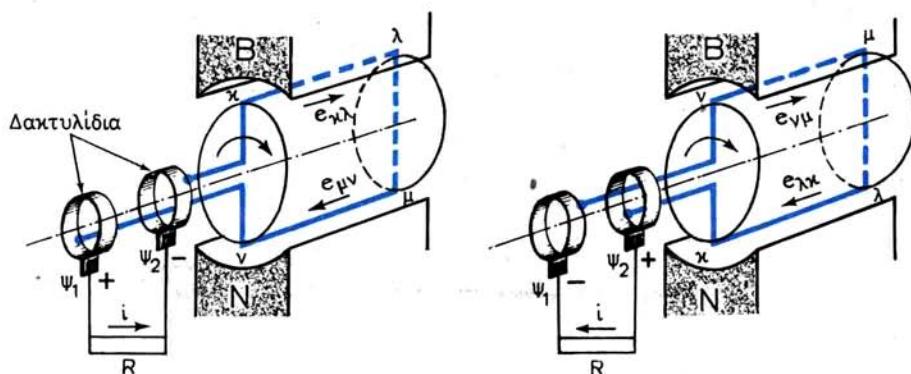
Σχ. 2.1στ.
Εναλλασσόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη.

ται σε συνάρτηση με το χρόνο με τον τρόπο αυτό (σχ. 2.1στ) ονομάζεται **εναλλασσόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη**.

2.1.3 Παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος.

Για να χρησιμοποιήσουμε την ηλεκτρεγερτική δύναμη, η οποία παράγεται μέσα στη σπείρα, συνδέομε τα δυο άκρα της σε δυο μεταλλικά δακτυλίδια, τα οποία είναι στερεωμένα επάνω στον άξονα του τυμπάνου και περιστρέφονται μαζί του. Τα δακτυλίδια αυτά είναι ηλεκτρικά μονωμένα προς τον άξονα.

Δυο ψήκτρες από άνθρακα ψ_1 και ψ_2 (σχ. 2.1ζ) που είναι όπως θα δούμε στερεωμένες στο ακίνητο μέρος της μηχανής, εφάπτονται στα δακτυλίδια. Οι ψήκτρες συνδέονται μεταξύ τους με την εξωτερική αντίσταση R , που είναι η συσκευή στην οποία θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε το ρεύμα που θα παραχθεί από την απλή αυτή μηχανή. Η R είναι δηλαδή το **φορτίο** της μηχανής. Για απλούστευση στο σχήμα 2.1ζ δεν έχουν σχεδιασθεί οι οδοντώσεις του τυμπάνου. Είναι εύκολο να διαπιστώσουμε ότι τη χρονική στιγμή που παριστάνει το αριστερό μέρος στο σχήμα 2.1ζ



Σχ. 2.1ζ.
Παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος.

το ρεύμα μέσα στο φορτίο R κατευθύνεται από την ψήκτρα ψ_1 προς την ψήκτρα ψ_2 . Αντίθετα, τη χρονική στιγμή που παριστάνει το δεξιό μέρος στο ίδιο σχήμα, δηλαδή όταν το τύμπανο θα έχει στραφεί κατά 180° σε σχέση με την προηγούμενη θέση, το ρεύμα μέσα στο φορτίο θα κατευθύνεται αντίθετα, δηλαδή από την ψήκτρα ψ_2 προς την ψ_1 .

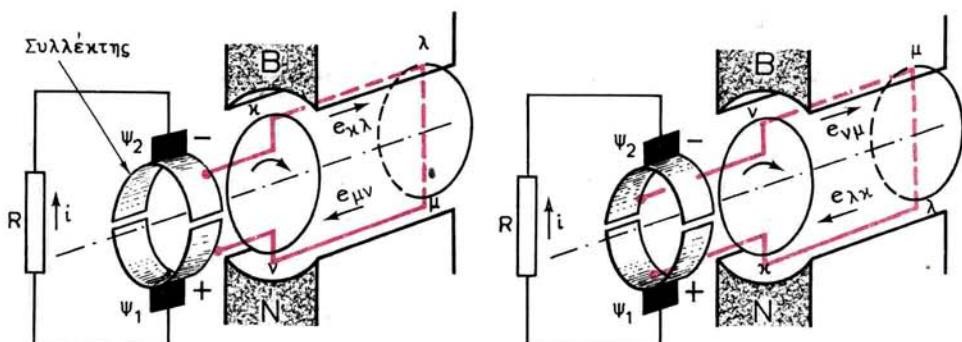
Γενικά η εναλλασσόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη της σπείρας θα δώσει στο φορτίο ένα ρεύμα που θα είναι και αυτό εναλλασσόμενο και μάλιστα ταυτόχρονο και ίδιας μορφής με την καμπύλη του σχήματος 2.1στ, όταν το φορτίο R είναι καθαρή αωμική αντίσταση. Δηλαδή η μηχανή αυτή είναι μια στοιχειώδης γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος.

2.1.4 Μετατροπή του παραγόμενου ρεύματος σε συνεχές.

Στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, όταν περιστρέφεται το επαγωγικό τύμπανο, δημιουργείται μέσα στις σπείρες των αγωγών εναλλασσόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη, όπως την περιγράψαμε στα προηγούμενα. Στο εξωτερικό φορτίο όμως της μηχανής παίρνομε συνεχές ρεύμα και αυτό γίνεται με τη βοήθεια του **συλλέκτη**. Ο συλλέκτης που αντικαθιστά τα δακτυλίδια των γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος, στην απλούστερή του μορφή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1η, αποτελείται από ένα δακτυλίδιο κομμένο σε δυο μισά (**τομείς του συλλέκτη**), που είναι στερεωμένα στον άξονα του επαγωγικού τυμπάνου, περιστρέφονται μαζί με αυτόν και είναι μονωμένα μεταξύ τους και προς τον άξονα. Τα άκρα της σπείρας των δυο αγωγών τα συνδέομε μόνιμα με τους τομείς του συλλέκτη.

Οι ψήκτρες ψ_1 και ψ_2 είναι και εδώ στερεωμένες στο ακίνητο μέρος της μηχανής και εφάπτονται στους τομείς του συλλέκτη. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1η είναι τοποθετημένες σε δυο σημεία εκ διαμέτρου αντίθετα ως προς τον άξονα.

Όταν η περιστρεφόμενη μαζί με το τύμπανο σπείρα των δυο αγωγών βρίσκεται στη θέση που φαίνεται αριστερά στο σχήμα 2.1η, όπως είδαμε στα προηγούμενα, δημιουργούνται στους δυο αγωγούς ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις που έχουν τη σημειώμενη με τα βέλη φορά και που αθροίζονται. Το ηλεκτρικό ρεύμα που θα πέρασε από το εξωτερικό φορτίο R θα διευθύνεται από την ψήκτρα ψ_1 προς την ψήκτρα ψ_2 . Δηλαδή τη χρονική αυτή στιγμή η ψ_1 είναι θετική και η ψ_2 αρνητική.



Σχ. 2.1η.
Παραγωγή συνεχούς ρεύματος.

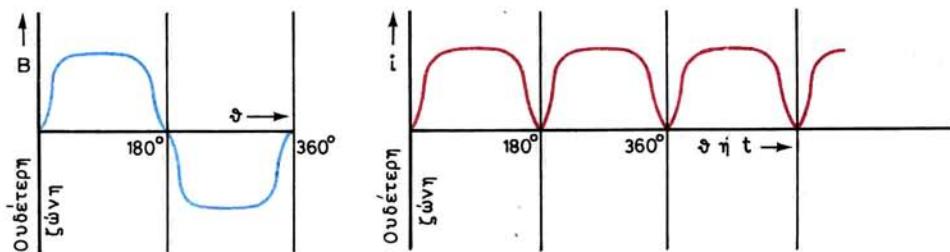
Μετά από ορισμένο χρόνο το περιστρεφόμενο τύμπανο θα βρεθεί στη θέση που φαίνεται δεξιά στο σχήμα 2.1η, δηλαδή θα έχει στραφεί κατά 180° από την ιπριογούμενη θέση του. Παρατηρούμε ότι και στη θέση αυτή η ψήκτρα ψ_1 , εξακολουθεί να είναι θετική και η ψ_2 αρνητική, παρ' όλο ότι μέσα στη σπείρα η ηλεκτρεγερτική δύναμη έχει τώρα αλλάξει φορά σχετικά με τη φορά που είχε προηγουμένως.

Είναι εύκολο να διαπιστώσει κανείς ότι η πολικότητα των ψηκτρών δεν αλλάζει και για οποιαδήποτε άλλη θέση του περιστρεφόμενου επαγωγικού τυμπάνου. Συνέπεια αυτού είναι το φορτίο R να το διαρρέει πάντοτε ρεύμα από την ψήκτρα ψ_1 προς την ψ_2 , δηλαδή κατά την ίδια φορά.

Στο αριστερό διάγραμμα στο σχήμα 2.1θ φαίνεται η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος. Παρατηρούμε ότι σε αυτές τις μηχανές η καμπύλη έχει λίγο διαφορετική μορφή από αυτή του σχήματος 2.1δ, πράγμα που γίνεται από τους κατασκευαστές των μηχανών με κατάλληλη διαμόρφωση των μαγνητικών πόλων. Η μεταβολή της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως της σπείρας κατά την περιστροφή του επαγωγικού τυμπάνου, όπως είπαμε και στην παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος, παριστάνεται με μια καμπύλη όμοια με την καμπύλη μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής.

Στο δεξιό μέρος του σχήματος 2.1θ φαίνεται η μεταβολή της εντάσεως i που διαρρέει το εξωτερικό φορτίο R . Το ρεύμα αυτό που ονομάζεται **ανορθωμένο**, επειδή έχει πάντοτε την ίδια φορά, δεν είναι τελείως συνεχές ρεύμα, γιατί η έντασή του μεταβάλλεται με το χρόνο. Για να μειώσουμε την **κυμάτωση** του αυτή στις πραγματικές γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, χρησιμοποιούμε πολλές σπείρες στο τύμπανο και συλλέκτες που έχουν επίσης πολλούς τομείς. Με κατάλληλη σύνδεση των άκρων των σπειρών με τους τομείς του συλλέκτη πετυχαίνομε να έχομε στο εξωτερικό φορτίο ρεύμα που είναι σχεδόν τελείως συνεχές.

Αν θέλουμε να αλλάξουμε την πολικότητα της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος θα πρέπει, σύμφωνα και με όσα είπαμε στο έδαφοι 2.1.1, να αλλάξουμε ή την πολικότητα του μαγνητικού πεδίου ή τη φορά περιστροφής της μηχανής. Αν τα αλλάξουμε και τα δυο η πολικότητα της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως δεν αλλάζει.



Σχ. 2.1θ.
Ανορθωμένο ρεύμα.

2.2 Αρχή λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

2.2.1 Δύναμη ασκούμενη σε ρευματοφόρο αγωγό.

Όπως είναι γνωστό από την Ηλεκτροτεχνία, όταν ένας αγωγός βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο και διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, τότε στον αγωγό αυτόν ασκείται από το μαγνητικό πεδίο δύναμη που τείνει να τον κινήσει. Αυτό είναι το ονομαζόμενο **φαινόμενο κινητήρα**.

Στο σχήμα 2.2α φαίνεται η δύναμη F που ασκείται σε ένα αγωγό ο οποίος βρίσκεται μέσα στο ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο ενός μόνιμου μαγνήτη μαγνητικής επαγωγής B . Ο αγωγός που διαρρέεται από ένταση I σχηματίζει γωνία α με τις μαγνητικές γραμμές.

Το μέτρο της δυνάμεως F που ασκείται στον αγωγό δίνεται από τη σχέση:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \eta_m \quad \text{σε N}$$

όπου: B είναι η μαγνητική επαγωγή του πεδίου σε T (Vs/m^2 ή Wb/m^2),

I είναι η ένταση σε A του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό,

l το μήκος σε m του αγωγού, που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο και α η γωνία που σχηματίζει ο αγωγός με τις μαγνητικές γραμμές.

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι όταν ο αγωγός είναι παράλληλος με τις μαγνητικές γραμμές δεν ασκείται σε αυτόν δύναμη ($\alpha = 0$, $\eta_m = 0$). Αντίθετα, η δύναμη παίρνει τη μέγιστη τιμή της όταν ο αγωγός είναι κάθετος στις μαγνητικές γραμμές του πεδίου ($\alpha = 90^\circ$, $\eta_m = 1$).

Παράδειγμα.

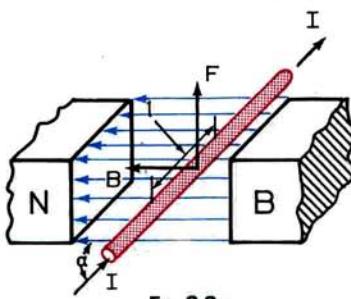
Αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως 40 A είναι τοποθετημένος μέσα σε μαγνητικό πεδίο κάθετα προς τις μαγνητικές γραμμές. Να βρεθεί η δύναμη που ασκείται στον αγωγό αν το μήκος του είναι $0,5\text{ m}$ και η μαγνητική επαγωγή του πεδίου $0,8\text{ T}$.

Λύση.

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \eta_m 90^\circ$$

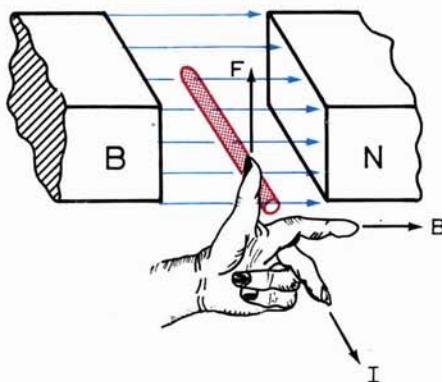
$$F = 0,8 \times 40 \times 0,5 \times 1 = 16 \text{ Ws/m} = 16 \text{ N}$$

Η κατεύθυνση της δυνάμεως F βρίσκεται εύκολα με τον **κανόνα του αριστερού χεριού** (σχ. 2.2β), που λέει ότι: **όταν ο δείκτης του αριστερού χεριού δείχνει την κατεύθυνση των μαγνητικών γραμμών (από το βρέιο πόλο προς το νότιο) και ο**



Σχ. 2.2α.

Δύναμη σε ρευματοφόρο αγωγό.



Σχ. 2.2β.
Κανόνας αριστερού χεριού.

μέσος δάκτυλος δείχνει τη φορά ροής του ρεύματος στον αγωγό, τότε ο αντίχειρας προσανατολισμένος κάθετα προς τα δυο άλλα δάκτυλα δείχνει την κατεύθυνση της δυνάμεως.

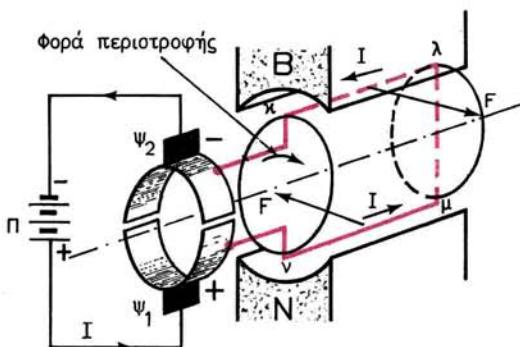
Αν αλλάξει η φορά του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό η κατεύθυνση της δυνάμεως αντιστρέφεται. Η κατεύθυνση αντιστρέφεται επίσης αν αλλάξει η πολικότητα του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή η κατεύθυνση της μαγνητικής επαγωγής. Αν αλλάξουν όμως και τα δυο, δηλαδή και η φορά του ρεύματος και η πολικότητα του μαγνητικού πεδίου, η κατεύθυνση της δυνάμεως δεν αλλάζει.

2.2.2 Ροπή ασκούμενη σε ρευματοφόρα σπείρα (στοιχειώδης κινητήρας).

Στην παράγραφο αυτή θα ασχοληθούμε μόνο με την αρχή λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Την αρχή λειτουργίας των διαφόρων τύπων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος θα εξετάσουμε στα αντίστοιχα κεφάλαια του βιβλίου αυτού.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι όμοιοι κατασκευαστικά με τις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. Για να εξηγήσουμε την αρχή λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος, πάροντας την απλή μηχανή του σχήματος 2.1η και τη βάζομε να εργασθεί σαν κινητήρας. Δηλαδή την τροφοδοτούμε με ηλεκτρική ενέργεια από μια πηγή συνεχούς ρεύματος Π, για να μας δώσει μηχανική (κινητική) ενέργεια στον άξονά της. Ας δούμε πώς θα συμβεί αυτό.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2γ, μέσω των ψηκτρών και του συλλέκτη η πηγή Π διοχετεύει συνεχές ρεύμα εντάσεως I στη σπείρα των δυο αγωγών $k-l$ και $v-m$. Οι αγωγοί όμως βρίσκονται μέσα στο μαγνητικό πεδίο της μηχανής. Σύμφωνα με αυτά που είπαμε στο προηγούμενο εδάφιο θα ασκηθεί σε κάθε ένα αγωγό μια δύναμη F , όπως τη δείχνει το σχήμα, δηλαδή που θα έχει διεύθυνση κατά την εφαπτομένη στο τύμπανο. Οι δυνάμεις αυτές αποτελούν ένα **ζεύγος δυνάμεων** που ασκεί **ροπή** στο επαγωγικό τύμπανο. Αποτέλεσμα της ροπής αυτής είναι να στραφεί το τύμπανο περί τον άξονά του κατά τη φορά που δείχνει το τόξο. Είναι εύκολο να δει κανείς ότι οποιαδήποτε θέση και αν έχει η σπείρα των δυο αγωγών κατά την περι-



Σχ. 2.2γ.
Στοιχειώδης κινητήρας συνεχούς ρεύματος.

στροφή του τυμπάνου, η φορά της ροπής των δυνάμεων που ασκούνται στους αγωγούς είναι πάντοτε η ίδια.

Η ροπή τ που ασκεί το ζεύγος αυτό των δυνάμεων στο επαγωγικό τύμπανο δεν είναι σταθερή. Το μέτρο της κάθε στιγμή δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = 2 \cdot F \cdot r \text{ σε Nm}$$

όπου: F είναι η δύναμη σε N που ασκείται σε κάθε αγωγό της σπείρας τη θεωρούμενη στιγμή και

r η ακτίνα σε m του επαγωγικού τυμπάνου.

Αν λάβομε υπόψη όσα είπαμε στο προηγούμενο εδάφιο για το μέγεθος της F έχουμε:

$$\tau = 2B \cdot I \cdot l \cdot r \text{ σε Nm}$$

όπου: B είναι η μαγνητική επαγωγή σε Vs/m² στο σημείο του διάκενου που βρίσκεται η σπείρα τη θεωρούμενη στιγμή,

I η ένταση του ρεύματος που τη διαρρέει σε A ,

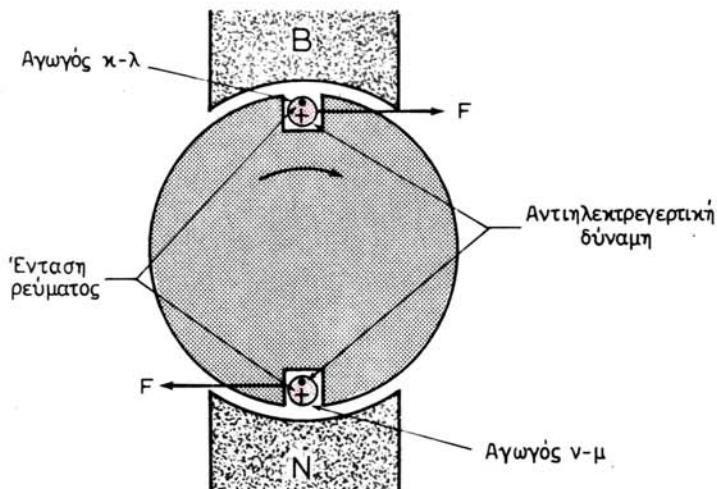
l και r το μήκος και η ακτίνα σε m του επαγωγικού τυμπάνου.

Αυτό που συμβαίνει με τη μια σπείρα στη στοιχειώδη μηχανή του σχήματος 2.2γ συμβαίνει στους πραγματικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος με όλες τις σπείρες, που, όπως είπαμε και στις γεννήτριες, έχουν στο επαγωγικό τους τύμπανο. Οι ροπές όλων αυτών των ζευγών ενεργούν κατά την ίδια φορά και θέτουν σε περιστροφική κίνηση το επαγωγικό τύμπανο.

Από όσα αναφέραμε στο προηγούμενο εδάφιο για την αλλαγή της κατευθύνσεως στη δύναμη που ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό, συμπεραίνομε ότι **για να αλλάξουμε τη φορά περιστροφής του επαγωγικού τυμπάνου σε ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος, θα πρέπει ή να αλλάξουμε την πολικότητα των μαγνητικών πόλων ή να αλλάξουμε τη φορά του ρεύματος μέσα στους αγωγούς του**, δηλαδή να αλλάξουμε την πολικότητα της πηγής. Αν τα αλλάξουμε και τα δύο, η φορά περιστροφής του κινητήρα δεν αλλάζει.

2.3 Αντιηλεκτρεγερτική δύναμη.

Όπως είδαμε, όταν στους αγωγούς του επαγωγικού τυμπάνου ενός κινητήρα



Σχ. 2.3.
Αντιηλεκτρεγερτική δύναμη κινητήρα.

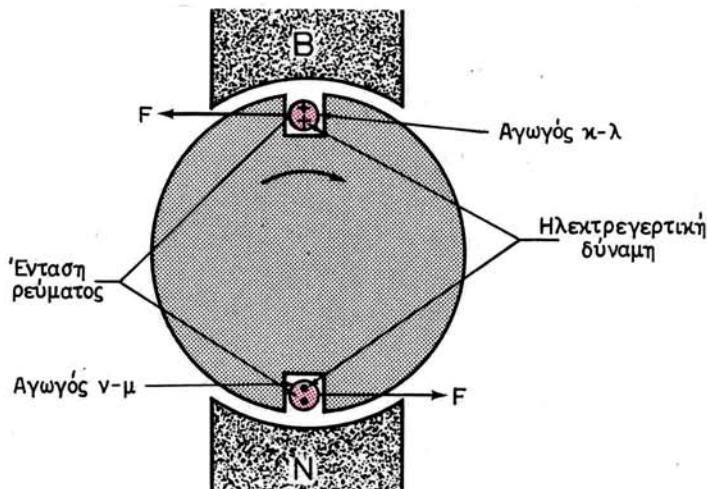
περάσει συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, το τύμπανο θα αρχίσει να περιστρέφεται. Ξέρομε όμως, από όσα αναφέραμε στο εδάφιο 2.1.1, ότι στους κινούμενους μέσα στο μαγνητικό πεδίο αγωγούς δημιουργούνται ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις από επαγγαγή. Αυτό συμβαίνει και στους αγωγούς του περιστρεφόμενου επαγγικού τυμπάνου των κινητήρων.

Στο σχήμα 2.3 φαίνονται, σε τομή κάθετη προς τον άξονα, οι δυο αγωγοί της σπείρας του απλού κινητήρα του σχήματος 2.2γ. Έχει επίσης σημειωθεί με τα γνωστα σύμβολα (+ για κατεύθυνση από εμπρός προς τα πίσω και - για αντίθετη κατεύθυνση), η φορά που έχει η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που τους διαρρέει. Για τη σημειούμενη φορά περιστροφής (που δημιουργούν οι δυνάμεις F) έχουμε ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων, των οποίων η φορά τους είναι αυτή που σημειώνεται επίσης στο σχήμα 2.3.

Παρατηρούμε ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται στην περιστρεφόμενη σπείρα του κινητήρα έχει φορά αντίθετη από τη φορά που έχει η ένταση του ρεύματος που κυκλοφορεί μέσα σε αυτή. Δηλαδή η τάση της πηγής που τροφοδοτεί τον κινητήρα πρέπει να υπερνικήσει αυτή την αντίθετη ηλεκτρεγερτική δύναμη για να μπορέσει να κυκλοφορήσει το ρεύμα στους αγωγούς. Αυτός είναι ο λόγος που την ονομάζομε **αντιηλεκτρεγερτική δύναμη** του κινητήρα.

2.4 Δυνάμεις πεδήσεως στις γεννήτριες.

Στην προηγούμενη παράγραφο διαπιστώσαμε ότι στους ηλεκτρικούς κινητήρες, όταν λειτουργούν, αναπτύσσεται και το φαινόμενο γεννήτριας. Με τη βοήθεια του σχήματος 2.4 μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι αλλθεύει και το αντίστροφο. Δηλαδή ότι και στις γεννήτριες, όταν λειτουργούν τροφοδοτώντας ένα φορτίο, εμφανίζεται το φαινόμενο κινητήρα.



Σχ. 2.4.
Δυνάμεις πεδήσεως σε γεννήτρια.

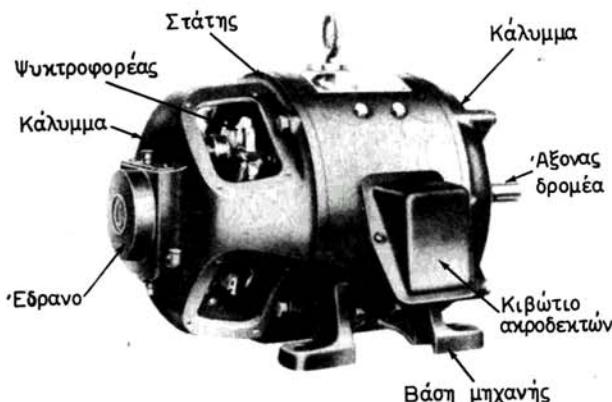
Το σχήμα 2.4 παριστάνει τη στοιχειώδη γεννήτρια του σχ. 2.1η σε τομή κάθετη προς τον άξονα. Στους αγωγούς κ-λ και μ-ν έχει σημειωθεί η φορά της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως της γεννήτριας τη στιγμή που παριστάνει το σχήμα. Αν στη γεννήτρια είναι συνδεμένο ένα εξωτερικό φορτίο, μέσα από τους αγωγούς θα περάσει μία ένταση ρεύματος που θα έχει την ίδια φορά με την ηλεκτρεγερτική δύναμη. Έχουμε λοιπόν και εδώ ρευματοφόρους αγωγούς που βρίσκονται μέσα σε μαγνητικό πεδίο και συνεπώς θα έχουμε ανάπτυξη δυνάμεων F , όπως έχουν σημειωθεί στο σχήμα.

Παρατηρούμε ότι οι δυνάμεις αυτές δημιουργούν μια ροπή που έχει φορά αντίθετη από τη φορά περιστροφής της γεννήτριας. Δηλαδή αυτή την αντίθετη ροπή θα πρέπει να την υπερνικήσει η κινητήρια μηχανή που κινεί τη γεννήτρια. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση φορτίσεως της γεννήτριας τόσο μεγαλύτερη είναι η ροπή που θα πρέπει να δίνει η κινητήρια μηχανή για να υπερνικά την αντίθετη ροπή.

2.5 Κατασκευή των μηχανών συνεχούς ρεύματος.

Όπως αναφέραμε και στο εδάφιο 2.2.2, οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος από την άποψη της κατασκευής τους είναι μηχανές όμοιες με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Έτσι, στα επόμενα περιγράφοντας την κατασκευή δεν θα κάνομε διάκριση αν πρόκειται για γεννήτρια ή κινητήρα.

Κάθε μηχανή συνεχούς ρεύματος (σχ. 2.5α) αποτελείται από το ακίνητο μέρος και το περιστρεφόμενο μέρος που ονομάζεται και **δρομέας**. Το ακίνητο μέρος της μηχανής αποτελείται από το κεντρικό τμήμα, τον **στάτη** και τα δύο **καλύμματα**, που προφυλάγουν το εσωτερικό της μηχανής και στηρίζουν τα **έδρανα**, μέσα στα οποία περιστρέφεται ο άξονας του δρομέα. Στο εξωτερικό μέρος του στάτη είναι στερεωμένο το κιβώτιο των **ακροδεκτών**, με τους οποίους η μηχανή συνδέεται με το δίκτυο που τροφοδοτεί (αν είναι γεννήτρια) ή με το δίκτυο που την τροφοδοτεί με ηλεκτρικό ρεύμα (αν είναι κινητήρας).



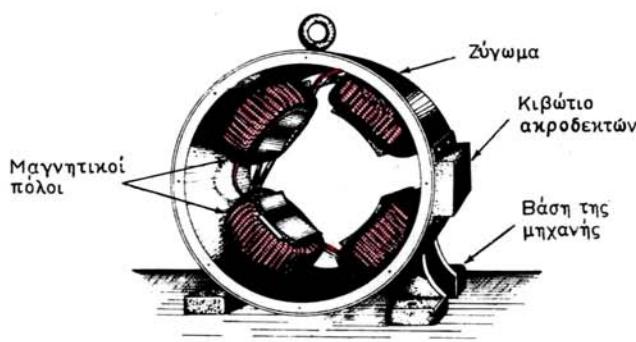
Σχ. 2.5α.

Μηχανή συνεχούς ρεύματος.

Ο στάτης στις μηχανές συνεχούς ρεύματος (σχ. 2.5β) αποτελείται από το **ζύγωμα** και τους **μαγνητικούς πόλους**, που είναι στερεωμένοι στο εσωτερικό του μέρος, όπως φαίνεται στο σχήμα. Στο κάτω μέρος το ζύγωμα είναι διαμορφωμένο σε **βάση** της μηχανής.

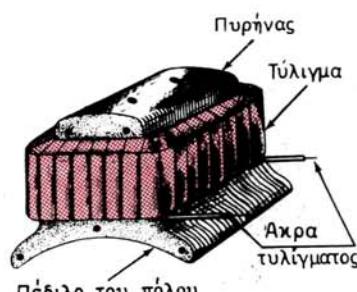
Κάθε μαγνητικός πόλος αποτελείται από τον **πυρήνα** και το **τύλιγμα** (σχ. 2.5γ). Ο πυρήνας, που κατασκευάζεται συνήθως από πολλά λεπτά ειδικά σιδερένια ελάσματα (μαγνητικά ελάσματα), έχει διαμορφωθεί στο ένα του άκρο σε **πέδιλο του πόλου**, όπως φαίνεται στο σχήμα, για την καλύτερη κατανομή του μαγνητικού πεδίου. Το τύλιγμα κάθε πόλου αποτελείται από πολλές σπείρες από μονωμένο χάλκινο σύρμα, που όλες μαζί, για καλύτερη μόνωση προς τον πυρήνα, είναι τυλιγμένες με βαμβακερή ταινία βαπτισμένη σε βερνίκι. Τα άκρα του τυλίγματος μένουν ελεύθερα γιατί, όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο μέσα από αυτά διοχετεύεται το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο. Σε πολλές μηχανές συνεχούς ρεύματος σε κάθε πόλο έχουμε δυο τυλίγματα, το ένα ανεξάρτητο από το άλλο. Το ένα ονομάζεται **τύλιγμα σειράς** και το άλλο **παράλληλο τύλιγμα**. Αυτά είναι τα λεγόμενα **σύνθετα** τυλίγματα.

Ανάλογα με τον αριθμό των πόλων που έχει μια μηχανή, ονομάζεται **διπολική**,



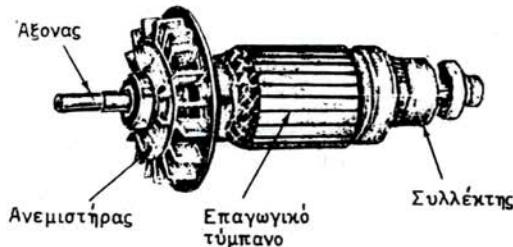
Σχ. 2.5β.

Στάτης.

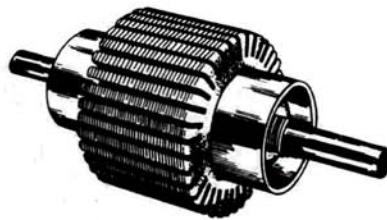


Σχ. 2.5γ.

Μαγνητικός πόλος.



Σχ. 2.5δ.
Δρομέας.



Σχ. 2.5ε.
Πυρήνας από επαγωγικό τύμπανο.

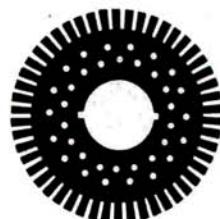
τετραπολική, εξαπολική κ.τ.λ. Οι ηλεκτρικές μηχανές έχουν πάντα άρτιο αριθμό μαγνητικών πόλων.

Ο δρομέας μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος αποτελείται από το **επαγωγικό τύμπανο** και το **συλλέκτη** που είναι στερεωμένα επάνω στον **άξονα** (σχ. 2.5δ). Επάνω στον άξονα είναι στερεωμένος και ο **ανεμιστήρας**, που χρησιμεύει για να σπρώχνει τον αέρα που ψύχει τη μηχανή.

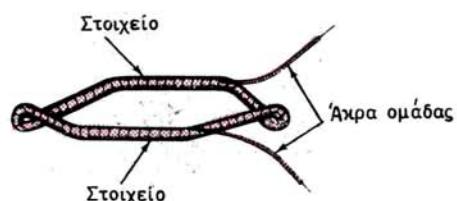
Το επαγωγικό τύμπανο αποτελείται από τον **πυρήνα** και το **τύλιγμα**. Ο πυρήνας (σχ. 2.5ε) κατασκεύαζεται από πολλά λεπτά μαγνητικά ελάσματα κομμένα όπως δείχνει το σχήμα 2.5στ. Οι **οδοντώσεις**, που έχουν τα ελάσματα στην περιφέρειά τους, σχηματίζουν τα **αυλάκια** του πυρήνα μέσα στα οποία τοποθετείται το τύλιγμα.

Το τύλιγμα αποτελείται από ένα ορισμένο αριθμό **ομάδων** (σχ. 2.5ζ). Κάθε ομάδα κατασκευάζεται από πολλές σπείρες μονωμένου χάλκινου σύρματος, οι οποίες αφού τυλιχθούν με βαμβακερή ταινία, διαμορφώνονται όπως δείχνει το σχήμα. Τα δυο **άκρα** του σύρματος από το οποίο έχει κατασκευασθεί η ομάδα μένουν ελεύθερα για να συνδεθούν σε δυο τομείς του συλλέκτη (σχ. 2.5η). Κάθε ένα από τα δυο **στοιχεία** που έχει η ομάδα τοποθετείται σε διαφορετικό αυλάκι του πυρήνα και κατά τέτοιο τρόπο, ώστε σε κάθε αυλάκι να υπάρχουν δυο στοιχεία από δυο διαφορετικές ομάδες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5η. Έτσι, έχομε ένα **τύλιγμα σε δυο στρώσεις**.

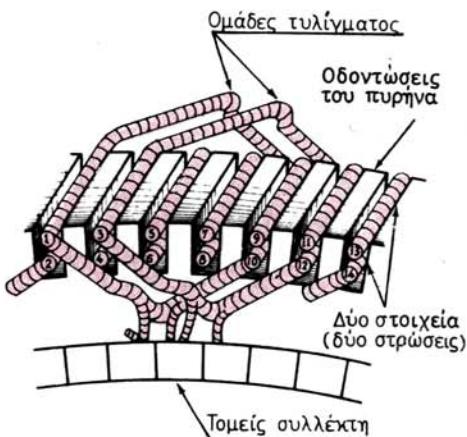
Ο συλλέκτης είναι κατασκευασμένος από πολλά χάλκινα ελάσματα, τους **τομείς του συλλέκτη**, διαμορφωμένα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5θ, το οποίο δείχνει ένα συλλέκτη σε τομή. Οι τομείς στερεώνονται ανάμεσα σε δυο σιδερένια δακτυλίδια, όπως δείχνει το σχήμα, ώστε να σχηματίζουν την κυλινδρική επιφάνεια του συλλέκτη. Κάθε τομέας μονώνεται με μίκα από τους διπλανούς του και από το σώμα



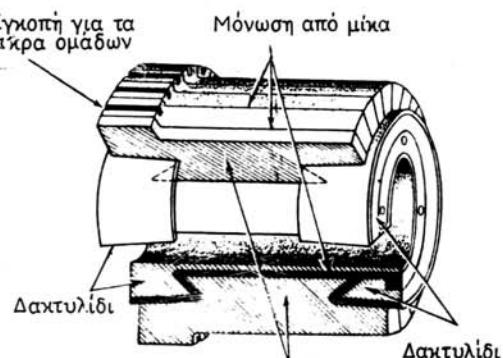
Σχ. 2.5στ.
Έλασμα πυρήνα.



Σχ. 2.5ζ.
Ομάδα τυλίγματος.



Σχ. 2.5η.
Τοποθέτηση των ομάδων στις οδοντώσεις.

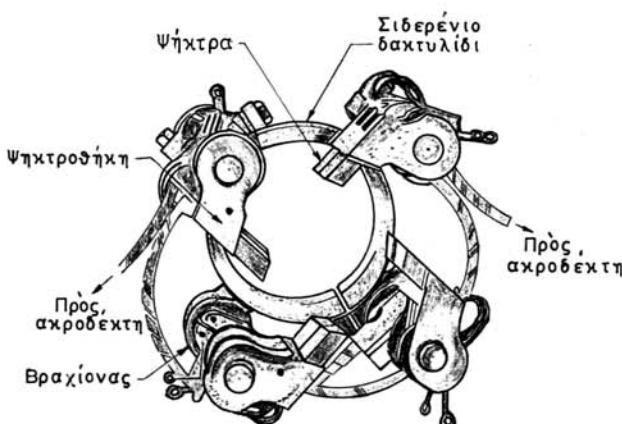


Σχ. 2.5θ.
Συλλέκτης.

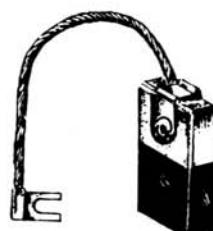
της μηχανής. Στις εγκοπές που φέρουν οι τομείς συγκολλούνται τα άκρα των ομάδων από το τύλιγμα του επαγγελματικού τυμπάνου.

Ένα άλλο εξάρτημα των μηχανών συνεχούς ρεύματος, που στερεώνεται στο ακίνητο μέρος τους προς την πλευρά του συλλέκτη, είναι ο **ψηκτροφορέας** (σχ. 2.5ι). Ο ψηκτροφορέας αποτελείται από ένα σιδερένιο δακτυλίδι με βραχίονες, που είναι στερεωμένοι σε αυτό κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι ηλεκτρικά μονωμένοι από το δακτυλίδι.

Στους βραχίονες στερεώνονται οι **ψηκτροθήκες**, μέσα στις οποίες τοποθετούνται οι **ψήκτρες**. Οι ψήκτρες χρησιμεύουν για να παίρνουν το ηλεκτρικό ρεύμα από το συλλέκτη και να το διοχετεύουν μέσω αγωγών στους ακροδέκτες της μηχανής ή αντίστροφα από τους ακροδέκτες νατο διοχετεύουν στους τομείς του συλλέκτη.



Σχ. 2.5ι.
Ψηκτροφορέας.



Σχ. 2.5ια.
Ψήκτρα.

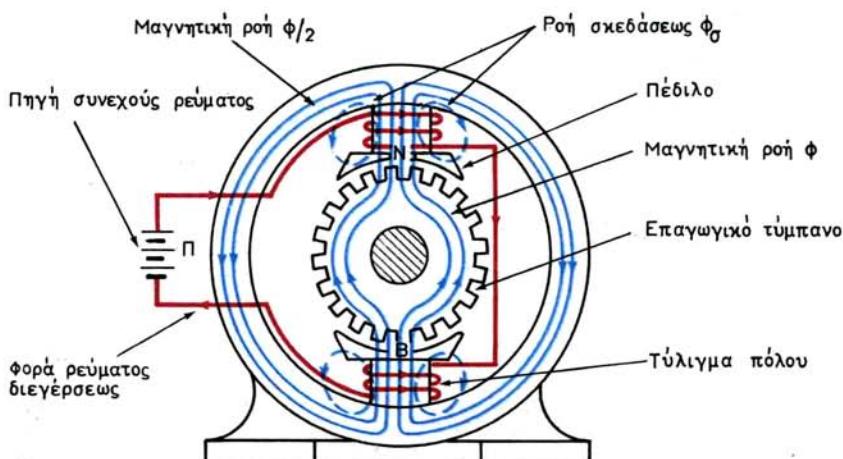
Γι' αυτό το λόγο οι ψήκτρες πιέζονται επάνω στην επιφάνεια του συλλέκτη με μικρά ελατήρια, σαν αυτά που φαίνονται στο σχήμα. Τα ελατήρια στις μεγαλύτερες μηχανές είναι ρυθμιζόμενα, ώστε η πίεση που ασκεί η ψήκτρα επάνω στο συλλέκτη να μην είναι πολύ μεγάλη, γιατί τότε θα φθαρεί γρήγορα η ψήκτρα, αλλά ούτε και πολύ μικρή, γιατί τότε δεν θα έχομε καλή επαφή μεταξύ συλλέκτη και ψήκτρας.

Οι ψήκτρες (σχ. 2.5ια) είναι κατασκευασμένες από σκληρό άνθρακα ή από γραφίτη (φυσικό άνθρακα) ή από μίγμα άνθρακα και χαλκού (μεταλλικές ψήκτρες). Στο ένα άκρο της ψήκτρας στερεώνεται ένα ευλύγιστο χάλκινο σύρμα, όπως φαίνεται στο σχήμα, που χρησιμεύει για να οδηγεί το ηλεκτρικό ρεύμα στον αγωγό που τη συνδέει όπως είπαμε με ένα από τους ακροδέκτες της μηχανής.

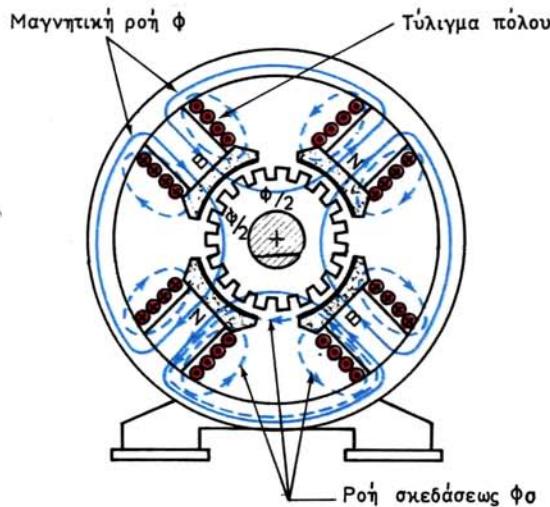
2.6 Διέγερση των μηχανών συνεχούς ρεύματος.

Μόνο στις πολύ μικρές μηχανές συνεχούς ρεύματος, το μαγνητικό πεδίο, μέσα στο οποίο περιστρέφεται το επαγώγικό τύμπανο, δημιουργείται από μόνιμο μαγνητικό σαν αυτόν του σχήματος 2.1γ. Σε όλες τις άλλες μηχανές συνεχούς ρεύματος, το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από τους μαγνητικούς πόλους (σχ. 2.5β και σχ. 2.5γ), τα τυλίγματα των οποίων τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα, δηλαδή από ηλεκτρομαγνήτες.

Στο σχήμα 2.6α παριστάνεται μια διπολική μηχανή της οποίας τα δυο τυλίγματα των πόλων έχουν συνδεθεί σε σειρά και τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα από την πηγή Π. Δημιουργείται έτσι, ένα μαγνητικό πεδίο του οποίου οι μαγνητικές γραμμές ακολουθούν τη διαδρομή που φαίνεται στο σχήμα (μπλε γραμμές). Με το γνωστό από την Ηλεκτροτεχνία **κανόνα του δεξιόστροφου κοχλία** προσδιορίζομε την κατεύθυνση των μαγνητικών γραμμών. Στην περίπτωση της μηχανής του σχήματος ο κάτω πόλος θα είναι βόρειος και ο επάνω νότιος. Αν αλλάξομε τη φορά του ρεύματος που δίνει η πηγή, η πολικότητα των μαγνητικών πόλων αλλάζει.



Σχ. 2.6α.
Διέγερση διπολικής μηχανής.



Σχ. 2.6β.
Διέγερση τετραπολικής μηχανής.

Η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου από το ηλεκτρικό ρεύμα λέγεται **διέγερση** της μηχανής. Το σύνολο των τυλιγμάτων των μαγνητικών πόλων ονομάζεται **τύλιγμα διεγέρσεως** και το ηλεκτρικό ρεύμα που περνά μέσα από αυτό το λέμε **ρεύμα διεγέρσεως** της μηχανής.

Από όλη τη μαγνητική ροή που διαρρέει ένα μαγνητικό πόλο, **χρήσιμη** είναι η ροή εκείνη Φ που περνά το διάκενο, το επαγωγικό τύμπανο, το άλλο διάκενο, τον άλλο πόλο και τελικά επιστρέφει μέσα από το ζύγωμα. Η ροή αυτή είναι που δημιουργεί την ηλεκτρεγερτική δύναμη στις γεννήτριες ή τις δυνάμεις στους κινητήρες. Ένα μικρό μέρος της μαγνητικής ροής κάθε πόλου, που ονομάζεται **ροή σκεδάσεως**, Φ_s , δεν ακολουθεί την παραπάνω διαδρομή αλλά ευκολότερους δρόμους όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6α.

Το σχήμα 2.6β δείχνει τη διέγερση μιας τετραπολικής μηχανής συνεχούς ρεύματος. Στο σχήμα αυτό τα τυλίγματα των μαγνητικών πόλων παριστάνονται σε τομή. Όπως παρατηρούμε, το ρεύμα διεγέρσεως μέσα στα τυλίγματα έχει τέτοια φορά ώστε οι πόλοι που δημιουργούνται να είναι διαδοχικά: βόρειος, νότιος, βόρειος νότιος. Αυτό ισχύει και για μηχανές με περισσότερους από τέσσερεις πόλους. Η μαγνητική ροή που βγαίνει από ένα πόλο διαμοιράζεται έτσι, στους δύο ετερώνυμους γειτονικούς της.

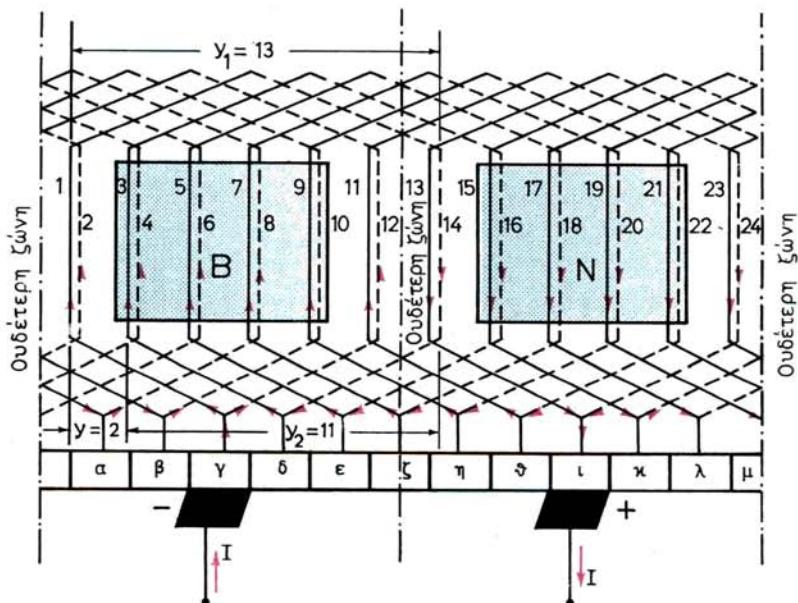
2.7 Τυλίγματα μηχανών συνεχούς ρεύματος.

Η στοιχειώδης γεννήτρια του εδαφίου 2.1.4 με τη μια σπείρα από δυο αγωγούς στο επαγωγικό τύμπανο, παράγει πολύ μικρή ηλεκτρεγερτική δύναμη. Επίσης το ρεύμα που είναι δυνατό να μας δώσει έχει σημαντική κυμάτωση. Στις πραγματικές μηχανές συνεχούς ρεύματος το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου αποτελείται από πολλές ομάδες (σχ. 2.5ζ), που κάθε μια έχει πολλές σπείρες. Οι ομάδες αυτές

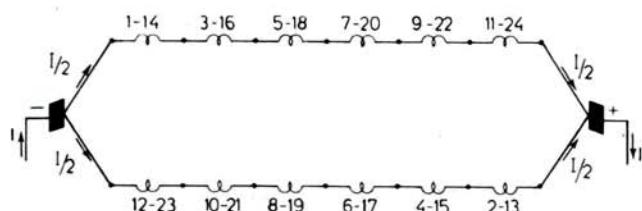
είναι ομοιόμορφα διανεμημένες σε όλη την κυλινδρική επιφάνεια του επαγωγικού τυμπάνου και τα στοιχεία τους είναι τοποθετημένα στα αυλάκια των οδοντώσεων του (σχ. 2.5η). Έτσι, έχομε γεννήτριες που δίνουν σημαντική ηλεκτρεγερτική δύναμη και ρεύμα σχεδόν χωρίς κυμάτωση και κινητήρες που αναπτύσσουν σημαντική και σταθερή ροπή περιστροφής.

Ανάλογα με τον τρόπο που τα άκρα των ομάδων συνδέονται στους τομείς του συλλέκτη, τα τυλίγματα των μηχανών συνεχούς ρεύματος τα διακρίνομε σε **θροχοτύλιγματα** και **κυματοτυλίγματα**.

Στο σχήμα 2.7α δείχνεται το ανάπτυγμα «θροχοτύλιγματος» διπολικής μηχανής. Παρατηρούμε ότι οι αγωγοί των ομάδων τυλιγμάτων έχουν μορφή «θρόχων» π.χ. 1-14, 3-16 κλπ. Οι θρόχοι αυτοί καταλλήγουν στους τομείς του συλλέκτη. Όταν οι ψήκτρες έχουν την θέση που δείχνεται στο σχήμα 2.7α, οι αγωγοί του τυλίγματος συνδέονται όπως δείχνεται στο σχήμα 2.7β, σχηματίζοντας δυο «παράλληλους κλάδους».

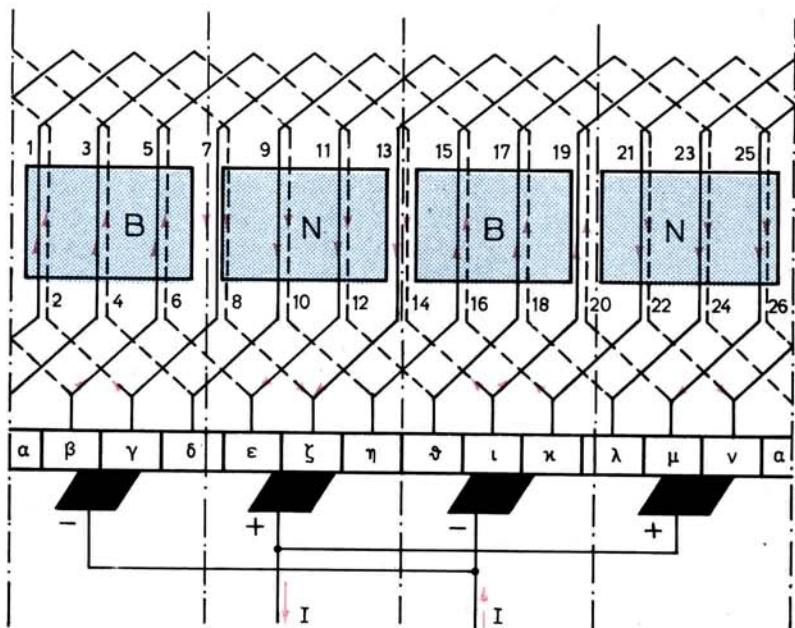


Σχ. 2.7α.
Βροχοτύλιγμα διπολικής μηχανής.



Σχ. 2.7β.
Παράλληλοι κλάδοι θροχοτύλιγματος.

Στο σχήμα 2.7γ δείχνεται το ανάπτυγμα «κυματοτυλίγματος» τετραπολικής μηχανής. Παρατηρούμε ότι οι αγωγοί των ομάδων τυλιγμάτων έχουν «κυματοειδή» μορφή, π.χ. 1-8, 13-20 κλπ. ή 3-10, 15-22 κλπ.



Σχ. 2.7γ.
Κυματοτύλιγμα τετραπολικής μηχανής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

3.1 Λειτουργία γεννήτριας χωρίς φορτίο.

Στο εδάφιο 2.1.2 είδαμε ποια σχέση δίνει το μέγεθος της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως μιας σπείρας του επαγωγικού τυμπάνου για τη στοιχειώδη γεννήτρια που εξετάσαμε εκεί. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη Ε μιας πραγματικής γεννήτριας συνεχούς ρεύματος δίνεται από την ακόλουθη σχέση, της οποίας παραλείπομε την απόδειξη:

$$E = \frac{p \cdot s \cdot w}{a} \cdot \Phi \cdot n \quad \text{σε V}$$

όπου: Φ είναι η χρήσιμη μαγνητική ροή κάθε πόλου σε Vs,
n η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε στρ/ς,
p ο αριθμός των ζευγών μαγνητικών πόλων της μηχανής,
s ο αριθμός των στοιχείων του τυλίγματος,
w ο αριθμός των αγωγών σε κάθε στοιχείο και
a ο άριθμός των ζευγών παραλλήλων κλάδων του τυλίγματος.

Την παραπάνω σχέση μπορούμε να τη γράψουμε και ως εξής:

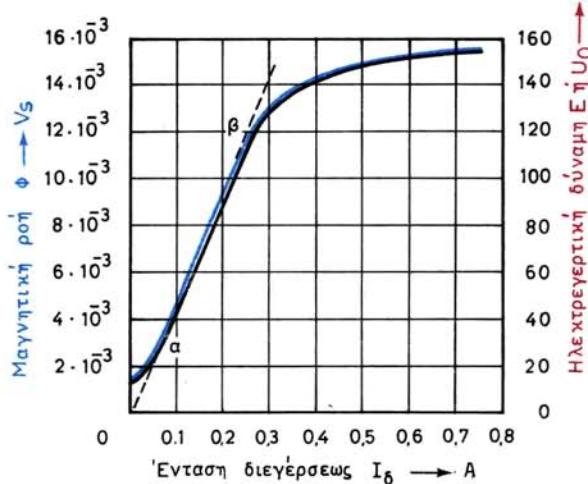
$$E = K \cdot \Phi \cdot n \quad \text{σε V}$$

όπου $K = p \cdot s \cdot w / a$ είναι ένα σταθερό μέγεθος για κάθε μηχανή,
Φ είναι η μαγνητική ροή κάθε πόλου σε Vs και
n η ταχύτητα περιστροφής σε στρ/ς.

Η σχέση αυτή μας λέει ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη μιας γεννήτριας είναι ανάλογη με τη μαγνητική ροή κάθε πόλου και με τον αριθμό στροφών ανά δευτερόλεπτο της μηχανής.

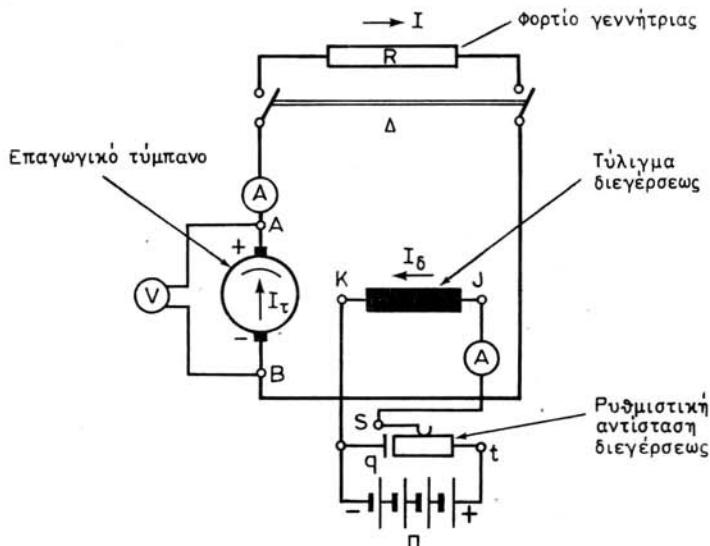
Σε μια ηλεκτρική μηχανή η μαγνητική ροή των πόλων παράγεται από τα **αμπερελίγματα διεγέρσεως**. Επειδή τα ελίγματα διεγέρσεως είναι σταθερά, συμπεραίνομε ότι η μαγνητική ροή Φ εξαρτάται από την ένταση διεγέρσεως I_d . Η εξάρτηση αυτή φαίνεται στο σχήμα 3.1a και δίνεται από μια καμπύλη που ονομάζεται **μαγνητική χαρακτηριστική**.

Όταν η ένταση διεγέρσεως είναι μηδενική, η μαγνητική ροή δεν μηδενίζεται. Αυτό οφείλεται στον **παραμένοντα μαγνητισμό** της μηχανής. Από το σημείο α μέχρι το σημείο β η καμπύλη είναι ευθεία. Από το σημείο β αρχίζει **ο κορεασμός του μαγνητικού κυκλώματος**. Είναι το γόνατο της καμπύλης και γύρω από αυτό εργάζονται οι μηχανές. Η ίδια καμπύλη του σχήματος 3.1a με την κλίμακα που είναι δεξιά παριστάνει και τη μεταβολή της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως της γεννήτριας, αφού όπως είπαμε τα μεγέθη Φ και E είναι ανάλογα, όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι σταθερη.

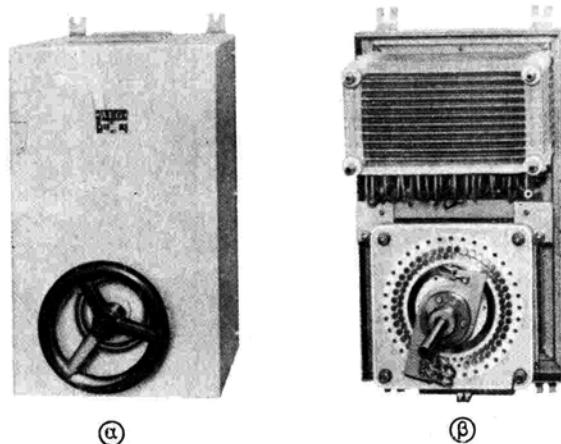


Σχ. 3.1α.
Μαγνητική και στατική χαρακτηριστική.

Την καμπύλη μεταβολής της E όταν μεταβάλλεται η ένταση διεγέρσεως I_d , που ονομάζεται και **στατική χαρακτηριστική** της γεννήτριας, μπορούμε να τη χαράξουμε μετρώντας την τάση χωρίς φορτίο U_0 της γεννήτριας για τις διάφορες τιμές της έντασεως διεγέρσεως I_d (σχ. 3.1β). Η τάση χωρίς φορτίο της γεννήτριας (τάση εν κενώ), δηλαδή η τάση που μετράμε μεταξύ των ψηκτρών της A και B με ένα βολτόμετρο V , όταν η γεννήτρια δεν τροφοδοτεί φορτίο (ο διακόπτης Δ είναι ανοικτός) είναι ίση με την ηλεκτρεγερτική της δύναμη E .



Σχ. 3.1β.
Λειτουργία γεννήτριας.



Σχ. 3.1γ.

Ρυθμιστική αντίσταση διεγέρσεως: α) Με κάλυμμα και χειροστρόφαλο. β) Χωρίς κάλυμμα

Η μεταβολή της I_d μπορεί να γίνει με τη **ρυθμιστική αντίσταση διεγέρσεως** όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1β. Η ρυθμιστική αυτή αντίσταση, που είναι συνήθως στροφαλοφόρος (σχ. 3.1γ) έχει εκτός από τους δύο κύριους ακροδέκτες s και t και ένα τρίτο τον q που συνδέεται μέσω του αγωγού m με το άκρο K του τυλίγματος διεγέρσεως. Έτσι, όταν θέλουμε να διακόψουμε το ρεύμα διεγέρσεως μεταφέρομε την κινητή επαφή s στο q . Με αυτό τον τρόπο βραχυκυκλώνουμε τα άκρα του τυλίγματος διεγέρσεως και αποφεύγουμε τη δημιουργία σπινθήρων στις επαφές της ρυθμιστικής αντιστάσεως, τη στιγμή που διακόπτεται το ρεύμα διεγέρσεως.

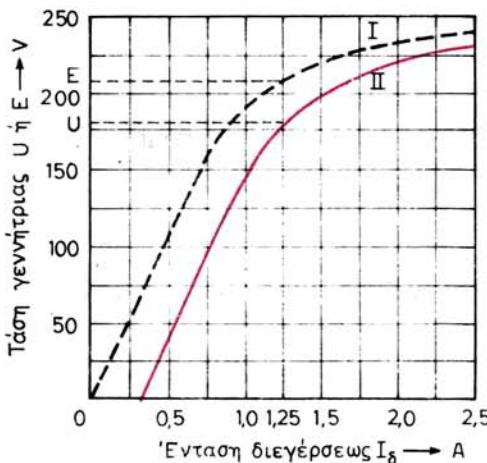
3.2 Λειτουργία γεννήτριας με φορτίο.

Αν στη γεννήτρια του σχήματος 3.1β κλείσουμε το διακόπτη Δ , τότε το φορτίο R θα συνδεθεί στους ακροδέκτες A και B του επαγγειακού της τυμπάνου. Τώρα η γεννήτρια **εργάζεται με φορτίο**. Η **ένταση φορτίσεως** I , που διαρρέει την R , περνά και μέσα από τους αγωγούς του επαγγειακού τυμπάνου της γεννήτριας ($I=I_T$). Αν υποθέσουμε ότι είχαμε μετρήσει την τάση E κενώ $U_0=E$ της γεννήτριας μεταξύ των ακροδεκτών A και B προτού συνδέσουμε το φορτίο R , θα δούμε ότι τώρα η τάση U που δείχνει το βολτόμετρο είναι μικρότερη από την E για την ίδια έκταση διεγέρσεως. Η διαφορά μάλιστα $E-U$ είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση φορτίσεως I . Δυο είναι οι λόγοι στους οποίους οφείλεται η διαφορά.

Ο πρώτος είναι ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη E_ϕ της γεννήτριας, όταν εργάζεται με φορτίο, για λόγους που θα εξηγήσουμε στο επόμενο εδάφιο 3.2.1, είναι μικρότερη από την E για την ίδια ένταση διεγέρσεως και την ίδια ταχύτητα περιστροφής.

$$E_\phi < E$$

Ο δεύτερος είναι ότι η τάση U είναι μικρότερη και από την E_ϕ , για την ίδια ένταση διεγέρσεως (και τον ίδιο αριθμό στροφών), κατά την **εσωτερική πτώση τάσεως** που δημιουργεί η ένταση I_T μέσα στους αγωγούς του τυλίγματος του επαγγειακού τυμπάνου:



Σχ. 3.2a.
Στατική χαρακτηριστική (I) και εξωτερική χαρακτηριστική (II).

$$U = E_\phi - R_T \cdot I_T$$

όπου R_T η ωμική αντίσταση του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου σε Ω και I_T η ένταση σε A του επαγωγικού τυμπάνου, που εδώ είναι ίση με την ένταση φορτίσεως της μηχανής.

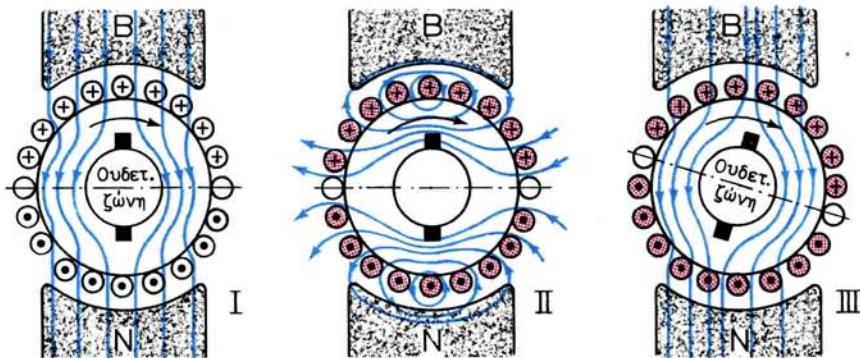
Η καμπύλη II του σχήματος 3.2a δείχνει πώς μεταβάλλεται η τάση της γεννήτριας, όταν μεταβάλλεται η ένταση διεγέρσεως I_δ με σταθερή την ένταση φορτίσεως και την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται **εξωτερική χαρακτηριστική** της γεννήτριας. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η στατική χαρακτηριστική της ίδιας γεννήτριας (καμπύλη I) που δείχνει, όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, τη μεταβολή της τάσεως εν κενώ E. Για μια ορισμένη ένταση διεγέρσεως, η διαφορά της U από την E δείχνει πόσο ελαττώνεται η τάση της γεννήτριας κατά τη φόρτιση, με την ένταση φορτίου, για την οποία έχει χαραχθεί η καμπύλη II. Π.χ. για ένταση διεγέρσεως $I_\delta = 1,25$ A έχομε από τις καμπύλες του σχήματος:

$$E=210 \text{ V} \quad \text{και} \quad U=180 \text{ V} \quad \text{ή} \quad E-U=210-180=30 \text{ V}$$

3.2.1 Αντίδραση του επαγωγικού τυμπάνου και τρόποι αντιμετωπίσεώς της.

Όπως αναφέραμε στην αρχή της παραγράφου 3.2, η ένταση φορτίσεως I που περνά μέσα από το φορτίο, περνά και μέσα από τους αγωγούς του επαγωγικού τυμπάνου. Είναι γνωστό όμως από την Ηλεκτροτεχνία ότι όταν αγωγοί διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργούν γύρω τους μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν οι αγωγοί του επαγωγικού τυμπάνου έχει σαν αποτέλεσμα να παραμορφώνει το κύριο μαγνητικό πεδίο της μηχανής. Αυτή είναι η ονομαζόμενη **αντίδραση του επαγωγικού τυμπάνου**.

Στο σχήμα 3.2β (II) είναι σχεδιασμένο το κύριο μαγνητικό πεδίο (με μπλε γραμ-



Σχ. 3.2β.

Αντίδραση του επαγωγικού τυμπάνου γεννήτριας.

μέσ) και οι αγωγοί του επαγωγικού τυμπάνου με τις ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις που δημιουργούνται σε αυτούς από επαγωγή. Το σχήμα 3.2β (II) δείχνει τους αγωγούς του επαγωγικού τυμπάνου, όταν η μηχανή εργάζεται με φορτίο, να διαρρέονται από εντάσεις της ίδιας φοράς με τις ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις. Δημιουργούν τότε ένα δικό τους μαγνητικό πεδίο, όπως είναι σχεδιασμένο (επίσης με μπλε γραμμές) στο σχήμα.

Τέλος στο σχήμα 3.2β (III) φαίνεται η παραμόρφωση που παθαίνει το κύριο μαγνητικό πεδίο από την αντίδραση του επαγωγικού τυμπάνου. Συνέπεια αυτού είναι να μετατοπισθεί η ουδέτερη ζώνη, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Οι ψήκτρες για να πληρούν τον προορισμό τους πρέπει να μετατοπισθούν σε μια θέση κάθετη προς τη νέα ουδέτερη ζώνη. Αν δεν γίνει αυτό θα έχομε κατά τη λειτουργία της μηχανής σπινθηρισμούς ανάμεσα στο συλλέκτη και τις ψήκτρες. Η μετάθεση αυτή πρέπει να είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο της μηχανής, αφού το μέγεθος της παραμορφώσεως του κύριου μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος του επαγωγικού τυμπάνου. Παρατηρούμε ακόμα από το σχήμα 3.2β (III), ότι στις γεννήτριες η μετάθεση των ψηκτρών πρέπει να γίνεται κατά τη φορά περιστροφής του τυμπάνου της μηχανής. Στην πράξη τις ψήκτρες τις μεταθέτομε στρέφοντας τον ψηκτροφορέα κατά μια σταθερή γωνία, ώστε να μην έχομε σπινθηρισμούς στο **κανονικό φορτίο** της μηχανής.

Μια άλλη συνέπεια που έχει η αντίδραση του επαγωγικού τυμπάνου και η μετάθεση των ψηκτρών είναι ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη της μηχανής υπό φορτίο E_F είναι μικρότερη από την ηλεκτρεγερτική δύναμη E που έχει όταν εργάζεται χωρίς φορτίο με την ίδια ένταση διεγέρσεως, όπως αναφέραμε και στην αρχή της παραγράφου 3.2.

Οι κατασκευαστές των μηχανών συνεχούς ρεύματος, εκτός από τη μετάθεση των ψηκτρών, που εφαρμόζεται σε μικρές σχετικά μηχανές, παίρνουν και διάφορα άλλα μέτρα για να αντιμετωπίσουν τις επιδράσεις που έχει η αντίδραση του επαγωγικού τυμπάνου. Τέτοια μέτρα είναι η κατάλληλη διαμόρφωση των πυρήνων των πόλων, η τοποθέτηση τυλιγμάτων αντισταθμίσεως και η τοποθέτηση βοηθητικών μαγνητικών πόλων.

3.3 Είδη γεννητριών συνεχούς ρεύματος.

Στη μηχανή του σχήματος 3.1β είχαμε δεχθεί ότι η διέγερσή της τροφοδοτείται από μια ξένη πηγή Π. Στην πραγματικότητα αυτό συμβαίνει σπάνια, γιατί το τύλιγμα διεγέρσεως είναι δυνατό να τροφοδοτηθεί και από την ίδια τη γεννήτρια και μάλιστα με διάφορους τρόπους. Ανάλογα με τον τρόπο που είναι συνδεμένο το τύλιγμα διεγέρσεως, τις γεννήτριες τις διακρίνομε σε τέσσερα είδη:

- α) Γεννήτριες με ξένη διέγερση.
- β) Γεννήτριες με παράλληλη διέγερση.
- γ) Γεννήτριες με διέγερση σειρας.
- δ) Γεννήτριες με σύνθετη διέγερση.

Εκτός από τις γεννήτριες με ξένη διέγερση, όλες οι άλλες ονομάζονται και **αυτοδιεγειρόμενες** γεννήτριες, για το λόγο ότι αυτές δίνουν το ρεύμα που χρειάζεται η διέγερσή τους.

3.3.1 Γεννήτριες με ξένη διέγερση.

Η συνδεσμολογία μιας γεννήτριας με ξένη διέγερση φαίνεται στο σχήμα 3.1β. Στο σχήμα αυτό το τύλιγμα διεγέρσεως παριστάνεται με το K-J.

Αν αλλάξομε τη φορά του ρεύματος διεγέρσεως σε μια γεννήτρια με ξένη διέγερση, η πολικότητα της μηχανής αλλάζει. Δηλαδή οι θετικές ψήκτρες γίνονται αρνητικές και οι αρνητικές γίνονται θετικές. Το ίδιο αποτέλεσμα έχει και η αλλαγή της φοράς περιστροφής του επαγωγικού τυμπάνου της μηχανής. Η πολικότητά της πάλι αλλάζει. Αν αλλάξομε όμως και τη φορά του ρεύματος διεγέρσεως και τη φορά περιστροφής, η πολικότητα της μηχανής δεν αλλάζει. Όλα αυτά επαληθεύονται εύκολα με τη βοήθεια και όσων αναφέραμε στο εδάφιο 2.1.4.

Η σχέση που δίνει την τάση U της γεννήτριας με ξένη διέγερση, όταν εργάζεται με φορτίο εντάσεως I, η οποία στην περίπτωση αυτή ισούται με την ένταση I_T που περνά από το επαγωγικό της τύμπανο είναι (παράγρ. 3.2):

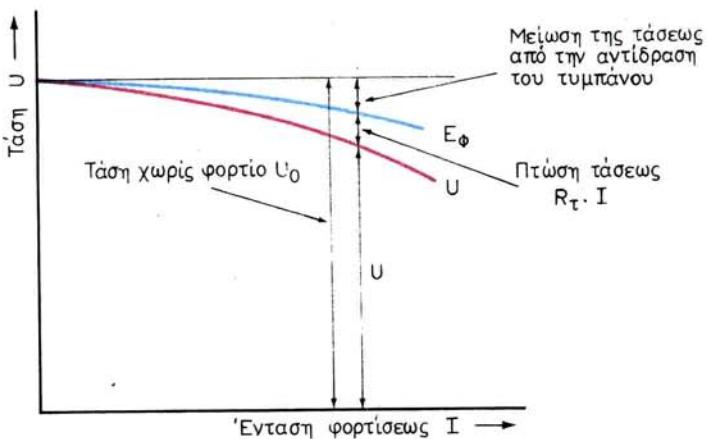
$$U = E_\phi - R_T \cdot I$$

Όπως παρατηρούμε η U εξαρτάται από την I αφού τόσο η ηλεκτρεγερτική δύναμη της μηχανής υπό φορτίο E_ϕ , όσο και η πτώση τάσεως στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου R_T . Ι εξαρτώνται από την ένταση φορτίσεως I.

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.3α έχει σχεδιασθεί η **χαρακτηριστική φορτίου** μιας γεννήτριας με ξένη διέγερση. Είναι η καμπύλη (κόκκινη) που μας δείχνει πως μεταβάλλεται η τάση της μηχανής U όταν μεταβάλλεται η ένταση φορτίσεως της I, ενώ η ένταση διεγέρσεως I_δ και ο αριθμός στροφών ανά δευτερόλεπτο της μηχανής μένουν σταθερά. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται η καμπύλη (μπλε) μεταβολής της E_ϕ με την ένταση φορτίσεως I. Όπως βλέπομε και από τη χαρακτηριστική φορτίου, όταν μεγαλώνει η ένταση φορτίσεως, η τάση της μηχανής πέφτει.

Αν U_0 είναι η τάση της γεννήτριας όταν εργάζεται χωρίς φορτίο και U_N η τάση της όταν εργάζεται με το πλήρες φορτίο της, δηλαδή όταν δίνει την ισχύ για την οποία είναι κατασκευασμένη, την επί τοις εκατό διαφορά:

$$\epsilon\% = \frac{U_0 - U_N}{U_N} \cdot 100\%$$



Σχ. 3.3α.
Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας με ξένη διέγερση.

την ονομάζομε **διακύμανση τάσεως** της γεννήτριας. Στις γεννήτριες ξένης διεγέρσεως η διακύμανση τάσεως είναι $5 \div 10\%$, όταν λειτουργούν με την κανονική τους ένταση διεγέρσεως και τις κανονικές τους στροφές.

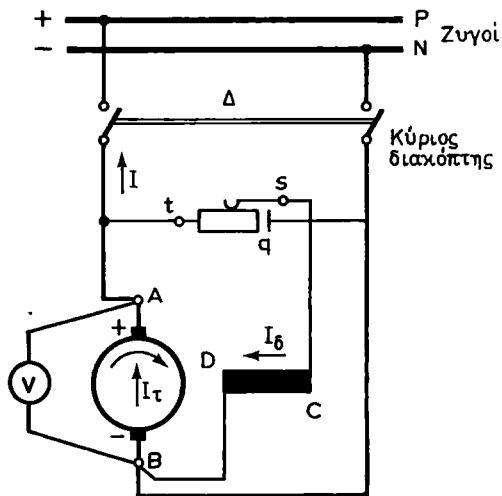
Αν θέλομε να διατηρούμε σταθερή την τάση της γεννήτριας όταν αυξάνεται το φορτίο, θα πρέπει να αυξάνουμε την ένταση διεγέρσεως.

Οι γεννήτριες με ξένη διέγερση χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση της διεγέρσεως των πολύ μεγάλων γεννήτριών εναλλασσόμενου ρεύματος και σε ορισμένες περιπτώσεις για ηλεκτροσυγκολλήσεις.

3.3.2 Γεννήτριες με παράλληλη διέγερση.

Το σχήμα 3.3β δείχνει τη συνδεσμολογία μιας γεννήτριας με παράλληλη διέγερση. Όπως παρατηρούμε εδώ, το τύλιγμα διενέσσεως D-C είναι συνδεμένο παράλληλα προς το επαγωγικό τύμπανο A-B της μηχανής. Η σύνδεση γίνεται μέσω μιας ρυθμιστικής αντιστάσεως που χρησιμεύει για τη ρύθμιση της εντάσεως διεγέρσεως. Το φορτίο της μηχανής έχει αντικατασταθεί από τους ζυγούς P και N, που βρίσκονται στον **πίνακα ελέγχου** της γεννήτριας και από τους οποίους τροφοδοτείται η **κατανάλωση**. Στον πίνακα ελέγχου βρίσκεται και η ρυθμιστική αντίσταση διεγέρσεως που αναφέραμε παραπάνω.

Η **αυτοδιέγερση** των γεννητριών αυτών πραγματοποιείται με τη βοήθεια του μαγνητισμού που παραμένει στους μαγνητικούς πόλους και όταν δεν περνά ρεύμα μέσα από το τύλιγμα διεγέρσεως. Χωρίς να κάνουμε αναλυτική ανάπτυξη του φαινομένου, αναφέρομε μόνο ότι ο μαγνητισμός που παραμένει δημιουργεί ένα αδύνατο μαγνητικό πεδίο μέσα στη μηχανή, που είναι όμως αρκετό, όταν θέσομε σε περιστροφή το επαγωγικό τύμπανο, να δημιουργήσει μεταξύ των ακροδεκτών A και B μία μικρή τάση. Η τάση αυτή δημιουργεί ένα αδύνατο ρεύμα μέσα στο τύλιγμα διεγέρσεως C - D (ο διακόπτης Δ είναι ανοικτός και συνεπώς το φορτίο ακόμα δεν έχει συνδεθεί), το οποίο ενισχύει το μαγνητικό πεδίο. Αυτό έχει σαν συνέπεια να δημιουργηθεί τώρα μια μεγαλύτερη τάση μεταξύ A και B, η οποία δημιουργεί



Σχ. 3.3β.
Γεννήτρια με παράλληλη διέγερση.

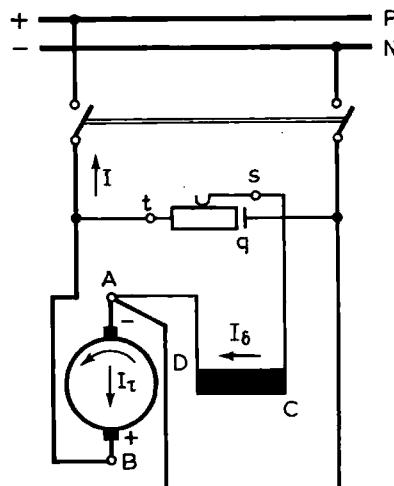
ένα ισχυρότερο ρεύμα μέσα στο τύλιγμα διεγέρσεως κ.ο.κ. Με τον τρόπο αυτό αυτοδιεγέρεται η γεννήτρια. Την τάση στην οποία θέλομε να φθάσει την κανονίζομε με τη ρυθμιστική αντίσταση διεγέρσεως.

Από τα παραπάνω συμπεραίνομε ότι για να μπορέσει να αυτοδιεγερθεί μια γεννήτρια πρέπει η φορά περιστροφής του τυμπάνου της να είναι τέτοια, ώστε το αδύνατο ρεύμα, που δημιουργεί στο τύλιγμα διεγέρσεως η τάση που παράγεται από τον παραμένοντα μαγνητισμό, να έχει διεύθυνση που να ενισχύει το μαγνητικό πεδίο. Διαφορετικά η μηχανή χάνει τον παραμένοντα μαγνητισμό της και δεν αυτοδιεγέρεται. Το εργοστάσιο κατασκευής κάθε γεννήτριας έχει δώσει μια ορισμένη πολικότητα στον παραμένοντα μαγνητισμό της. Άρα, η φορά περιστροφής μιας έτοιμης γεννήτριας είναι καθορισμένη από την πολικότητα αυτή.

Αν σε μια έτοιμη γεννήτρια με παράλληλη διέγερση θελήσουμε να αλλάξουμε τη φορά περιστροφής, που, όπως είπαμε, έχει καθορισθεί από τον κατασκευαστή της, πρέπει να αλλάξουμε και τη σύνδεση των άκρων του τυλίγματος διεγέρσεως με τους ακροδέκτες του τυμπάνου. Η αλλαγή αυτή στη σύνδεση του τυλίγματος διεγέρσεως πρέπει να γίνει έτσι, ώστε το ρεύμα διεγέρσεως να εξακολουθήσει να έχει την ίδια διεύθυνση που είχε πριν αλλάξει η φορά περιστροφής. Έτσι, η μηχανή δεν θα χάσει τον παραμένοντα μαγνητισμό της και θα μπορεί να αυτοδιεγέρεται. Όταν όμως αλλάξουμε τη φορά περιστροφής του τυμπάνου μιας γεννήτριας και κρατήσουμε την ίδια διεύθυνση στο ρεύμα διεγέρσεως, όπως ξέρουμε (εδάφιο 2.1.4) η πολικότητα της μηχανής θα αλλάξει.

Το σχήμα 3.3γ δείχνει τη συνδεσμολογία που πρέπει να κάνουμε στη γεννήτρια του σχήματος 3.3β όταν θελήσουμε να αλλάξουμε τη φορά περιστροφής της.

Η σύνδεση του φορτίου σε μια γεννήτρια με παράλληλη διέγερση πρέπει να γίνεται αφού η γεννήτρια αποκτήσει πρώτα την κανονική της τάση, διαφορετικά εμποδίζεται η αυτοδιεγέρση της μηχανής. Όταν η γεννήτρια εργάζεται με φορτίο, ο-



Σχ. 3.3γ.

Αλλαγή φοράς περιστροφής σε γεννήτρια με παράλληλη διέγερση.

πως και στις γεννήτριες με ξένη διέγερση (παράγρ. 3.2), για την τάση U της μηχανής έχομε:

$$U = E_\phi - R_T \cdot I_T \quad \text{σε } V$$

όπου: E_ϕ η ηλεκτρεγερτική δύναμη σε V της μηχανής υπό φορτίο,

R_T η ωμική αντίσταση σε Ω του τυλίγματος του τυμπάνου και

I_T η ένταση σε A που περνά μέσα από το τύμπανο.

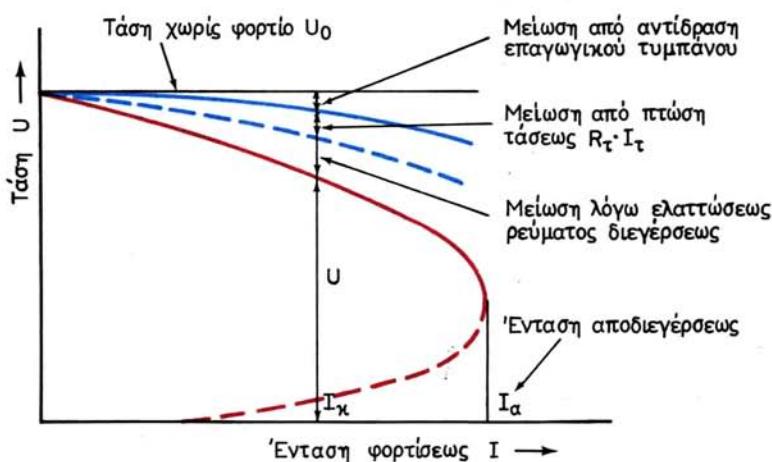
Εδώ η ένταση του τυμπάνου είναι ίση με το άθροισμα της εντάσεως του φορτίου I και της εντάσεως διεγερσέως I_δ :

$$I_T = I + I_\delta$$

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.3δ φαίνεται (κόκκινη καμπύλη) πώς μεταβάλλεται η τάση U μιας γεννήτριας με παράλληλη διέγερση, όταν μεταβάλλεται η ένταση φορτίσεως της μηχανής, χωρίς να μεταβάλλεται η θέση του στροφάλου στη ρυθμιστική αντίσταση διεγέρσεως και οι στροφές της μηχανής. Όπως παρατηρούμε, η μείωση της τάσεως με το φορτίο είναι εδώ μεγαλύτερη από ό,τι στις γεννήτριες με ξένη διέγερση (σχ. 3.3α), γιατί εκτός από την αντίδραση του επαγγειακού τυμπάνου και την πτώση τάσεως στο τύλιγμά του, έχομε και μια τρίτη αιτία για τη μείωση της τάσεως. Εδώ το τύλιγμα διεγέρσεως τροφοδοτείται από την τάση της γεννήτριας. Όταν λοιπόν η τάση αυτή μειώνεται από τις δυο προηγούμενες αιτίες, όσο αυξάνει το φορτίο θα μειώνεται και η τάση που επιβάλλεται στο τύλιγμα διεγέρσεως. Δηλαδή όσο αυξάνει το φορτίο έχομε μείωση του ρεύματος διεγέρσεως με συνέπεια πρόσθετη μείωση της τάσεως.

Όπως αναφέραμε παραπάνω, η διακύμανση της τάσεως στις γεννήτριες με παράλληλη διέγερση, για σταθερές στροφές ανά δευτερόλεπτο και σταθερή αντίσταση διεγέρσεως είναι μεγαλύτερη από ό,τι στις γεννήτριες με ξένη διέγερση. Μπορούμε όμως και εδώ να ελαττώσουμε τη διακύμανση αυτή ή και να τη μηδενίσουμε,

αν μεταβάλλομε κατάλληλα τη ρυθμιστική αντίσταση διεγέρσεως.



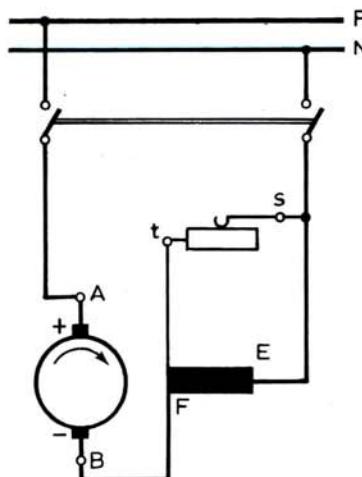
Σχ. 3.3δ.

Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας με παράλληλη διέγερση.

Όταν η ένταση φορτίσεως της γεννήτριας αυξηθεί πολύ πάνω από την κανονική της τιμή I_k και φθάσει μια ορισμένη για κάθε μηχανή τιμή I_a , η γεννήτρια θα αποδιερθεί και η τάση της θα μηδενισθεί (σχ. 3.3δ).

3.3.3 Γεννήτριες με διέγερση σειράς.

Στις γεννήτριες αυτές το τύλιγμα διεγέρσεως E-F συνδέεται σε σειρά με το φορτίο της μηχανής και τροφοδοτείται από την ίδια τη γεννήτρια (σχ. 3.3ε).



Σχ. 3.3ε.

Γεννήτρια με διέγερση σειράς.

Η αυτοδιέγερσή τους γίνεται όπως και στις γεννήτριες με παράλληλη διέγερση. Η μόνη διαφορά είναι ότι εδώ το φορτίο πρέπει να είναι συνδεμένο στη γεννήτρια από την αρχή, ώστε να μπορεί να περάσει ρεύμα μέσα από το τύλιγμα διεγέρσεως και να αυτοδιεγερθεί η μηχανή. Η ρυθμιστική αντίσταση διεγέρσεως, που βρίσκεται στον πίνακα ελέγχου της μηχανής, συνδέεται παράλληλα με το τύλιγμα διεγέρσεως, όπως φαίνεται στο σχήμα, και χρησιμεύει για να μεταβάλλουμε την ένταση διεγέρσεως και συνεπώς και την τάση της μηχανής.

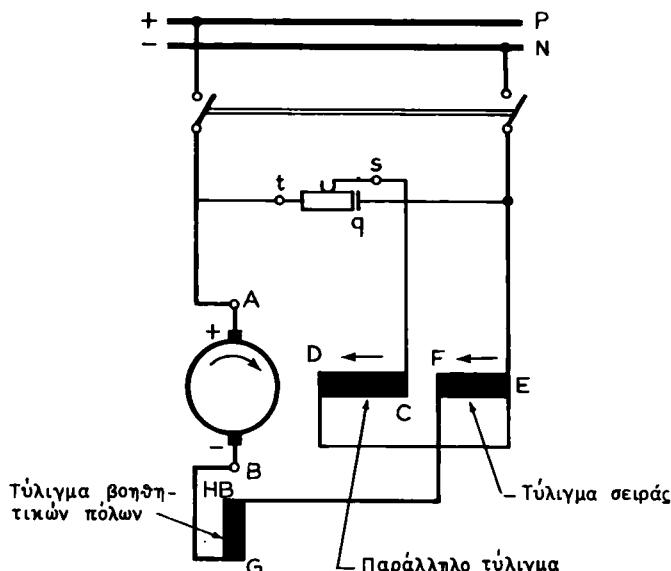
Όσα αναφέραμε για την αλλαγή της φοράς περιστροφής και τον παραμένοντα μαγνητισμό στις γεννήτριες με παράλληλη διέγερση ισχύουν και για τις γεννήτριες με διέγερση σειράς.

Γεννήτριες με διέγερση σειράς πολύ σπάνια χρησιμοποιούνται.

3.3.4 Γεννήτριες με σύνθετη διέγερση.

Στις γεννήτριες αυτές το τύλιγμα κάθε κύριου πόλου αποτελείται από δυο μέρη, το παράλληλο τύλιγμα και το τύλιγμα σειράς, όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 2.5. Τα τυλίγματα αυτά συνδέονται όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3στ., δηλαδή τα παράλληλα τυλίγματα των πόλων, όπως στις γεννήτριες με παράλληλη διέγερση και τα τυλίγματα σειράς όπως στις γεννήτριες με διέγερση σειράς. Η τάση της γεννήτριας ρυθμίζεται με τη ρυθμιστική αντίσταση διεγέρσεως που συνδέεται στο παράλληλο τύλιγμα.

Η γεννήτρια του σχήματος 3.3στ. έχει και βοηθητικούς πόλους. Το τύλιγμά τους G - HB συνδέεται σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο της μηχανής και γι' αυτό όπιας και το τύλιγμα σειράς των κυρίων πόλων, αποτελείται από λίγες σπείρες χον-



Σχ. 3.3στ.
Γεννήτρια με σύνθετη διέγερση και βοηθητικούς πόλους.

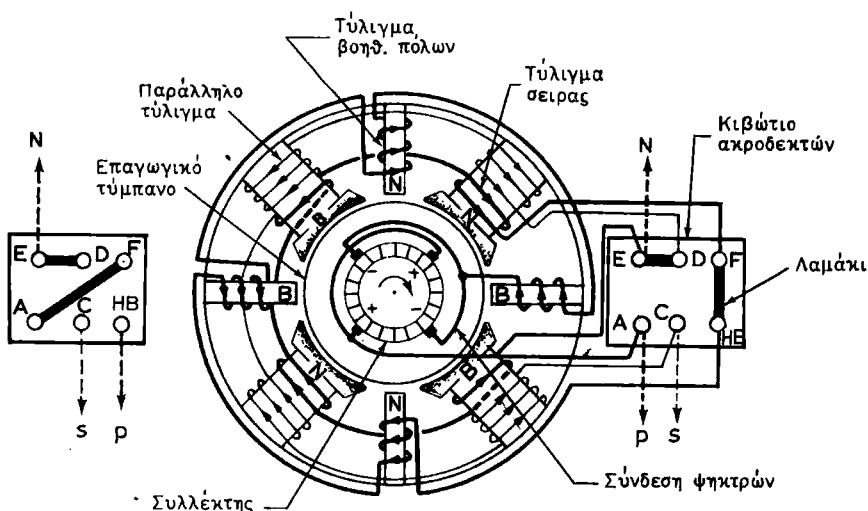
δρού σύρματος, αφού μέσα από αυτό περνά όλο το ρεύμα του φορτίου της γεννήτριας.

Στο σχήμα 3.3ζ φαίνεται η εσωτερική συνδεσμολογία των τυλιγμάτων μιας τετραπολικής γεννήτριας με σύνθετη διέγερση και βοηθητικούς πόλους. Παρατηρούμε ότι η σύνδεση των άκρων των τυλιγμάτων με τους ακροδέκτες της μηχανής, όπως φαίνεται στο δεξιό μέρος του σχήματος, γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το ρεύμα μέσα στο τύλιγμα σειράς να ενισχύει το μαγνητικό πεδίο, που δημιουργεί το παράλληλο τύλιγμα. Επίσης παρατηρούμε ότι η σύνδεση των τυλιγμάτων των βοηθητικών πόλων γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να έχουμε τη διαδοχή κυρίων και βοηθητικών πόλων, όπως την αναφέραμε στην παράγραφο 3.2.

Όταν τα άκρα των τυλιγμάτων, που καταλήγουν στους ακροδέκτες της μηχανής, χρειάζεται να συνδεθούν μεταξύ τους, αυτό γίνεται με λαμάκια από χαλκό ή ορείχαλκο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3ζ. Στο ίδιο σχήμα έχουν σημειωθεί με διακοπόμενες γραμμές και οι αγωγοί που αναχωρούν από το κιβώτιο ακροδέκτων και συνδέουν τη μηχανή με τον πίνακα ελέγχου. Τα γράμματα που χρησιμοποιούνται είναι σε απόλυτη αντιστοιχία με τα γράμματα του σχήματος 3.3στ, ώστε να μπορεί κανείς να παρακολουθήσει παράλληλα και την εξωτερική συνδεσμολογία της γεννήτριας.

Το σχήμα 3.3ζ μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κατάλληλες τροποποιήσεις για να έχει κανείς την εσωτερική συνδεσμολογία μιας γεννήτριας με παράλληλη διέγερση ή με διέγερση σειράς, με βοηθητικούς ή χωρίς βοηθητικούς πόλους. Φθάνει να αφαιρέσουμε από αυτό τα τυλίγματα που δεν υπάρχουν και να αφήσουμε τα άλλα όπως έχουν. Όταν δεν υπάρχουν βοηθητικοί πόλοι, ο αγωγός που συνδέει τις αρνητικές ψήκτρες στο σχήμα, θα πάει απευθείας στον ακροδέκτη HB.

Όσα αναφέραμε στα προηγούμενα για την αλλαγή της φοράς περιστροφής και



Σχ. 3.3ζ.

Τετραπολική γεννήτρια με σύνθετη διέγερση και βοηθητικούς πόλους.

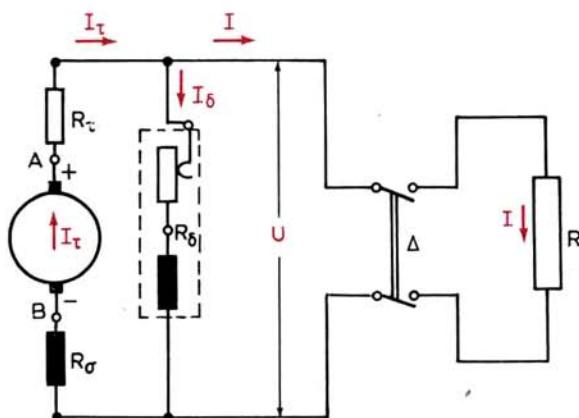
τον παραμένοντα μαγνητισμό στις γεννήτριες με παράλληλη διέγερση ή με διέγερση σειράς ισχύουν και εδώ. Αν θελήσουμε να αλλάξουμε τη φορά περιστροφής της γεννήτριας, πρέπει να αλλάξουμε τη σύνδεση των τυλιγμάτων διεγέρσεως με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην αλλάξει η φορά του ρεύματος μέσα σε αυτά. Έτσι, η γεννήτρια δεν θα χάσει τον παραμένοντα μαγνητισμό της. Για να γίνει αυτό αρκεί να αλλάξουμε στο κιβώτιο ακροδεκτών της μηχανής τη θέση που έχουν τα λαμάκια, όπως φαίνεται στο αριστερό μέρος του σχήματος 3.3ζ. Πρέπει επίσης να κάνουμε την αλλαγή που φαίνεται εκεί στους αγωγούς που συνδέουν τη γεννήτρια με τον πίνακα ελέγχου.

Για να υπολογίσουμε τη σχέση που δίνει την τάση U της μηχανής, όταν εργάζεται με φορτίο I , σχεδιάζουμε το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας με σύνθετη διέγερση, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3η. Σε αυτό R_σ είναι η ωμική αντίσταση του τυλιγμάτος σειράς και R_δ η ωμική αντίσταση του παράλληλου τυλιγμάτος μαζί με τη ρυθμιστική αντίσταση. Τα R_T και I_T είναι η ωμική αντίσταση και η ένταση του τυλιγμάτος του επαγωγικού τυμπάνου. Έχουμε:

$$U = E_\Phi - I_T (R_T + R_\sigma) \quad \text{και}$$

$$I_T = I + I_\delta$$

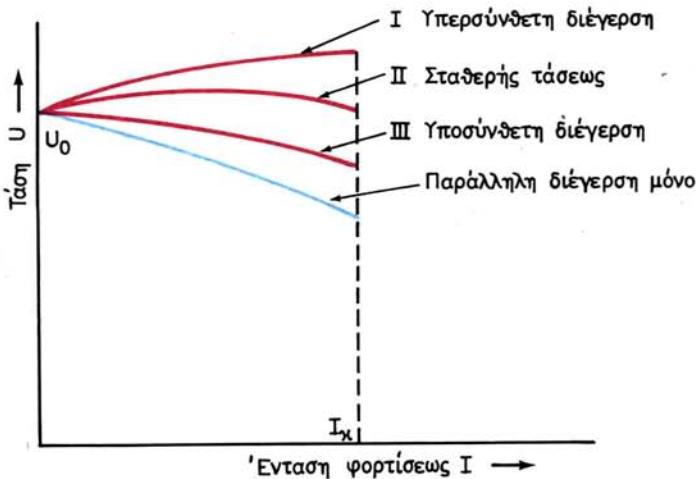
όπου: E_Φ είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη της μηχανής με φορτίο I_T .



Σχ. 3.3η.

Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας με σύνθετη διέγερση.

Όπως αναφέραμε στα προηγούμενα, σε μια γεννήτρια με σύνθετη διέγερση το τύλιγμα σειράς είναι δυνατό να συνδεθεί έτσι, ώστε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί να ενισχύει το μαγνητικό πεδίο του παράλληλου τυλιγμάτος. Οι γεννήτριες αυτές ονομάζονται με **αθροιστική σύνθετη διέγερση**. Είναι δυνατόν όμως το τύλιγμα σειράς να συνδεθεί και αντίθετα, ώστε να εξασθενεί το μαγνητικό πεδίο του παράλληλου τυλιγμάτος. Οι γεννήτριες τότε ονομάζονται με **διαφορική σύνθετη διέγερση**. Η συμπεριφορά των δυο αυτών ειδών γεννητριών με σύνθετη διέγερση είναι τελείως διαφορετική (σχ. 3.3θ).



Σχ. 3.30.

Χαρακτηριστικές φορτίου γεννητριών με αθροιστική σύνθετη διέγερση.

3.4 Ισχύς, απώλειες, θαθμός αποδόσεως γεννητριών.

α) Ισχύς.

Όταν μιλάμε για την ισχύ μιας γεννήτριας εννοούμε πάντα την ισχύ N που παίρνουμε από αυτήν. Όπως είναι γνωστό η ισχύς αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$N = \frac{U \cdot I}{1000} \text{ σε kW}$$

όπου: U είναι η τάση της γεννήτριας σε V και
I η ένταση του ρεύματος που δίνει σε A.

Στην πινακίδα που έχει κάθε γεννήτρια από τον κατασκευαστή της αναφέρεται η **ονομαστική ισχύς της**. Αυτή είναι η πιο μεγάλη ισχύς που μπορεί να δίνει **συνεχώς** η γεννήτρια, όταν εργάζεται με την **ονομαστική τάση και ταχύτητα** (που τις αναφέρει επίσης η πινακίδα), χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να πάθει βλάβη η μηχανή από υπερφόρτιση. Στην πινακίδα του κατασκευαστή αναφέρεται και η **ονομαστική ένταση** της γεννήτριας, η οποία συνδέεται με την ονομαστική ισχύ και την ονομαστική τάση με τον τύπο που δώσαμε παραπάνω.

β) Απώλειες.

Για να δώσει ηλεκτρική ενέργεια μια γεννήτρια, σύμφωνα με όσα αναφέραμε και στην παράγραφο 1.1, πρέπει να πάρει μηχανική ενέργεια από την κινητήρια μηχανή. Η μετατροπή αυτή της ενέργειας από μηχανική σε ηλεκτρική, δεν γίνεται χωρίς απώλειες. Η ισχύς N_{εισ} που παίρνει η γεννήτρια είναι πάντοτε μεγαλύτερη από

την ισχύ N που δίνει. Η διαφορά τους είναι **η ισχύς των απώλειών $N_{\text{απ}}$** :

$$N_{\text{απ}} = N_{\text{εισ}} - N$$

Οι απώλειες εμφανίζονται πάντοτε με μορφή θερμότητας που προκαλεί ανύψωση της θερμοκρασίας της μηχανής. Η θερμοκρασία παύει να αυξάνεται και σταθεροποιείται σε μια ορισμένη τιμή, όταν η θερμότητα από τις απώλειες εξισώνεται με τη θερμότητα που η μηχανή αποβάλλει στο γύρω της χώρα.

Οι απώλειες των γεννητριών συνεχούς ρεύματος, οι οποίες λειτουργούν με σταθερή περίπου τάση και με σταθερή ταχύτητα περιστροφής, διακρίνονται σε:

- **απώλειες σταθερές**, δηλαδή ανεξάρτητες του φορτίου της γεννητρίας και
- **απώλειες μεταβλητές**, δηλαδή μεταβαλλόμενες με το φορτίο.

Σταθερές απώλειες είναι οι **μηχανικές απώλειες** και οι **μαγνητικές απώλειες**, που διακρίνονται σε **απώλειες υστερήσεως** και **απώλειες δινορρευμάτων**.

Οι μηχανικές απώλειες είναι οι απώλειες τριβής του δρομέα στα έδρανα, των ψηκτρών με το συλλέκτη, του αέρα με τον περιστρεφόμενο δρομέα και το μηχανικό έργα που απορροφά ο ανεμιστήρας της μηχανής.

Οι απώλειες υστερήσεως οφείλονται στις διαδοχικές μεταβολές της μαγνητίσεως του πυρήνα του επαγγειακού τυμπάνου, καθώς αυτό περιστρέφεται μέσα στο σταθερό μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν οι πόλοι. Οι απώλειες δινορρευμάτων οφείλονται στα ρεύματα που κυκλοφορούν στον πυρήνα του επαγγειακού τυμπάνου, πάλι λόγω της περιστροφής του μέσα στο μαγνητικό πεδίο της μηχανής. Οι απώλειες από δινορρεύματα θα ήταν πολύ μεγαλύτερες αν ο πυρήνας του επαγγειακού τυμπάνου δεν κατασκευαζόταν από πολλά λεπτά μαγνητικά ελάσματα, όπως αναφέραμε στην παράγραφο 2.5.

Μεταβλητές απώλειες είναι οι **ηλεκτρικές απώλειες** και οφείλονται στη θερμότητα που παράγεται στα διάφορα κυκλώματα της γεννητρίας, όταν διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα. Έχομε δηλαδή:

$$\text{Ηλεκτρικές απώλειες} = R_T \cdot I_T^2 + R_\sigma \cdot I_T^2 + R_\delta \cdot I_\delta^2$$

όπως προκύπτουν και με τη βοήθεια του σχήματος 3.3η. Από τις απώλειες αυτές μόνο εκείνες που οφείλονται στο παράλληλο τύλιγμα διεγέρσεως ($R_\delta \cdot I_\delta^2$) μπορούν να θεωρηθούν σταθερές, δηλαδή ανεξάρτητες του φορτίου της μηχανής (εφόσον βέβαια δεν μεταβάλλει τη ρυθμιστική αντίσταση διεγέρσεως). Οι άλλες εξαρτώνται από το φορτίο της μηχανής και μάλιστα αυξάνονται με το τετράγωνο της εντάσεως όταν αυξάνεται το φορτίο της μηχανής.

γ) **Βαθμός αποδόσεως.**

Ο λόγος της ισχύος που παίρνομε από μια γεννητρία προς την ισχύ που δίνει σε αυτήν η κινητήρια μηχανή, ονομάζεται βαθμός αποδόσεως της γεννητρίας και είναι πάντοτε αριθμός μικρότερος του ένα:

$$\eta = \frac{N}{N_{\text{εισ}}} = \frac{N}{N + N_{\text{απ}}}$$

Ο βαθμός αποδόσεως εξαρτάται από το φορτίο της γεννητρίας, δηλαδή δεν είναι σταθερός αριθμός για μια μηχανή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

4.1 Εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

4.1.1 Αντιηλεκτρεγερτική δύναμη κινητήρα.

Στην παράγραφο 2.3 εξηγήσαμε πώς αναπτύσσεται αντιηλεκτρεγερτική δύναμη στην περιστρεφόμενη σπείρα του επαγωγικού τυμπάνου του απλού κινητήρα που εξετάσαμε εκεί. Όπως είπαμε, η τάση της πηγής πρέπει να υπερνικήσει αυτή την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη, για να μπορέσει να κυκλοφορήσει το ρεύμα μέσα στη σπείρα.

Στους πραγματικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος, που το επαγωγικό τους τύμπανο έχει πολλές σπείρες συνδεμένες σε σειρά, οι αντιηλεκτρεγερτικές δυνάμεις όλων αυτών των σπειρών προστίθενται και αποτελούν την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη E_a του κινητήρα. Το μέγεθός της υπολογίζεται από τη σχέση που δίνει, όπως και στις γεννήτριες (παράγρ. 3.1) την ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται στις μηχανές συνεχούς ρεύματος.

$$E_a = K \cdot \Phi \cdot n \quad \text{σε } V$$

Αν U είναι η τάση της πηγής που τροφοδοτεί τον κινητήρα, η διαφορά: $U - E_a$ είναι η τάση που προκαλεί την ένταση I_T μέσα από το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου. Δηλαδή η διαφορά αυτή είναι ίση με την πτώση τάσεως που προκαλείται από την ωμική αντίσταση του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου:

$$U - E_a = R_T \cdot I_T$$

όπου R_T είναι η ωμική αντίσταση σε Ω του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου και των ψηκτρών.

Η σχέση αυτή γράφεται και ως εξής:

$$I_T = \frac{U - E_a}{R_T}$$

που μας δίνει την ένταση που απορροφά το επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

Η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία οι αγωγοί τέμνουν τις μαγνητικές γραμμές του πεδίου, δηλαδή από την ταχύτητα περιστροφής n του κινητήρα. Όταν ο κινητήρας εργάζεται με το κανονικό του φορτίο, η E_a κυμαίνεται μεταξύ του 80 και 95% της U , ανάλογα με το μέγεθος του κινητήρα.

Παράδειγμα.

Πόση είναι η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη E_a σε ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος που λειτουργεί με τάση 220 V και του οποίου το τύλιγμα του τυμπάνου στο κανονικό φορτίο απορροφά ένταση 60A; Η αντίσταση του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου και των ψηκτρών είναι 0,25 Ω.

Λύση.

$$\begin{aligned} \text{'Εχομε: } U - E_a &= R_T \cdot I_T \quad \text{ή} \\ E_a &= U_0 \cdot R_T \cdot I_T \\ E_a &= 220 - 0,25 \times 60 = 220 - 15 = 20 \text{ V} \end{aligned}$$

4.1.2 Ένταση εκκίνησεως - Εκκινητές.

Με τη βοήθεια των σχέσεων του προηγούμενου εδαφίου, μπορούμε να καταλάβομε τι γίνεται στην εκκίνηση ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος, δηλαδή τη στιγμή, που κλείνομε το διακόπτη τροφοδοτήσεως και συνδέομε την πηγή με τους ακροδέκτες του κινητήρα. Τη στιγμή αυτή το τύμπανο είναι ακόμα ακίνητο, άρα δεν υπάρχει αντιηλεκτρεγερτική δύναμη E_a . Η παραπάνω σχέση, για $E_a = 0$ γίνεται:

$$I_{ek} = \frac{U}{R_T}$$

όπου: I_{ek} είναι η **ένταση εκκίνησεως**, δηλαδή η ένταση που απορροφά το τύμπανο του κινητήρα τη στιγμή που τον βάζομε σε κίνηση.

Παρατηρούμε ότι η ένταση εκκίνησεως είναι πολύ μεγάλη σχετικά με την ένταση κανονικής λειτουργίας.

Παράδειγμα.

Στον κινητήρα του προηγούμενου παραδείγματος να υπολογισθεί η ένταση εκκίνησεως I_{ek} .

Λύση.

$$I_{ek} = \frac{U}{R_T}$$

$$I_{ek} = \frac{220}{0,25} = 880 \text{ A}$$

Δηλαδή ο κινητήρας αυτός θα απορροφήσει στην εκκίνηση ένταση

$$14,7 \left(= \frac{880}{60} \right) \text{ φορές μεγαλύτερη από την ένταση κανονικού φορτίου.}$$

Τόσο μεγάλες εντάσεις κατά την εκκίνηση του κινητήρα, θα προκαλούσαν ανωμαλίες στον ίδιο τον κινητήρα και στο δίκτυο που τον τροφοδοτεί. Για να τις αποφύγουμε, συνδέομε κατά το διάστημα της εκκίνησεως μια πρόσθιτη αντίσταση, σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου, ώστε να περιορίζεται η ένταση εκ-

κινήσεως (εκτός αν πρόκειται για πολύ μικρούς κινητήρες). Η αντίσταση αυτή, που είναι μεταβλητή και μάλιστα συνήθως στροφαλοφόρος, ονομάζεται **εκκινητής**.

4.2 Ροπή των κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

Στο εδάφιο 2.2.2 είδαμε ποια σχέση δίνει το μέγεθος της ροπής, που ασκεί μια σπείρα στο επαγωγικό τύμπανο του απλού κινητήρα που εξετάσαμε. Η ροπή T που ασκείται σε ένα πραγματικό κινητήρα συνεχούς ρεύματος δίνεται από την ακόλουθη σχέση, της οποίας παραλείπομε την απόδειξη:

$$T = \frac{p \cdot s \cdot w}{2\pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot I_T \quad \text{σε Nm}$$

όπου: p είναι ο αριθμός των ζευγών των μαγνητικών πόλων της μηχανής,

s ο αριθμός των στοιχείων του τυλίγματος,

w ο αριθμός των αγωγών κάθε στοιχείου,

a ο αριθμός των ζευγών των παραλλήλων κλάδων,

Φ η μαγνητική ροή σε V_s κάθε μαγνητικού πόλου και

I_T η ένταση σε A του ρεύματος του τυμπάνου.

Την παραπάνω σχέση μπορούμε να τη γράψουμε και ως εξής:

$$T = K_1 \cdot \Phi \cdot I_T \quad \text{σε Nm}$$

όπου: $K_1 = \frac{p \cdot s \cdot w}{2\pi \cdot a}$ είναι σταθερό μέγεθος για κάθε μηχανή,

Φ είναι η μαγνητική ροή σε V_s κάθε πόλου και

I_T η ένταση σε A του ρεύματος του τυμπάνου.

Η προηγούμενη σχέση, που μας δίνει την **κινητήρια ροπή** (ροπή ασκούμενη στο επαγωγικό τύμπανο) για τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, μας δίνει και την αντίθετη ροπή, που, όπως είπαμε στην παράγραφο 2.4, εμφανίζεται στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, όταν εργάζονται με φορτίο.

4.3 Λειτουργία κινητήρων με φορτίο.

Όταν ένας κινητήρας εργάζεται με φορτίο, η ηλεκτρική ισχύς που απορροφά από το δίκτυο εξαρτάται από το φορτίο και μεταβάλλεται αυτόματα ανάλογα με τις μεταβολές του φορτίου. Δηλαδή όταν το φορτίο μεγαλώνει, μεγαλώνει και η ηλεκτρική ισχύς που απορροφά και όταν το φορτίο μικραίνει, μικραίνει και η ηλεκτρική ισχύς.

Πώς συμβαίνει αυτό είναι εύκολο να εξηγηθεί, αν δεχθούμε ότι έχομε ένα κινητήρα με παράλληλη διέγερση που τροφοδοτείται από δίκτυο με σταθερή τάση U . Άρα είναι σταθερή και η ένταση διεγέρσεως I_d , με συνέπεια η μαγνητική ροή Φ κάθε πόλου του κινητήρα να είναι σταθερή. Ξέρομε ότι η ένταση που απορροφά το επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα δίνεται από τη σχέση:

$$I_T = \frac{U - E_a}{R_T}$$

Όταν ο κινητήρας εργάζεται χωρίς φορτίο η αντιηλεκτρεγερτική του δύναμη E_a πολύ λίγο διαφέρει από την τάση της πηγής U . Άρα η ένταση I_T που απορροφά ο κινητήρας είναι μικρή. Η κινητήρια ροπή που αναπτύσσεται είναι μικρή και καλύπτει μόνο τις απώλειες του κινητήρα.

Όταν ο κινητήρας φορτισθεί, δηλαδή όταν αρχίσει να παρέχει μηχανική ισχύ σε κάποιο μηχάνημα, η ταχύτητα περιστροφής του θα ελαττωθεί λιγάκι. Όταν ελαττωθεί η ταχύτητα, θα ελαττωθεί και η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα, όπως φαίνεται από τη γνωστή σχέση:

$$E_a = K \cdot \Phi \cdot n$$

Ελάττωση όμως της E_a σημαίνει αύξηση της εντάσεως I_T , όπως προκύπτει από τη σχέση που δίνει την ένταση που απορροφά το επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα. Όταν αυξηθεί η ένταση, η ροπή T του κινητήρα αυξάνεται, αφού:

$$T = K_1 \cdot \Phi \cdot I_T$$

Δηλαδή με την μικρή ελάττωση της ταχύτητας έχουμε αύξηση της κινητήριας ροπής T .

Η ελάττωση της ταχύτητας θα σταματήσει, μόλις η ροπή T γίνει ίση με τη ροπή του φορτίου και τις απώλειες του κινητήρα. Από τη στιγμή αυτή ο κινητήρας θα λειτουργεί με τη λίγο ελαττωμένη αυτή ταχύτητα και θα κινεί το μηχανικό του φορτίο.

Κάθε μεταβολή του μηχανικού φορτίου θα συνεπάγεται, σύμφωνα με τους παραπάνω συλλογισμούς, αντίστοιχη αυτόματη μεταβολή στην ένταση I_T και συνεπώς και στην ισχύ που ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο. Αν το μηχανικό φορτίο του κινητήρα αυξηθεί πάρα πολύ, δηλαδή αν ξεπεράσει την ικανότητα του κινητήρα, τότε η ταχύτητά του θα πέσει πολύ, ίσως και να σταματήσει τελείως ο κινητήρας. Η ένταση που ο κινητήρας θα απορροφήσει τότε από το δίκτυο θα είναι πολύ μεγάλη και ο κινητήρας θα διατρέξει τον κίνδυνο να καταστραφεί από υπερθέρμανση, αν δεν λειτουργήσει η προστασία από υπερεντάσεις που προβλέπεται για κάθε κινητήρα.

Παράδειγμα.

Κινητήρας με παράλληλη διέγερση λειτουργεί με τάση 500 V και έχει ταχύτητα περιστροφής 1800 στρ./min όταν το τύλιγμα του τυμπάνου του, που έχει αντίσταση 1 Ω, απορροφά ένταση 50 A. 1) Ποια είναι η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα; 2) Ποια θα είναι η νέα αντιηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα και η ταχύτητα περιστροφής του, αν ελαττωθεί η απαιτούμενη από το κινούμενο μηχάνημα ροπή στο $\frac{1}{2}$;

Λύση.

$$1) U - E_{a1} = R_T \cdot I_{T1} \quad \text{ή} \quad E_{a1} = U - R_T \cdot I_{T1}$$

$$E_{a1} = 500 - 1 \times 50 = 500 - 50 = 450 \text{ V}$$

2) Από τη σχέση:

$$T = K_1 \cdot \Phi \cdot I_T$$

συμπεραίνομε ότι (αφού τα K_1 , και Φ είναι σταθερά) για $1/2$ ροπής ο κινητήρας θα απορροφά το $1/2$ της εντάσεως που απορροφούσε προηγούμενα:

$$I_{T_2} = \frac{50}{2} = 25 \text{ A}$$

Άρα: $E_{a_2} = U - R_T \cdot I_{T_2}$

$$E_{a_2} = 500 - 1 \times 25 = 500 - 25 = 475 \text{ V}$$

Για να βρούμε τη νέα ταχύτητα του κινητήρα χρησιμοποιούμε τις σχέσεις:

$$E_{a_1} = K \cdot \Phi \cdot n_1$$

$$E_{a_2} = K \cdot \Phi \cdot n_2$$

Από τις οποίες προκύπτει:

$$n_2 = n_1 \cdot \frac{E_{a_2}}{E_{a_1}}$$

$$n_2 = 1800 \times \frac{475}{450} \text{ στρ/min} = 1900 \text{ στρ/min}$$

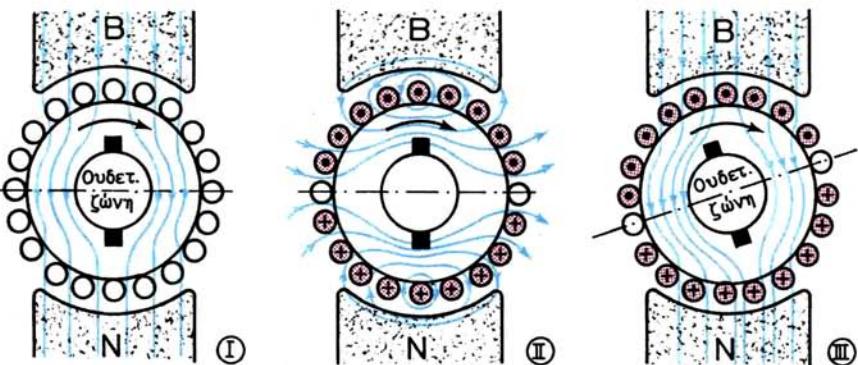
4.3.1 Αντίδραση του επαγωγικού τυμπάνου.

Όπως στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος έτσι και στους κινητήρες, το ρεύμα που κυκλοφορεί μέσα στους αγωγούς του επαγωγικού τυμπάνου, δημιουργεί ένα δικό του μαγνητικό πεδίο [σχ. 4.3(II)]. Το μαγνητικό αυτό πεδίο παραμορφώνει το μαγνητικό πεδίο των κυρίων πόλων της μηχανής [σχ. 4.3 (I)], μέσα στο οποίο περιστρέφεται, όπως ξέρομε, το επαγωγικό τύμπανο. Η παραμόρφωση αυτή, που ονομάζεται και εδώ **αντίδραση του επαγωγικού τυμπάνου**, έχει πάλι σαν αποτέλεσμα να μετατοπίζεται η ουδέτερη ζώνη και να δημιουργούνται συνεπώς σπινθηρισμοί στο συλλέκτη, όπως είδαμε ότι συμβαίνει και στις γεννήτριες (εδάφιο 3.2.1).

Η μόνη διαφορά είναι ότι στους κινητήρες η ουδέτερη ζώνη μετατοπίζεται αντίθετα από τη φορά περιστροφής του τυμπάνου, όπως δείχνει και το σχήμα 4.3(III). Η μετατόπιση είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του ρεύματος που απορροφά ο κινητήρας.

Όταν ο κινητήρας εργάζεται χωρίς φορτίο, η ένταση που απορροφά είναι, όπως εξηγήσαμε, πολύ μικρή σχετικά με την ένταση που απορροφά όταν εργάζεται με το κανονικό του φορτίο. Γι' αυτό το λόγο, είναι δυνατό στη λειτουργία χωρίς φορτίο του κινητήρα να μην εμφανίζονται σπινθηρισμοί στο συλλέκτη. Για να έχομε λειτουργία του κινητήρα με φορτίο χωρίς σπινθηρισμούς, μεταθέτομε λίγο τις ψήκτρες, αντίθετα όμως από τη φορά περιστροφής του κινητήρα, όπως δείχνει το σχήμα 4.3 (III).

Ένας άλλος τρόπος για να αποφύγομε τους σπινθηρισμούς στο συλλέκτη, χωρίς να μεταθέσουμε τις ψήκτρες, είναι να χρησιμοποιήσουμε βοηθητικούς πόλους σαν αυτούς των γεννητριών. Σήμερα οι περισσότεροι κινητήρες συνεχούς ρεύματος κατασκευάζονται με βοηθητικούς πόλους. Τα τυλίγματα των βοηθητικών πό-



Σχ. 4.3.

Αντίδραση επαγωγικού τυμπάνου κινητήρα.

λων συνδέονται και εδώ σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου, αλλά κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να έχομε την ακόλουθη διαδοχή κυρίων και βοηθητικών πόλων: **κατά τη φορά περιστροφής του τυμπάνου του κινητήρα, ύστερα από βόρειο κύριο πόλο να είναι βόρειος βοηθητικός και ύστερα από νότιο κύριο πόλο να είναι νότιος βοηθητικός.**

4.4 Ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων.

Η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων συνεχούς ρεύματος γίνεται σχετικά εύκολα, με απλά μέσα και με μεγάλη ακρίβεια. Σε αυτό πλεονεκτούν απέναντι στους κινητήρες του εναλλασσόμενου ρεύματος που θα εξετάσουμε σε άλλο κεφάλαιο.

Στα προηγούμενα δώσαμε τις ακόλουθες δύο σχέσεις για την αντιλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα:

$$E_a = U - I_T \cdot R_T \quad \text{και} \quad E_a = K \cdot \Phi \cdot n$$

Από τις δύο αυτές σχέσεις προκύπτει για την ταχύτητα περιστροφής n του κινητήρα η σχέση:

$$n = \frac{U - I_T \cdot R_T}{K \cdot \Phi}$$

Από τη μελέτη της σχέσεως αυτής βγαίνουν τα ακόλουθα συμπεράσματα για την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα:

α) Αν η τάση U που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες του τυμπάνου του κινητήρα είναι σταθερή και μειωθεί η μαγνητική ροή Φ , δηλαδή **αν μειωθεί η ένταση διεγέρσεως, θα αυξηθεί η ταχύτητα του κινητήρα**. Αντίθετα, η **αύξηση της έντασης διεγέρσεως προκαλεί μείωση της ταχύτητας του κινητήρα**. Μεγάλη μείωση της έντασης διεγέρσεως έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλη αύξηση των στροφών του κινητήρα, οπότε υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του τυλίγματος από τις φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται.

β) Αν η μαγνητική ροή Φ είναι σταθερή, δηλαδή αν η ένταση διεγέρσεως είναι

σταθερή και αυξήσουμε ή ελαττώσουμε την τάση U που εφαρμόζεται στο επαγωγικό τύμπανο, θα αυξηθεί ή θα μειωθεί αντίστοιχα και η ταχύτητα του κινητήρα.

Σημειώνομε ότι αν U και Φ είναι σταθερά και αυξηθεί η ένταση I_T του κινητήρα λόγω αυξήσεως του φορτίου θα έχομε μικρή μείωση της ταχύτητας του κινητήρα και αντίστροφα. Αυτό συμβαίνει γιατί το γινόμενο $I_T \cdot R_T$ είναι μικρό ποσοστό της U και συνεπώς οι μεταβολές του λίγο επηρεάζουν την ταχύτητα n .

Στα επόμενα θα δούμε πώς εφαρμόζονται στην πράξη οι παραπάνω διαπιστώσεις για να πετύχομε τη ρύθμιση της ταχύτητας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

4.5 Είδη κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

Ανάλογα με τον τρόπο που είναι συνδεμένο το τύλιγμα διεγέρσεως των κινητήρων συνεχούς ρεύματος, όπως και τις γεννήτριες, τους διακρίνομε σε:

- α) Κινητήρες με ξένη διέγερση.
- β) Κινητήρες με παράλληλη διέγερση.
- γ) Κινητήρες με διέγερση σειράς.
- δ) Κινητήρες με σύνθετη διέγερση.

4.5.1 Κινητήρες με ξένη διέγερση.

Οι κινητήρες με ξένη διέγερση που κατασκευάζονται για ειδικές χρήσεις, δεν θα μας απασχολήσουν ιδιαίτερα γιατί οι ιδιότητές τους είναι περίπου όμοιες με τις ιδιότητες των κινητήρων με παράλληλη διέγερση.

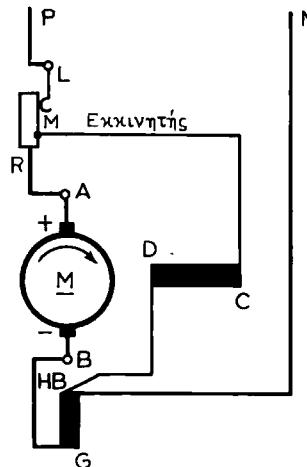
Αναφέρουμε μόνο ότι ανάμεσα στις ειδικές περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται κινητήρες με ξένη διέγερση είναι κυρίως εκείνες κατά τις οποίες γίνεται ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα σε μεγάλα όρια. Όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο, αυτό μπορεί να γίνει με μεταβολή σε μεγάλα επίσης όρια της τάσεως τροφοδοτήσεως του επαγωγικού τυμπάνου. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, η διέγερση του κινητήρα πρέπει να τροφοδοτείται από μια ανεξάρτητη πηγή συνεχούς ρεύματος. Τα σχήματα 4.6γ και 4.6δ δίνουν τη συνδεσμολογία δυο τέτοιων εφαρμογών των κινητήρων με ξένη διέγερση.

4.5.2 Κινητήρες με παράλληλη διέγερση.

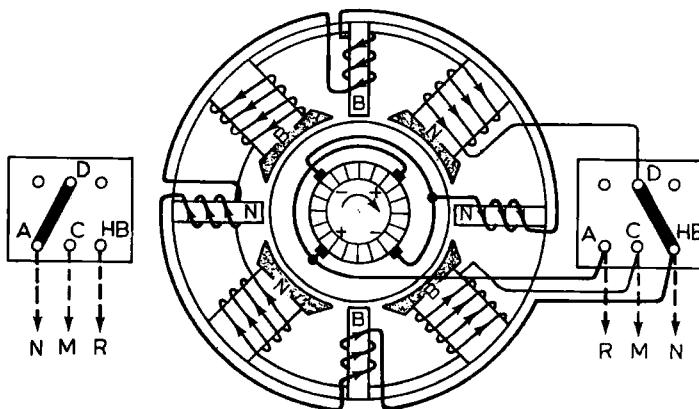
Στους κινητήρες αυτούς το τύλιγμα διεγέρσεως συνδέεται παράλληλα με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου, ακριβώς όπως στις αντίστοιχες γεννήτριες.

Το σχήμα 4.5α στο αριστερό μέρος δείχνει τη συνδεσμολογία ενός κινητήρα με παράλληλη διέγερση (C-D) και βοηθητικούς πόλους (G-HB). Στο σχήμα τα P και N παριστάνουν το θετικό και αρνητικό πόλο της πηγής από την οποία τροφοδοτείται ο κινητήρας.

Σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο συνδέεται και ο εκκινητής που χρησιμεύει, όπως είπαμε (παραγ. 4.1), για την εκκίνηση του κινητήρα. Το άκρο του τυλίγματος διεγέρσεως συνδέεται με τον τρίτο ακροδέκτη M που φέρει ο εκκινητής.



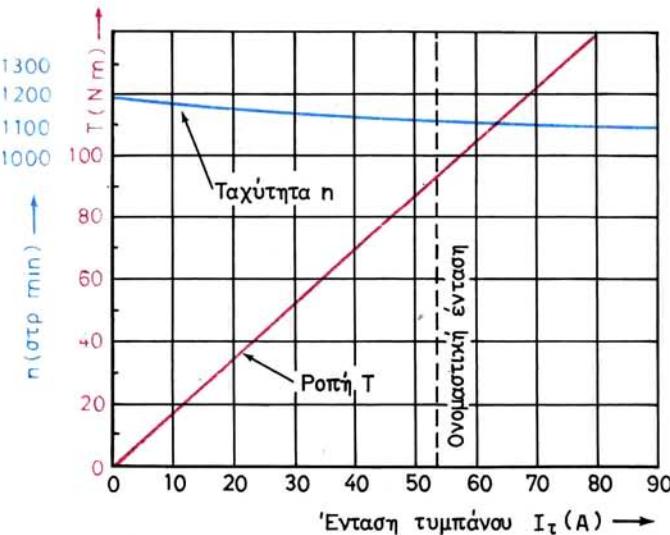
Σχ. 4.5α.
Κινητήρας με παράλληλη διέγερση και εκκινητή.



Σχ. 4.5β.
Τετραπολικός κινητήρας με παράλληλη διέγερση και βοηθητικούς πόλους.

Η εσωτερική συνδεσμολογία των τυλιγμάτων μεταξύ τους και με τους ακροδέκτες σε ένα κινητήρα με παράλληλη διέγερση φαίνεται στο σχήμα 4.5β. Η συνδεσμολογία είναι ακριβώς η ίδια με αυτή μιας γεννήτριας με παράλληλη διέγερση.

Για να αλλάξουμε τη φορά περιστροφής σε ένα κινητήρα με παράλληλη διέγερση εδάφιο 2.2.2, συνήθως αλλάζουμε τη φορά του ρεύματος μέσα στο τύλιγμα του επαγγειακού τυμπάνου, φροντίζοντας να κρατήσουμε την ίδια πολικότητα στους κύριους μαγνητικούς πόλους. Η πολικότητα των βοηθητικών πόλων πρέπει να αλλάξει, για να ισχύουν όσα αναφέραμε στο εδάφιο 4.3.1 για τη διαδοχή κυρίων και βοηθητικών πόλων. Όλα τα παραπάνω επιτυγχάνονται αν κάνομε τη συνδεσμολογία στο κιβώτιο των ακροδεκτών, όπως φαίνεται στο αριστερό μέρος του σχήματος 4.5β, με τις αντίστοιχες εξωτερικές συνδέσεις.



Σχ. 4.5γ.

Χαρακτηριστικές καμπύλες κινητήρα με παράλληλη διέγερση.

Το διάγραμμα του σχήματος 4.5γ δείχνει τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας από ένα συνθησισμένο κινητήρα με παράλληλη διέγερση. Οι καμπύλες αυτές έχουν χαραχθεί με σταθερή ένταση διεγέρσεως, σταθερή τάση του δικτύου τροφοδοτήσεως και μεταβλητή την ένταση που απορροφά το τύμπανο του κινητήρα (ένταση φορτίσεως).

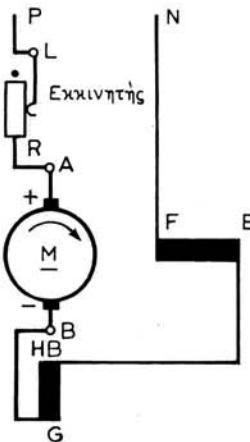
Όπως παρατηρούμε η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα πολύ λίγο μεταβάλλεται, όταν μεταβάλλεται η ένταση φορτίσεως. Η μεταβολή των στροφών από το μηδενικό στο πλήρες φορτίο κυμαίνεται στους κινητήρες αυτούς από 5 ως 15%. Ακόμα και για σημαντικές υπερφορτίσεις οι στροφές του κινητήρα λίγο μειώνονται.

Στο ίδιο διάγραμμα παρατηρούμε επίσης, ότι η ροπή T μεταβάλλεται περίπου ανάλογα με την ένταση φορτίσεως. Αυτό είναι σύμφωνο με τη σχέση που δώσαμε στην παράγραφο 4.2 για τη ροπή του κινητήρα (με ένταση διεγέρσεως σταθερή).

4.5.3 Κινητήρες με διέγερση σειράς.

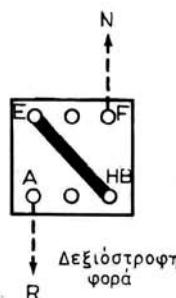
Στο σχήμα 4.5δ φαίνεται η συνδεσμολογία ενός κινητήρα με διέγερση σειράς. Το τύλιγμα διεγέρσεως E-F είναι εδώ συνδεμένο σε σειρά με το τύλιγμα των βοηθητικών πόλων G-HB και το επαγωγικό τύμπανο της μηχανής. Επίσης σε σειρά με αυτά είναι συνδεμένος και ο εκκινητής L-R.

Για να αλλάξουμε τη φορά περιστροφής του κινητήρα πρέπει να αλλάξουμε τη φορά του ρεύματος στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου και στο τύλιγμα των βοηθητικών πόλων χωρίς να αλλάξουμε τη φορά του ρεύματος στη διέγερση. Αυτά μπορούν να γίνουν με μια αλλαγή της συνδεσμολογίας στους ακροδέκτες, όπως δείχνει το σχήμα 4.5ε. Αν η αλλαγή της φοράς περιστροφής χρειάζεται να γίνεται **τακτικά** κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, χρησιμοποιούμε, όπως και για τους



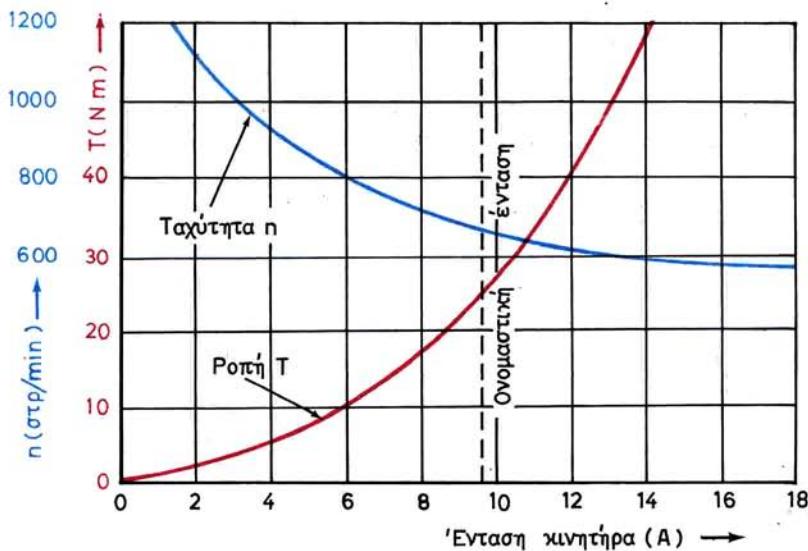
Σχ. 4.5δ.

Κινητήρας με διέγερση σειράς.



Σχ. 4.5ε.

Αλλαγή φοράς περιστροφής σε κινητήρα με διέγερση σειράς.



Σχ. 4.5στ.

Χαρακτηριστικές καμπύλες κινητήρα με διέγερση σειράς.

κινητήρες με παράλληλη διέγερση, είτε ένα **εκκινητής-αναστροφέα** είτε ένα **ρυθμιστή στροφών-αναστροφέα**.

Στο διάγραμμα του σχήματος 4.5στ παριστάνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας ενός κινητήρα με διέγερση σειράς, όταν η ταση του δίκτυου που τροφοδοτεί τον κινητήρα, παραμένει σταθερή. Στους κινητήρες αυτούς η ένταση που περνά μέσα από το τύμπανο (I_T) είναι η ίδια με την ένταση διεγέρσεως (αν δεν

υπάρχει ρυθμιστική αντίσταση παράλληλα προς το τύλιγμα διεγέρσεως) και με την ένταση δικτύου I.

Όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα, η ροπή του κινητήρα αυξάνεται πάρα πολύ όταν αυξάνεται η I, σχεδόν αυξάνεται με το τετράγωνο της I. Αυτό εξηγείται και από τη σχέση που δώσαμε στη παράγραφο 4.2:

$$T = K_1 \cdot \Phi \cdot I$$

Εδώ η Φ , για τα σημεία λειτουργίας κάτω του κόρου, είναι ανάλογη με την I, άρα:

$$T = K_1 \cdot I^2$$

Στο διάγραμμα επίσης παρατηρούμε, ότι στους κινητήρες με διέγερση σειράς, η ταχύτητα περιστροφής αλλάζει πολύ όταν αλλάζει η ένταση που απορροφά ο κινητήρας, δηλαδή όταν αλλάζει το φορτίο του κινητήρα. Η εξήγηση και αυτής της ιδιότητας είναι εύκολη αν σκεφθούμε πάλι ότι η ένταση I είναι και ένταση διεγέρσεως στους κινητήρες αυτούς. Σύμφωνα με αυτά που αναφέραμε στη παράγραφο 4.4, μεταβολή της εντάσεως διεγέρσεως έχει σαν αποτέλεσμα σημαντική μεταβολή των στροφών του κινητήρα.

Από τα παραπάνω βγαίνει το συμπέρασμα ότι ο κινητήρας με διέγερση σειράς, όταν έχει να κινήσει σημαντικό φορτίο, όχι μόνο ελαπτώνει την ταχύτητά του αλλά και αναπτύσσει μεγάλη ροπή ικανή να κινήσει το εξωτερικό φορτίο που είναι συνδεμένο στον άξονά του. Αντίθετα, όταν ο κινητήρας έχει να κινήσει μικρό φορτίο, απορροφά από το δίκτυο μικρή ένταση και αναπτύσσει μεγάλη ταχύτητα με μικρή σχετικά ροπή.

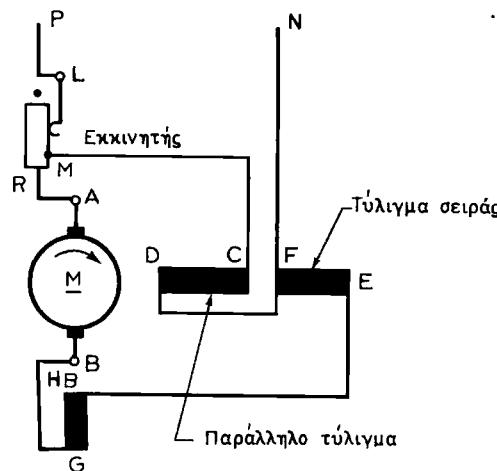
Η συμπεριφορά αυτή του κινητήρα με διέγερση σειράς τον κάνει κατάλληλο για την ανύψωση βαρών (π.χ. στους γερανούς) και για την ηλεκτρική κίνηση οχημάτων (π.χ. τρόλεϋ, ηλεκτρικά τραίνα κλπ.).

Ο κινητήρας με διέγερση σειράς όταν δεν έχει φορτίο συνδεμένο στον άξονά του, απορροφά από το δίκτυο πολύ μικρή ένταση. Η ταχύτητά του αυξάνεται πάρα πολύ και υπάρχει κίνδυνος να καταστραφεί ο κινητήρας. Για το λόγο αυτό οι κινητήρες με διέγερση σειράς συνδέονται πάντοτε με το φορτίο που κινούν με μηχανικό σύνδεσμο (κόπλερ) ή με οδοντωτούς τροχούς (γρανάζια) και ποτέ με ιμάντες, που είναι δυνατό να κοπούν και να μείνει ο κινητήρας χωρίς φορτίο.

4.5.4 Κινητήρες με σύνθετη διέγερση.

Όπως στις γεννήτριες, έτσι και στους κινητήρες με σύνθετη διέγερση, κάθε κύριος μαγνητικός πόλος έχει δύο τυλίγματα, το παράλληλο τύλιγμα και το τύλιγμα σειράς. Επίσης, όπως και στις γεννήτριες έχομε κινητήρες με αθροιστική σύνθετη διέγερση και κινητήρες με διαφορική σύνθετη διέγερση, αντίστοιχα με το αν το τύλιγμα σειράς ενισχύει ή εξασθενίζει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί το παράλληλο τύλιγμα.

Η συνδεσμολογία ενός κινητήρα με αθροιστική σύνθετη διέγερση και βοηθητικούς πόλους, φαίνεται στο σχήμα 4.5ζ. Η εκκίνηση γίνεται και εδώ, όπως στους κινητήρες με παράλληλη διέγερση, με τη βοήθεια ενός εκκινητή που συνδέεται, όπως δείχνει και το σχήμα, σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο.



Σχ. 4.5ζ.

Κινητήρας με σύνθετη διέγερση
και βοηθητικούς πόλους.

4.6 Μέθοδοι ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

Όπως είδαμε πιο πάνω (παράγραφος 4.4), οι δυο παράγοντες που προσδιορίζουν την ταχύτητα περιστροφής ενός κινητήρα που λειτουργεί είναι η τάση U που εφαρμόζεται στα άκρα του τυλίγματος του επαγωγικού του τυμπάνου και η μαγνητική ροή Φ των πόλων (που εξαρτάται από την ένταση διεγέρσεως). Ανάλογα με τον τρόπο που χρησιμοποιούμε τους παράγοντες αυτούς, έχομε στην πράξη τρεις κυρίως μεθόδους για τη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Δηλαδή έχομε ρύθμιση με:

- α) Ρυθμιστική αντίσταση στο παράλληλο τύλιγμα διεγέρσεως.
- β) Ρυθμιστική αντίσταση στο επαγωγικό τύμπανο.
- γ) Μεταβολή της τάσεως τροφοδοτήσεως του επαγωγικού τυμπάνου.

α) Ρυθμιστική αντίσταση στο παράλληλο τύλιγμα διεγέρσεως.

Η μέθοδος αυτή, που στηρίζεται στη μεταβολή της εντάσεως διεγέρσεως για τη ρύθμιση της ταχύτητας, εφαρμόζεται στους κινητήρες με παράλληλη διέγερση και στους κινητήρες με σύνθετη διέγερση.

β) Ρυθμιστική αντίσταση στο επαγωγικό τύμπανο.

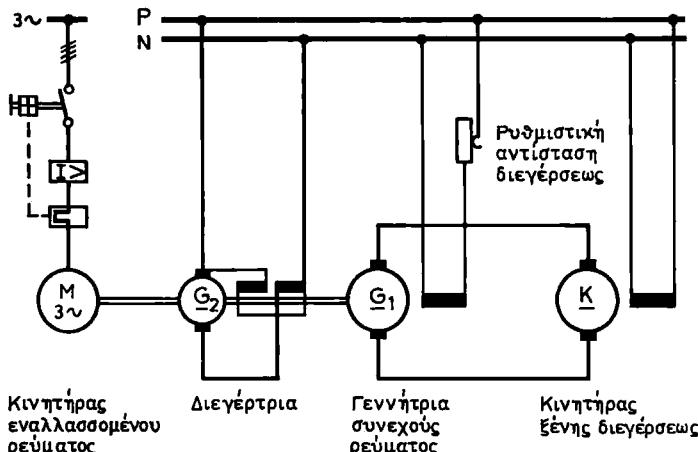
Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη μεταβολή της τάσεως, που εφαρμόζεται στο τύμπανο του κινητήρα για τη ρύθμιση των στροφών του. Άν σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο συνδέσομε μια ρυθμιστική αντίσταση, που ονομάζεται **ρυθμιστής στροφών**, όπως ακριβώς συνδέεται ο εκκινητής (σχήματα 4.5α, 4.5δ και 4.5ζ), τότε με την πτώση τάσεως που δημιουργείται μέσα στην αντίσταση αυτή μπορούμε να επιτύχουμε ρύθμιση της τάσεως τροφοδοτήσεως του επαγωγικού τυμπάνου.

γ) Μεταβολή της τάσεως τροφοδοτήσεως του επαγωγικού τυμπάνου.

Η μέθοδος αυτή ρυθμίζεως της ταχύτητας των κινητήρων βασίζεται πάλι στη μεταβολή της τάσεως που επιβάλλεται στο τύλιγμα του επαγωγικού τύμπανου, πραγματοποιείται όμως όχι με την πιώση τάσεως μέσα στο ρυθμιστή στροφών, αλλά με τη μεταβολή της τάσεως τροφοδοτήσεως. Στην περίπτωση αυτή χρειάζεται για κάθε κινητήρα μια ιδιαίτερη πηγή συνεχούς ρεύματος, που μπορεί να είναι και μια ιδιαίτερη γεννήτρια, η οποία να τροφοδοτεί το επαγωγικό του τύμπανο με ρυθμιζόμενη κατάλληλα τάση. Η ένταση διεγέρσεως του κινητήρα διατηρείται σταθερή, τροφοδοτούμενη από μια άλλη πηγή (κινητήρας ξένης διεγέρσεως).

Η μέθοδος αυτή δίνει μεταβολή της ταχύτητας του κινητήρα σε μεγάλα όρια. Έχει επίσης το πλεονέκτημα, με την προοδευτική αύξηση της τάσεως της πηγής που τροφοδοτεί τον κινητήρα, ότι ξεκινώντας από το μηδέν πετυχαίνομε άριστες συνθήκες εκκινήσεως του κινητήρα. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιείται το σύστημα αυτό μεταξύ άλλων και στους σύγχρονους ανελκυστήρες μεγάλης ταχύτητας λειτουργίας, που θέλομε όμως να έχουν πολύ ομαλή εκκίνηση και ομαλό σταμάτημα.

Μια περίπτωση εφαρμογής αυτής της μεθόδου για τη ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα είναι **το σύστημα Ward-Leonard**. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 4.6α, που δείχνει τη συνδεσμολογία, το σύστημα αυτό αποτελείται από μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος G_1 , που τροφοδοτεί απευθείας το επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα ξένης διεγέρσεως K , που θέλομε να έχομε ρύθμιση των στροφών. Η γεννήτρια κινείται με περίπου σταθερή ταχύτητα από ένα κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος M . Στον ίδιο άξονα, κινούμενη από τον κινητήρα αυτόν, είναι μια άλλη μικρότερη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος G_2 (η διεγέρτρια) που τροφοδοτεί τόσο τη διέγερση της κύριας γεννήτριας G_1 , όσο και του κινητήρα K με συνεχές ρεύμα σταθερής τάσεως. Η ρύθμιση της τάσεως, που εφαρμόζεται στο επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα συνεχούς ρεύματος, γίνεται με τη ρυθμιστική αντίσταση, που υπάρχει στο τύλιγμα διεγέρσεως της γεννήτριας.

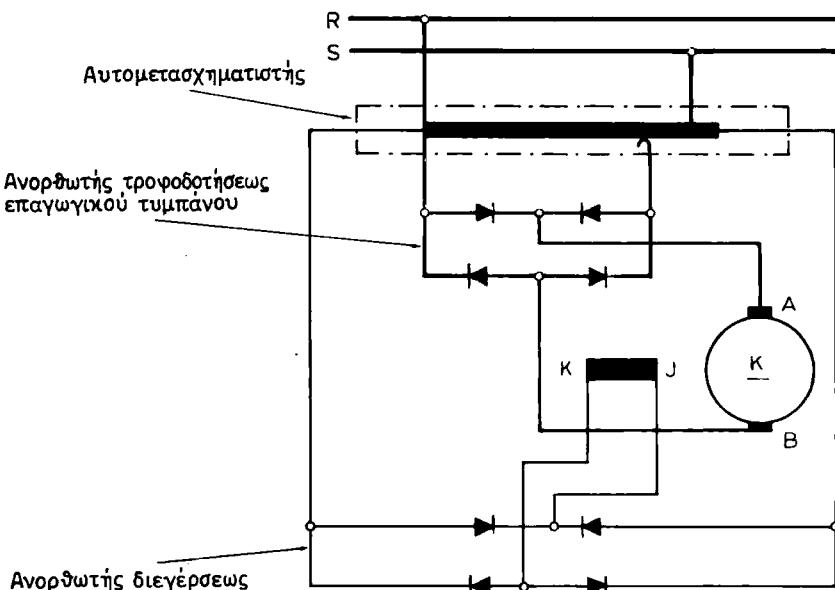


Σχ. 4.6α.
Συνδεσμολογία συστήματος Ward-Leonard.

Μια άλλη περίπτωση έφαρμογής της μεθόδου μεταβολής της τάσεως που εφαρμόζεται στο επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα για τή ρύθμιση των στροφών, είναι και αυτή που φαίνεται στο σχήμα 4.68. Εδώ το συνεχές ρεύμα, για την τροφοδότηση του επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα, παράγεται από ένα ανορθωτή με ανορθωτικά στοιχεία από ημιαγωγούς. Η μεταβολή της τάσεως, του συνεχούς ρεύματος, που εφαρμόζεται στο επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα, γίνεται με το μεταβλητό αυτομετασχηματιστή που τροφοδοτεί τον ανορθωτή (γι' αυτούς θα επανέλθουμε σε επόμενα κεφάλαια). Η διέγερση K-J του κινητήρα τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα σταθερής τάσεως από ένα άλλο ανορθωτή.

Με το παραπάνω σύστημα πετυχαίνομε ρυθμίσεις της ταχύτητας σε όρια μεγαλύτερα και από 1 προς 5. Η διακύμανση των στροφών κατά τη λειτουργία χωρίς φορτίο και με πλήρες φορτίο φθάνει το 10%.

Σημειώνομε τέλος ότι με τη χρησιμποποίηση των ανορθωτικών στοιχείων από ημιαγωγούς που ονομάζονται θυρίστορ, πετυχαίνομε αυτόματο έλεγχο της τάσεως



Σχ. 4.68.
Σύστημα με αυτομετασχηματιστή και ανορθωτές.

του συνεχούς ρεύματος που τροφοδοτεί το επαγωγικό τύμπανο και συνεπώς και των στροφών του κινητήρα. Με την τεχνολογία αυτή (παράγρ. 11.7, σχ. 11.7θ), που εφαρμόζεται σε κινητήρες με ισχύ μέχρι 500 kW, έχομε ρύθμιση της ταχύτητας σε σχέσεις πάνω από 1 προς 20. Επίσης έχομε αυτόματη τήρηση ουσιαστικά σταθερής ταχύτητας, σε οποιαδήποτε ενδιάμεση τιμή της κλίμακας αυτής, ανεξάρτητης από τις διακυμάνσεις των φορτίων, της τάσεως του ρεύματος του δικτύου και των μεταβολών στην ένταση διεγέρσεως.

4.7 Ισχύς, απώλειες, βαθμός αποδόσεως κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

a) Ισχύς.

Η ισχύς N_1 , που ένας κινητήρας απορροφά με μορφή ηλεκτρικής ενέργειας από την πηγή, που τον τροφοδοτεί με συνεχές ρεύμα, δίνεται από τη σχέση:

$$N_1 = \frac{U \cdot I}{1000} \quad \text{σε kW}$$

'Όταν μιλάμε για ισχύ κινητήρα εννοούμε πάντοτε την ισχύ που δίνει στον αξονά του. Η ισχύς αυτή N δίνεται από τη σχέση:

$$N = \frac{T_a \cdot n}{9554} \quad \text{σε kW}$$

όπου: T_a είναι η ροπή σε Nm που αναπτύσσει ο κινητήρας στον αξονά του και n είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα σε στρ./min.

Η ροπή T_a είναι μικρότερη από την κινητήρια ροπή T (παράγρ. 4.2), κατά τη ροπή που απορροφούν οι απώλειες του κινητήρα.

Στην πινακίδα κάθε κινητήρα είναι γραμμένα συνήθως τα ακόλουθα χαρακτηριστικά στοιχεία του:

Η **ονομαστική ισχύς**, που δίνεται σε kW ή HP (1 HP = 0,736 kW) και είναι η μεγαλύτερη ισχύς, που μπορεί να δίνει στον αξονά του ο κινητήρας συνεχώς εργαζόμενος με την ονομαστική του τάση, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να πάθει βλάβη από υπερθέρμανση. Φόρτιση του κινητήρα με ισχύ λίγο μεγαλύτερη από την ονομαστική του είναι δυνατή για μικρά χρονικά διαστήματα.

Η **ονομαστική τάση** που είναι η τάση για την οποία ο κινητήρας έχει κατασκευασθεί να λειτουργεί, δηλαδή είναι η τάση που πρέπει να έχει το δίκτυο που θα τον τροφοδοτήσει.

Η **ονομαστική ένταση** που είναι η ένταση που απορροφά ο κινητήρας, όταν έχει συνδεθεί σε δίκτυο με τάση ίση με την ονομαστική του και δίνει στον αξονά την ονομαστική του ισχύ.

Τέλος η **ονομαστική ταχύτητα** του κινητήρα είναι η ταχύτητα περιστροφής με την οποία εργάζεται, όταν δίνει στον αξονά του την ονομαστική ισχύ και τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση.

b) Απώλειες.

Η ισχύς N που ο κινητήρας δίνει στον αξονά του με μορφή μηχανικής ενέργειας είναι πάντοτε μικρότερη από την ηλεκτρική ισχύ N_1 , που απορροφά από το δίκτυο. Η διαφορά:

$$N_1 - N = N_{\text{απ}}$$

καταναλώθηκε σε **απώλειες** μέσα στη μηχανή. Οι απώλειες αυτές είναι της ίδιας μορφής με τις απώλειες που αναφέραμε στην παράγραφο 3.5 για τις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος.

γ) Βαθμός αποδόσεως.

Ο λόγος της ισχύος N , που μας δίνει ο κινητήρας στον αξονά του, προς την ισχύ N_1 , που παίρνει από το δίκτυο, ονομάζεται βαθμός αποδόσεως:

$$\eta = \frac{N}{N_1} = \frac{N}{N + N_{\text{απ}}}$$

Το η είναι πάντοτε αριθμός μικρότερος από τη μονάδα. Η μεταβολή του βαθμού αποδόσεως με το φορτίο παριστάνεται από μια καμπύλη όμοιας μορφής με αυτή του σχήματος 3.5.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

5.1 Είδη και χρήση γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος.

Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, τις **σύγχρονες** και τις **ασύγχρονες**.

Στις σύγχρονες μηχανές υπάρχει ορισμένη σταθερή σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα περιστροφής και τη συχνότητα του ρεύματος. Ένα άλλο χαρακτηριστικό στοιχείο των σύγχρονων μηχανών είναι ότι έχουν διέγερση που τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα από ένα δίκτυο ή από μια μηχανή συνεχούς ρεύματος, τη **διεγέρτρια**.

Στις ασύγχρονες μηχανές η ταχύτητα για μια ορισμένη συχνότητα του ρεύματος εξαρτάται από το φορτίο της μηχανής. Συνεπώς δεν υπάρχει ορισμένη σταθερή σχέση μεταξύ συχνότητας ρεύματος και ταχύτητας περιστροφής.

Τόσο οι σύγχρονες όσο και οι ασύγχρονες μηχανές είναι αναστρέψιμες. Μπορούν δηλαδή να λειτουργήσουν είτε ως γεννήτριες, είτε ως κινητήρες, όπως είχαμε αναφέρει ότι συμβαίνει και με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος.

Στην πράξη, οι σύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται κυρίως ως **γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος**, οπότε ονομάζονται και **εναλλακτήρες**. Σε ειδίκες περιπτώσεις, σύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται και ως κινητήρες, όπως θα δούμε στα επόμενα, οπότε ονομάζονται **σύγχρονοι κινητήρες**.

Οι ασύγχρονες μηχανές σπάνια χρησιμοποιούνται ως γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος και γι' αυτό δεν θα μας απασχολήσουν. Αντίθετα, οι ασύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται ευρύτατα ως κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.

Από την άποψη της διατάξεως των μαγνητικών πόλων που δημιουργούν τη διέγερση, οι εναλλακτήρες διακρίνονται σε:

- Εναλλακτήρες με εξωτερικούς (σταθερούς) πόλους.**
- Εναλλακτήρες με εσωτερικούς (περιστρεφόμενους) πόλους.**
- Στροβιλοεναλλακτήρες**, που αποτελούν ειδική περίπτωση εναλλακτήρων με εσωτερικούς πόλους.

Οι εναλλακτήρες με εξωτερικούς πόλους χρησιμοποιούνται για μικρές ισχείς και χαμηλές τάσεις, όπως σε μικρά ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη.

Οι εναλλακτήρες με περιστρεφόμενους πόλους χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερες ισχείς, αλλά για μικρές ταχύτητες περιστροφής, όπως είναι η περίπτωση των εναλλακτήρων των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής.

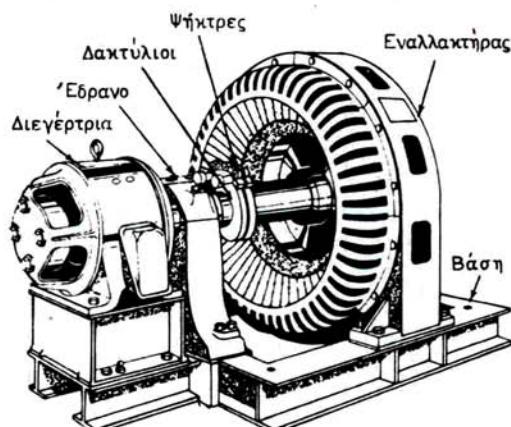
Τέλος, οι στροβιλοεναλλακτήρες χρησιμοποιούνται για πολύ μεγάλες ισχείς (π.χ. 300.000 kW) και μεγάλες ταχύτητες περιστροφής (π.χ. 3000 στρ./min). Τέτοιοι εναλλακτήρες χρησιμοποιούνται σε όλους τους μεγάλους θερμικούς σταθμούς παραγωγής πλεκτρικής ενέργειας.

5.2 Κατασκευή συγχρόνων γεννητριών ή εναλλακτήρων.

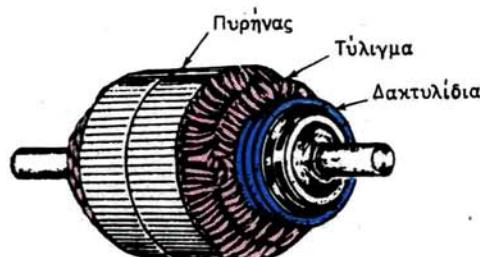
5.2.1 Εναλλακτήρες με εξωτερικούς πόλους.

Στους εναλλακτήρες αυτούς η διέγερση της μηχανής, δηλαδή η δημιουργία του μαγνητικού της πεδίου, γίνεται από μαγνητικούς πόλους, που είναι στερεωμένοι στο εσωτερικό του ζυγάματος του στάπτη, όπως δηλαδή γίνεται και στις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Τα τυλίγματα των μαγνητικών πόλων τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα από μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, η οποία συνήθως είναι συνδεμένη απευθείας στον άξονα του εναλλακτήρα, από τον οποίο παίρνει κίνηση, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2α. Η γεννήτρια αυτή ονομάζεται **διεγέρτρια του εναλλακτήρα**.

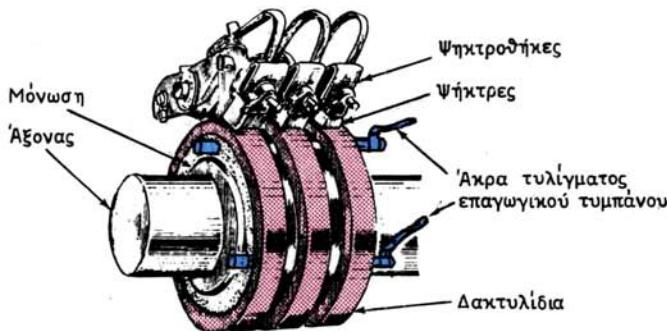
Ο δρομέας των εναλλακτήρων με εξωτερικούς πόλους φέρει το επαγωγικό τύμπανο, όπως ο δρομέας των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Στα αυλάκια που σχηματίζουν οι οδοντώσεις του πυρήνα του επαγωγικού τυμπάνου είναι τοποθετημένο το τύλιγμα (σχ. 5.2β).



Σχ. 5.2α.
Σύγχρονη γεννήτρια.



Σχ. 5.2β.
Δρομέας εναλλακτήρα.



Σχ. 5.2γ.
Δακτυλίδια εναλλακτήρα.

Συλλέκτης δεν υπάρχει. Αντί για συλλέκτη, στους εναλλακτήρες με εξωτερικούς πόλους έχουμε **δακτυλίδια** κατασκευασμένα από ορείχαλκο. Τα δακτυλίδια αυτά είναι στερεωμένα στον άξονα του δρομέα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2γ, και είναι μονωμένα μεταξύ τους και προς τον άξονα. Ο αριθμός των δακτυλιδιών είναι ανάλογος με τον **αριθμό των φάσεων** του εναλλακτήρα.

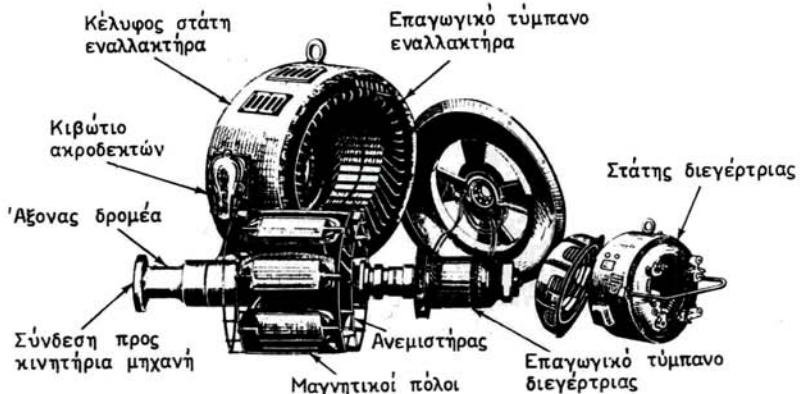
Τα δακτυλίδια συνδέονται με τα άκρα του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου. Το εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο παράγεται (εδάφιο 2.1.3) από την ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται μέσα στο τύλιγμα, οδηγείται από τα δακτυλίδια στις ψήκτρες, που εφάπτονται σε αυτά (σχ. 5.2γ) και από τις ψήκτρες στους ακροδέκτες του εναλλακτήρα. Στους ακροδέκτες αυτούς συνδέομε το φορτίο, το οποίο θέλομε να τροφοδοτήσουμε με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Σημαντικό μειονέκτημα που έχουν οι εναλλακτήρες με εξωτερικούς πόλους, είναι ότι όλο το ρεύμα του φορτίου διέρχεται από τα δακτυλίδια και τις ψήκτρες. Άλλο μειονέκτημα είναι ότι ο χώρος που διατίθεται για οδοντώσεις στο τύμπανο είναι περιορισμένος. Επίσης ότι οι μονώσεις του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου καταιπονούνται κατά τη λειτουργία της μηχανής από τις μεγάλες φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται, όταν ο εναλλακτήρας είναι πολύστροφος.

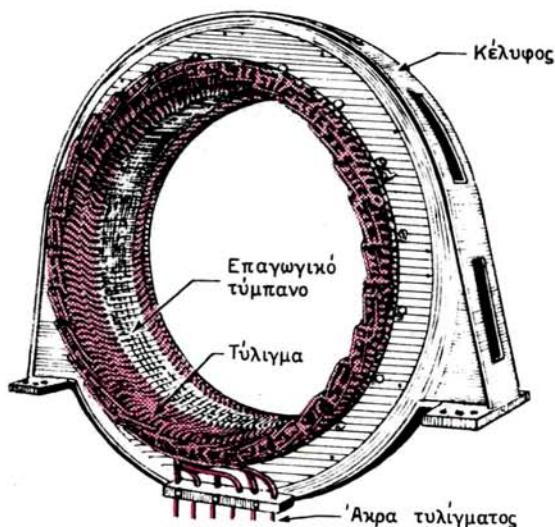
5.2.2 Εναλλακτήρες με εσωτερικούς πόλους.

Στους εναλλακτήρες αυτούς το επαγωγικό τύμπανο είναι τοποθετημένο στο ακίνητο μέρος της μηχανής, δηλαδή στο στάτη. Οι μαγνητικοί πόλοι είναι τοποθετημένοι ακτινικά στον άξονα του περιστρεφόμενου δρομέα και γι' αυτό ονομάζονται και **εναλλακτήρες με περιστρεφόμενους πόλους**. Το σχήμα 5.2δ παριστάνει εναλλακτήρα με εσωτερικούς πόλους αποσυναρμολογημένο, ώστε να φαίνονται τα διάφορα μέρη από τα οποία αποτελείται. Η διεγέρτρια και στους εναλλακτήρες αυτούς είναι συνδεμένη συνήθως απευθείας στον άξονα του εναλλακτήρα, από τον οποίο και παίρνει κίνηση. Στα επόμενα θα εξετάσουμε λεπτομερέστερα την κατασκευή των διαφόρων μερών της μηχανής.

Το σχήμα 5.2ε δείχνει το στάτη ενός άλλου εναλλακτήρα με εσωτερικούς πόλους. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, ο στάτης αποτελείται από ένα εξωτερικό κέλυφος, κατασκευασμένο συνήθως από χαλύβδινα ελάσματα, μέσα στο οποίο το-



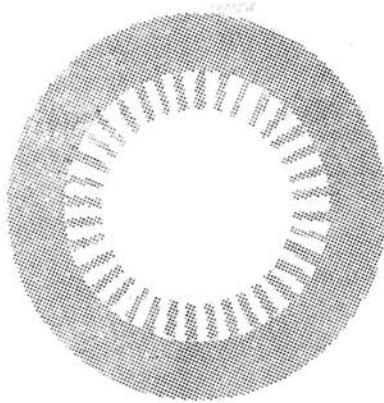
Σχ. 5.2δ.
Εναλλακτήρας με εσωτερικούς πόλους.



Σχ. 5.2ε.
Στάτης από μεγάλο εναλλακτήρα με εσωτερικούς πόλους.

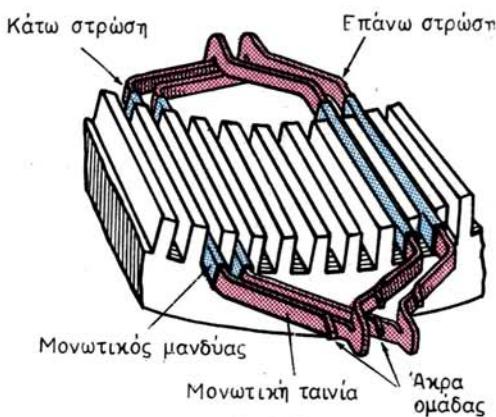
ποθετείται και στρεώνεται το επαγωγικό τύμπανο.

Το επαγωγικό τύμπανο αποτελείται από τον πυρήνα και το τύλιγμα. Ο πυρήνας του τυμπάνου κατασκευάζεται, όπως και στις μηχανές συνεχούς ρεύματος, από πολλούς δίσκους, που έχουν όμως τη μορφή του σχήματος 5.2στ. Οι δίσκοι αυτοί είναι κατασκευασμένοι από μαγνητικά ελάσματα πάχους συνήθως 0,5 mm, με επιφανειακή μόνωση από ειδικό βερνίκι. Τα δόντια, που έχουν οι δίσκοι, σχηματίζουν κατά τη συγκρότηση του πυρήνα οδοντώσεις παράλληλες προς τον άξονα της μηχανής, μέσα στα αυλάκια των οποίων τοποθετείται το τύλιγμα.



Σχ. 5.2στ.

'Έλασμα πυρήνα επαγωγικού τυμπάνου.



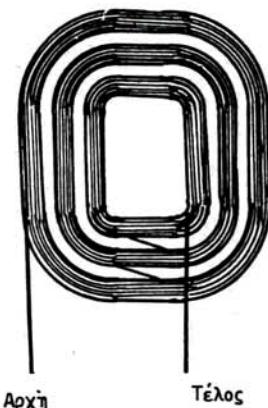
Σχ. 5.2ζ.

Τύλιγμα σε δυο στρώσεις με διαμορφωμένες ομάδες.

Τα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος (με εσωτερικούς ή εξωτερικούς πόλους) κατασκευάζονται σε δυο βασικούς τύπους.

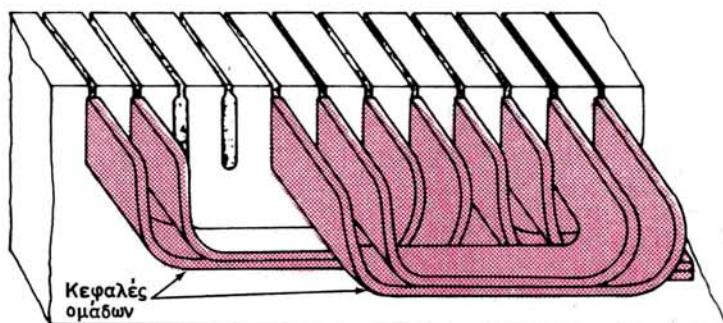
Ο ένας είναι **το τύλιγμα σε δυο στρώσεις**, όπως στις μηχανές συνεχούς ρεύματος (βλ. παράγραφο 2.5). Κατασκευάζεται με διαμορφωμένες ομάδες (σχ. 5.2ζ), τα άκρα των οποίων συνδέονται μεταξύ τους, ώστε τελικά να μένουν ελεύθερα τα άκρα του τυλίγματος, τα οποία οδηγούνται στους ακροδέκτες της μηχανής (σχ. 5.2ε).

Ο άλλος τρόπος κατασκευής των τυλιγμάτων εναλλασσόμενου ρεύματος είναι **το τύλιγμα σε μια στρώση**, οπότε σε κάθε αυλάκι των οδοντώσεων του τυμπάνου υπάρχει από ένα μόνο στοιχείο του τυλίγματος. Στην περίπτωση αυτή το τύλιγμα αποτελείται από συγκροτήματα ομάδων (σχ. 5.2η), που κατασκευάζονται από σπείρες σύρματος κυκλικής διατομής. Με κατάλληλη διαμόρφωση των κεφαλών των ομάδων, τα συγκροτήματα τοποθετούνται στα αυλάκια των οδοντώσεων, ό-



Σχ. 5.2η.

Συγκρότημα ομάδων τυλίγματος σε μια στρώση.



Σχ. 5.2θ.

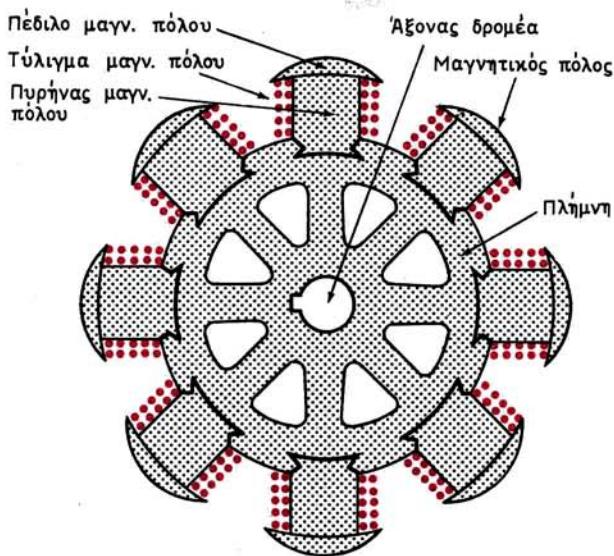
Διαμόρφωση κεφαλών σε τύλιγμα μιάς στρώσεως.

πως φαίνεται στο σχήμα 5.2θ. Τα άκρα των συγκροτημάτων συνδέονται μεταξύ τους και μένουν ελεύθερα τα άκρα του τυλίγοστος.

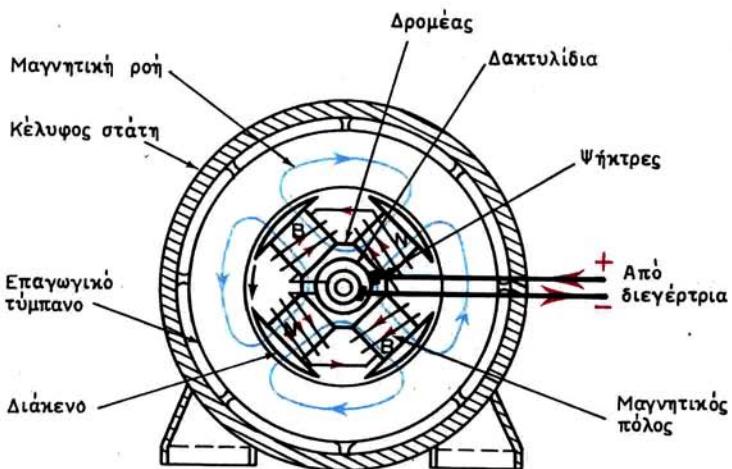
Ο δρομέας των εναλλακτήρων με εσωτερικούς πόλους φέρει, όπως αναφέρθηκε, μαγνητικούς πόλους στερεωμένους ακτινικά. Το σχήμα 5.2ι δείχνει τον τρόπο στερεώσεως των μαγνητικών πόλων στον άξονα του δρομέα με τη βοήθεια ειδικής **πλήμνης**.

Στους τριφασικούς εναλλακτήρες, όπως είναι όλοι οι εναλλακτήρες των σταθμών παραγωγής, οι πυρήνες των πόλων και τα πέδιλά τους είναι κατασκευασμένα από συμπαγή μαλακό χάλυβα. Το **διάκενο** πάχους μερικών πτm, που υπάρχει μεταξύ των πεδίλων των μαγνητικών πόλων και του επαγωγικού τυμπάνου, επιτρέπει την ελεύθερη περιστροφή του δρομέα μέσα στο στάτη (σχ. 5.2ια).

Τα τυλίγματα των πόλων τοποθετούνται επάνω στους πυρήνες πριν από την τοποθέτηση των πεδίλων και συνδέονται μεταξύ τους, συνήθως σε σειρά, με τρόπο, ώστε να δημιουργούνται διαδοχικά μαγνητικοί πόλοι με αντίθετη πολικότητα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2ια. Το ίδιο σχήμα δείχνει και τη διαδρομή της μαγνητι-



Σχ. 5.2ι.
Μαγνητικοί πόλοι οκταπολικού εναλλακτήρα.



Σχ. 5.2ia.
Διέγερση εναλλακτήρα με εσωτερικούς πόλους.

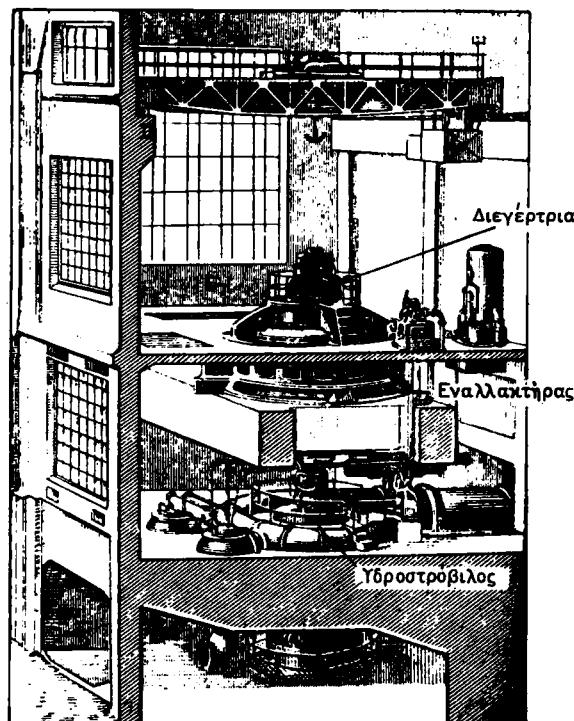
κής ροής που δημιουργείται, η οποία κλείνει κύκλωμα μέσω του πυρήνα του επαγωγικού τυμπάνου. Δηλαδή δείχνει τη **χρήσιμη μαγνητική ροή**. Η **μαγνητική ροή σκεδάσεως** δεν παριστάνεται στο σχήμα (παράγρ. 2.6).

Για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή για τη διέγερση της μηχανής, τα τυλίγματα των πόλων τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα από τη διεγέρτρια. Γι' αυτό χρησιμοποιούνται ψήκτρες και δύο δακτυλίδια, που είναι στερεωμένα επάνω

στον άξονα του δρομέα. Το ρεύμα διεγέρσεως έχει ένταση και τάση πολύ μικρότερες από το κύριο ρεύμα του εναλλακτήρα και συνεπώς η κατασκευή των δακτυλίδιών αυτών δεν παρουσιάζει δυσκολίες.

Στους εναλλακτήρες με περιστρεφόμενους πόλους, με την τοποθέτηση του επαγγελματικού τυμπάνου στο στάτη και όχι στο δρομέα, διατίθεται πολύ περισσότερος χώρος για τις οδοντώσεις του πυρήνα. Έτσι γίνεται εύκολα η μόνωση των αγωγών του τυλίγματος και όταν ακόμα ο εναλλακτήρας πρόκειται να παράγει ρεύμα υψηλής τάσεως (π.χ. 15000 V).

Με την τοποθέτηση όμως των μαγνητικών πόλων επάνω στο δρομέα δημιουργείται καταπόνηση σε αυτούς από τις φυγόκεντρες δυνάμεις, που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία. Για το λόγο αυτό οι εναλλακτήρες με εσωτερικούς πόλους δεν είναι κατάλληλοι για μεγάλες ταχύτητες περιστροφής. Τους χρησιμοποιούμε όταν η κινητήρια μηχανή είναι σχετικά βραδύστροφη, όπως είναι οι μεγάλες μηχανές εσωτερικής καύσεως και οι υδροστρόβιλοι των υδροηλεκτρικών σταθμών. Στην περίπτωση μάλιστα των υδροηλεκτρικών σταθμών ο εναλλακτήρας συχνά κατασκευάζεται με τον άξονά του κατακόρυφο, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2ιβ. Από άποψη διαστάσεων χαρακτηριστικό των εναλλακτήρων αυτών, είναι ότι έχουν μεγάλη διάμετρο (π.χ. 7 m) και μικρό σχετικά μήκος κατά τον άξονα.



Σχ. 5.2ιβ.
Εναλλακτήρας με υδροστρόβιλο.

5.2.3 Στροβιλοεναλλακτήρες.

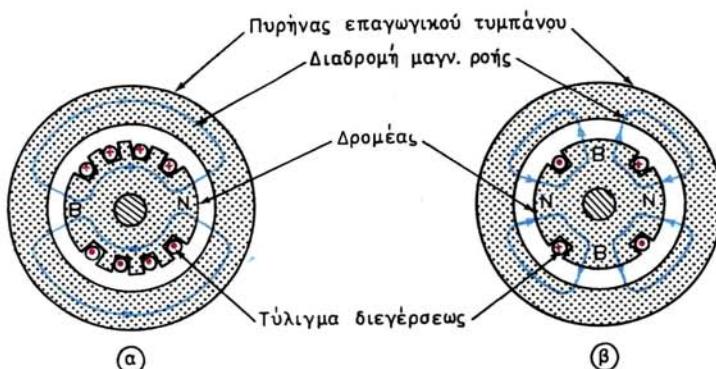
Οι στροβιλοεναλλακτήρες ανήκουν στην κατηγορία των εναλλακτήρων με περιστρεφόμενους πόλους, και κατασκευάζονται για να λειτουργούν με κινητήριες μηχανές που έχουν μεγάλη ταχύτητα περιστροφής (π.χ. 3000 στρ/min), όπως είναι οι ατμοστρόβιλοι. Από άποψη διαστάσεων χαρακτηριστικό αυτών των εναλλακτήρων είναι ότι έχουν μικρή σχετικά διάμετρο δρομέα (π.χ. 1 m) αλλά μεγάλο μήκος κατά τον άξονα (π.χ. 5 m).

Ο στάτης των στροβιλοεναλλακτήρων δεν διαφέρει κατασκευαστικά από τον στάτη των εναλλακτήρων με εσωτερικούς πόλους. Η διαφορετική μορφή που έχει το κέλυφός τους οφείλεται στις ανάγκες ψύξεως της μηχανής, που θα εξετάσομε στην επόμενη παράγραφο.

Ο δρομέας των στροβιλοεναλλακτήρων διαφέρει ουσιαστικά στην κατασκευή του από το δρομέα των εναλλακτήρων με εσωτερικούς πόλους. Ο δρομέας των στροβιλοεναλλακτήρων δεν φέρει **ορατούς πόλους**, όπως στο σχήμα 5.2ι, αλλά αποτελείται από ένα συμπαγές κυλινδρικό τύμπανο από χυτοχάλυβα κοινό με τον άξονα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2ιγ.



Σχ. 5.2ιγ.
Δρομέας στροβιλοεναλλακτήρα.



Σχ. 5.2ιδ.
Μαγνητικό πεδίο διεγέρσεως στροβιλοεναλλακτήρων.

Κατά μήκος της κυλινδρικής επιφάνειας υπάρχουν αυλάκια μέσα στα οποία τοποθετείται το τύλιγμα διεγέρσεως, το οποίο στερεώνεται με μεγάλη επιμέλεια. Οι σπείρες αυτού του τυλίγματος συνδέμενες μεταξύ τους σε σειρά, τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα από τη διεγέρτρια. Αυτό γίνεται και εδώ με τη βοήθεια δύο

δακτυλιδίων στερεωμένων στον άξονα του δρομέα. Έτσι, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2ιδ (a), δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο διεγέρσεως με δύο πόλους, το οποίο περιστρέφεται μαζί με το δρομέα. Σπάνια κατασκευάζονται και τετραπολικοί στροβιλοεναλλακτήρες, οπότε το τύλιγμα διεγέρσεως είναι διαμορφωμένο έτσι, ώστε να σχηματίζεται μαγνητικό πεδίο με τέσσερεις πόλους [σχ. 5.2ιδ(β)].

5.3 Ψύξη των εναλλακτήρων.

Κατά τη λειτουργία τους οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως και κάθε άλλη ηλεκτρική μηχανή, θερμαίνονται από τη θερμότητα που παράγεται από τις απώλειες. Η θέρμανση αυτή εκδηλώνεται με ανύψωση της θερμοκρασίας των διαφόρων μερών της μηχανής.

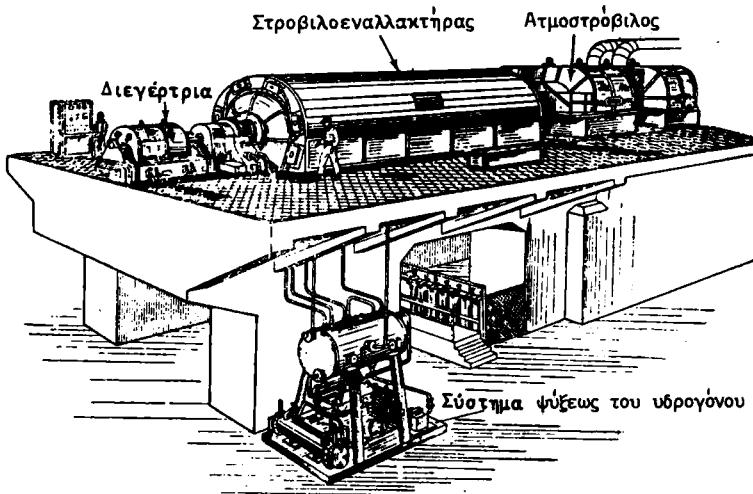
Η θερμοκρασία μιας μηχανής που λειτουργεί παύει να αυξάνεται και σταθεροποιείται σε ορισμένη τιμή, όταν η θερμότητα που αποβάλλει στον περιβάλλοντα χώρο γίνει ίση με τη θερμότητα που παράγουν οι απώλειες. Η αποβολή της θερμότητας στον περιβάλλοντα χώρο καλείται **ψύξη της μηχανής**.

Κατά την κατασκευή κάθε ηλεκτρικής μηχανής λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα μέτρα, ώστε η ψύξη της να γίνεται κανονικά. Έτσι, κατά τη λειτουργία της με το ονομαστικό της φορτίο η μηχανή φθάνει σε μια **προκαθορισμένη μέγιστη θερμοκρασία**, στην οποία δεν διατρέχουν κίνδυνο καταστροφής οι μονώσεις της. Η προκαθορισμένη αυτή θερμοκρασία εξαρτάται από το είδος των μονωτικών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή της μηχανής. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι οι κίνδυνοι που διατρέχουν οι μονώσεις μιας ηλεκτρικής μηχανής από υπερθέρμανση είναι: είτε να υποστούν άμεση καταστροφή (καύση) λόγω πολύ υψηλής θερμοκρασίας, είτε να ελαττωθεί η διάρκεια της ζωή τους και συνεπώς και η διάρκεια ζωής της μηχανής, από παρατεταμένη θέρμανση σε θερμοκρασία όχι πολύ μεγάλη, αλλά όμως μεγαλύτερη από εκείνη που έχει καθορίσει ο κατασκευαστής της.

Όπως αναφέραμε, η ψύξη των μηχανών γίνεται με μετάδοση στον περιβάλλοντα χώρο, δηλαδή στον περιβάλλοντα αέρα, της θερμότητας των απωλειών. Οι κατασκευαστές των εναλλακτήρων για να εξασφαλίσουν τη μετάδοση αυτή αφήνουν: α) διάκενο μεταξύ κελύφους του στάτη και πυρήνα του επαγωγικού τυμπάνου (σχ. 5.2ια), β) ορισμένα διάκενα αερισμού μεταξύ των μαγνητικών ελασμάτων από τα οποία κατασκευάζεται ο πυρήνας του επαγωγικού τυμπάνου και γ) κανάλια κυκλοφορίας του αέρα κατά μήκος των δρομέων των στροβιλοεναλλακτήρων.

Ο αέρας, τον οποίο στροβιλίζει ο περιστρεφόμενος δρομέας της μηχανής, εξασφαλίζει την ψύξη των εναλλακτήρων με μεγάλη διάμετρο, όπως είναι οι εναλλακτήρες με εξωτερικούς ή με ορατούς εσωτερικούς πόλους. Η προσθήκη μάλιστα ενός ανεμιστήρα στο δρομέα (σχ. 5.2δ) διευκολύνει την ψύξη ακόμα περισσότερο.

Στους στροβιλοεναλλακτήρες όμως, όπου οι επιφάνειες μεταδόσεως της θερμότητας είναι περιορισμένες, λαμβάνονται πρόσθετα μέτρα, τα οποία δίνουν ιδιαίτερη μορφή στο κέλυφος των μηχανών αυτών (σχ. 5.3). Περικλείουν δηλαδή τη μηχανή σε αεροστεγές κέλυφος, το οποίο αποτελεί μέρος κλειστού κυκλώματος κυκλοφορίας του αέρα που ψύχει τη μηχανή. Η κυκλοφορία του αέρα μένει στο κλειστό κύκλωμα γίνεται με τη βοήθεια ανεμιστήρων. Ο αέρας διερχόμενος από



Σχ. 5.3.
Στροβιλοεναλλακτήρας μεγάλης ισχύος.

τον εναλλακτήρα παραλαμβάνει τη θερμότητα των απωλειών και θερμαίνεται. Από εκεί οδηγείται στο **ψυγείο**, όπου ψύχεται με τη βοήθεια συνήθως νερού και έπειτα οδηγείται πάλι στον εναλλακτήρα για να επαναλάβει τον κύκλο.

Μεγάλο πλεονέκτημα του συστήματος με κλειστό κύκλωμα για τον αέρα ψύξεως είναι, ότι ο αέρας που κυκλοφορεί είναι φίλτραρισμένος και απαλλαγμένος από μόρια σκόνης. Έτσι τα τυλίγματα της μηχανής είναι πάντοτε καθαρά.

Το σύστημα αυτό στους μεγάλους στροβιλοεναλλακτήρες (επάνω από 30 000 kVA) έχει καλύτερη απόδοση, αν αντί ατμοσφαιρικού αέρα μέσα στο κλειστό κύκλωμα υπάρχει υδρογόνο. Το υδρογόνο έχει καλύτερες θερμικές ιδιότητες από τον αέρα. Ένα κυβικό μέτρο υδρογόνου που διέρχεται από τον εναλλακτήρα παραλαμβάνει μεγαλύτερο ποσό θερμότητας, από όσο παραλαμβάνει ένα κυβικό μέτρο αέρα, για την ίδια ανύψωση της θερμοκρασίας. Επίσης το υδρογόνο, που έχει μικρότερη πυκνότητα, απαιτεί μικρότερη ισχύ από τον ανεμιστήρα κυκλοφορίας, από αυτήν που θα απαιτούσε ο αέρας με την ίδια ταχύτητα και την ίδια πίεση. Αυτό βελτιώνει τον ολικό βαθμό αποδόσεως του εναλλακτήρα.

Η χρησιμοποίηση υδρογόνου σαν ψυκτικού αερίου απαιτεί να είναι απόλυτα στεγανό το κλειστό σύστημα κυκλοφορίας, όχι μόνο για να μην έχομε διαφυγές υδρογόνου, αλλά κυρίως για να αποφεύγεται η είσοδος ατμοσφαιρικού αέρα σε αυτό και ο κίνδυνος εκρήξεως, που υπάρχει σε αυτή την περίπτωση. Λόγω των πολυπλόκων οργάνων παρακολουθήσεως και ελέγχου που απαιτούνται, το σύστημα αυτό είναι οικονομικά συμφέρον μόνο στους πολύ μεγάλους στροβιλοεναλλακτήρες.

5.4 Παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος.

5.4.1 Αρχή λειτουργίας των εναλλακτήρων.

Στα εδάφια 2.1.2 και 2.1.3 εξηγήσαμε την αρχή λειτουργίας των γεννητριών

εναλλασσόμενου ρεύματος. Όπως αναφέραμε, από τη μορφή που έχει το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο (σχ. 2.1δ) εξαρτάται η μορφή της καμπύλης που παριστάνει τη μεταβολή της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως, που δημιουργείται από επαγωγή μέσα στους αγωγούς (σχ. 2.1στ). Οι κατασκευαστές των εναλλακτήρων προσπαθούν, ώστε η καμπύλη αυτή να πλησιάζει τη γνωστή **ημιτονοειδή καμπύλη**.

Όταν ο εναλλακτήρας έχει περισσότερους από δύο μαγνητικούς πόλους, τότε η καμπύλη του δεξιού μέρους του σχήματος 2.1δ παριστάνει πώς μεταβάλλεται η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο δυο ετερώνυμων διαδοχικών πόλων, π.χ. ένα βόρειο πόλο και τον επόμενο νότιο πόλο. Συνεπώς για να παραστήσουμε τη μεταβολή του B σε όλη τη περιφέρεια του επαγωγικού τυμπάνου θα πρέπει να επαναλάβομε την καμπύλη ρ φορές, δηλαδή όσος είναι ο αριθμός των ζευγών των μαγνητικών πόλων της μηχανής.

Όταν σε ένα διπολικό εναλλακτήρα (σχ. 2.1ε) το επαγωγικό τύμπανο κάνει μια πλήρη στροφή (360 γεωμετρικές μοίρες), η ηλεκτρεγερτική δύναμη στους αγωγούς συμπληρώνει ένα πλήρη κύκλο (σχ. 2.1στ). Δηλαδή το γνωστό από την Ηλεκτροτεχνία παραστατικό διάνυσμα της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως διαγράφει γωνία 360 ηλεκτρικών μοιρών.

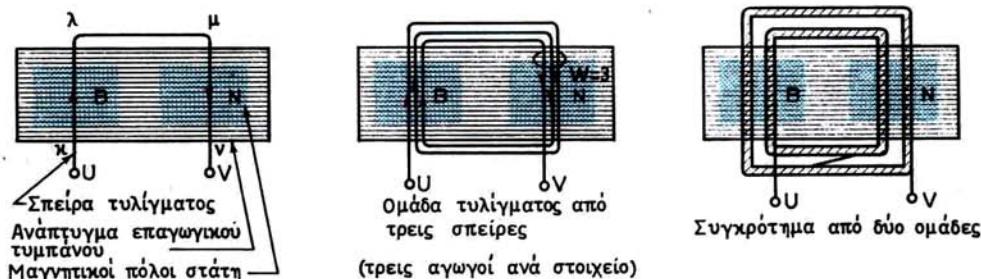
Αν ο εναλλακτήρας έχει ρ ζεύγη μαγνητικών πόλων, τότε σε μια πλήρη στροφή του επαγωγικού τυμπάνου η ηλεκτρεγερτική δύναμη στους αγωγούς θα εκτελεί ρ κύκλους. Δηλαδή ένας πλήρης κύκλος της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως (360 ηλεκτρικές μοίρες) συμπληρώνεται με στροφή του επαγωγικού τυμπάνου κατά 360/ρ γεωμετρικές μοίρες. Συνεπώς, όταν το επαγωγικό τύμπανο διαγράφει γεωμετρική γωνία θ, το παραστατικό διάνυσμα της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως διαγράφει ηλεκτρική γωνία:

$$\theta_{\eta\lambda} = \rho \cdot \theta \quad \text{σε ηλεκτρικές μοίρες}$$

Άρα μεταξύ των γεωμετρικών και ηλεκτρικών γωνιών υπάρχει η σχέση:

$$\theta = \frac{\theta_{\eta\lambda}}{\rho} \quad \text{σε γεωμετρικές μοίρες}$$

Στο σχήμα 5.4(a) παριστάνεται το ανάπτυγμα του επαγωγικού τυμπάνου της απλής μηχανής του σχήματος 2.1ε με τη σπείρα των δυο αγωγών κ-λ και μ-ν. Στο ίδιο σχήμα έχουν σημειωθεί και η θέση που έχουν κάποια στιγμή σε σχέση με το επαγωγικό τύμπανο οι πόλοι της μηχανής.



Σχ. 5.4.
Ομάδες τυλίγματος.

Όπως εξηγήσαμε μέσα στη σπείρα αναπτύσσεται εναλλασσόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη, της οποίας τη γραφική παράσταση δίνει το σχήμα 2.1στ.

Αν μέσα στα δυο αυλάκια του τυμπάνου (σχ. 2.1ε) τοποθετήσομε μια **ομάδα τυλίγματος** που αποτελείται από ω σπείρες, δηλαδή με ω αγωγούς σε κάθε στοιχείο, όπως δείχνει το σχήμα 5.4 (β), είναι εύκολο να αντιληφθούμε ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη της ομάδας είναι πάλι εναλλασσόμενη της ίδιας συχνότητας, η στιγμιαία όμως τιμή της θα είναι ω φορές μεγαλύτερη από τη στιγμιαία τιμή της μιας σπείρας. Η ίδια σχέση υπάρχει και μεταξύ των **ενδεικνυμένων πιρών** των ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων της σπείρας και της ομάδας. Από τα δύο άκρα Ζ και Ν της ομάδας μπορούμε να τροφοδοτήσουμε φορτίο με εναλλασσόμενο ρεύμα, που θα έχει τη μορφή της καμπύλης του σχήματος 2.1στ.

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη, την οποία είναι δυνατό να λάβομε από μία ομάδα τυλίγματος, δεν επαρκεί για τις ανάγκες της πράξεως, γιατί ο αριθμός των αγωγών που μπορούμε να τοποθετήσουμε στο αυλάκι μιας οδοντώσεως είναι περιορισμένος. Γ' αυτό το λόγο στα πραγματικά τυλίγματα των εναλλακτήρων συνδέομε σε σειρά περισσότερες από μία ομάδες τοποθετημένες σε γειτονικές οδοντώσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4(γ). Στο σχήμα αυτό σε ώντα πολικό βήμα υπάρχουν δυο ομάδες του τυλίγματος. Το σύνολο των ομάδων που συνδέονται σε σειρά σε ώντα πολικό βήμα το ονομάζουμε **συγκρότημα ομάδων**. Αποδεικνύεται ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη του συγκροτήματος ομάδων είναι και αυτή εναλλασσόμενη. **Η ενδεικνυμένη τιμή είναι λίγο μικρότερη από το άθροισμα των ενδεικνυμένων πιρών των ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων των ομάδων, από τις οποίες αποτελείται.**

Στους εναλλακτήρες με εσωτερικούς πόλους η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο ακολουθεί πάλι την καμπύλη του σχήματος 2.1δ, όταν ο δρομέας δεν περιστρέφεται. Κατά τη λειτουργία όμως του εναλλακτήρα, ενώ οι αγωγοί του επαγωγικού τυμπάνου είναι ακίνητοι, περιστρέφονται οι μαγνητικοί πόλοι και μαζί με αυτούς το μαγνητικό πεδίο. Οι αγωγοί τέμνουν τότε τις μαγνητικές γραμμές του πεδίου ή ακριβέστερα οι μαγνητικές γραμμές τέμνουν τους αγωγούς. Κατά τα γνωστά από την Ηλεκτροτεχνία, δημιουργείται και πάλι σε κάθε αγωγό του τυλίγματος ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή, της οποίας η στιγμιαία τιμή εξαρτάται από την αντίστοιχη τιμή της μαγνητικής επαγωγής. Άρα η ηλεκτρεγερτική δύναμη κάθε αγωγού θα μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το χρόνο σύμφωνα με την καμπύλη του σχήματος 2.1στ. Δηλαδή θα είναι ημιτονοειδής εναλλασσόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη. Όμοια θα είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη και όλου του εναλλακτήρα.

Αν θέλομε να προσδιορίσουμε τη φορά, που έχει σε κάποια χρονική στιγμή ή ηλεκτρεγερτική δύναμη μέσα σε ώντα αγωγό, εφαρμόζομε τον κανόνα του δεξιού χεριού (εδάφιο 2.1.1). Πρέπει όμως για φορά κινήσεως του αγωγού να λάβομε την αντίθετη της φοράς κινήσεως του μαγνητικού πεδίου.

5.4.2 Συχνότητα και ταχύτητα περιστροφής.

Όπως εξηγήσαμε στο προηγούμενο εδάφιο, η ηλεκτρεγερτική δύναμη εναλλακτήρα, ο οποίος έχει ω ζεύγη μαγνητικών πόλων, εκτελεί ω πλήρεις κύκλους σε κάθε στροφή του δρομέα.

Αν ο δρομέας περιστρέφεται με ταχύτητα n_s στρ/s, ο αριθμός των κύκλων στο δευτερόλεπτο, δηλαδή η συχνότητα f της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως, θα δίνεται από τη σχέση:

$$f = p \cdot n_s \quad \text{σε Hz}$$

όπου: p είναι ο αριθμός των ζευγών των μαγνητικών πόλων και n_s ο αριθμός στροφών του εναλλακτήρα στο δευτερόλεπτο.

Όταν την ταχύτητα περιστροφής την εκφράζομε σε στροφές στο λεπτό (στρ/min) η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$f = \frac{p \cdot n_s}{60} \quad \text{σε Hz}$$

Π.χ. αν εξαπολικός εναλλακτήρας ($p = 3$) περιστρέφεται με ταχύτητα $n_s = 1000$ στρ/min, θα δίνει ρεύμα συχνότητας:

$$f = \frac{p \cdot n_s}{60} = \frac{3 \times 1000}{60} = 50 \text{ Hz}$$

Από τον τύπο, που δίνει τη συχνότητα, προκύπτει η ταχύτητα περιστροφής την οποία πρέπει να έχει ο εναλλακτήρας για να παράγει ρεύμα ορισμένης συχνότητας. Η ταχύτητα αυτή, που ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα, είναι:

$$n_s = \frac{f}{p} \quad \text{σε στρ/s}$$

$$\text{ή } n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad \text{σε στρ/min}$$

όπου: f είναι η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος σε Hz και p ο αριθμός των ζευγών των μαγνητικών πόλων.

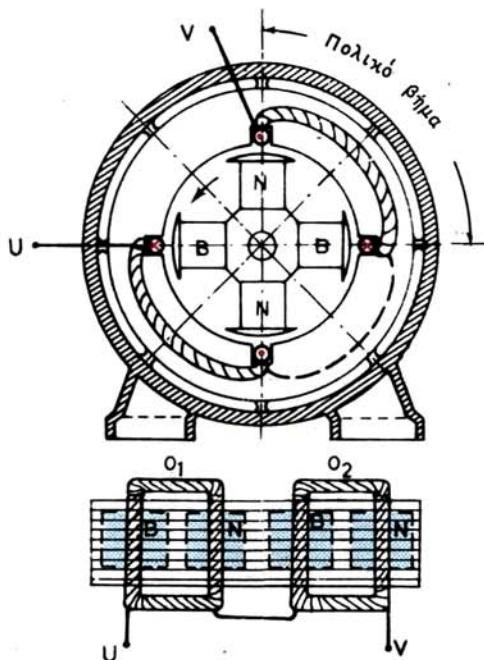
Στην Ελλάδα, καθώς και σε όλη την Ευρώπη, έχει καθιερωθεί στα δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος η συχνότητα να είναι $f = 50\text{Hz}$. Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας, ο οποίος δίνει τις σύγχρονες ταχύτητες των εναλλακτήρων για τον αντίστοιχο αριθμό των ζευγών μαγνητικών πόλων, ώστε να παράγουν ρεύμα συχνότητας 50 Hz:

Για $p = 1$	έχομε $n_s = 3000$	στρ/min
» $p = 2$	» $n_s = 1500$	»
» $p = 3$	» $n_s = 1000$	»
» $p = 4$	» $n_s = 750$	»
» $p = 5$	» $n_s = 600$	»
» $p = 6$	» $n_s = 500$	»
» $p = 8$	» $n_s = 375$	»
» $p = 10$	» $n_s = 300$	» κλπ.

5.5 Μονοφασικοί εναλλακτήρες.

Ο απλός εναλλακτήρας, τον οποίο περιγράψαμε στα εδάφια 2.1.2, 2.1.3 και 5.4.1, είναι ένας διπολικός εναλλακτήρας, που έχει ένα μόνο τύλιγμα στο επαγωγικό του τύμπανο. Τα άκρα U και V του τυλίγματος (σχ. 5.4) συνδέονται με τους ακροδέκτες του εναλλακτήρα. Όταν ο εναλλακτήρας είναι με εξωτερικούς πόλους, η σύνδεση αυτή γίνεται, όπως αναφέραμε και στο εδάφιο 5.2.1, μέσω δακτυλιδιών. Στους ακροδέκτες του εναλλακτήρα είναι δυνατό να συνδέσουμε **μονοφασικό φορτίο** και να το τροφοδοτήσουμε με εναλλασσόμενο ρεύμα (σχ. 2.1ζ). Ο εναλλακτήρας αυτός ονομάζεται **μονοφασικός εναλλακτήρας** και το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου **μονοφασικό τύλιγμα**.

Μονοφασικοί εναλλακτήρες είναι δυνατό να κατασκευασθούν και με περισσότερους από δύο πόλους. Στην περίπτωση αυτή σε κάθε διπλό πολικό βήμα έχομε ένα συγκρότημα ομάδων, όπως αυτό του σχήματος 5.4 (γ). Τα συγκροτήματα αυτά συνδέονται μεταξύ τους συνήθως σε σειρά, ώστε να σχηματίζεται ένα μονοφασικό τύλιγμα, τα άκρα του οποίου συνδέονται στους δύο ακροδέκτες της μηχανής.



Σχ. 5.5.
Τετραπολικός μονοφασικός εναλλακτήρας.

Το σχήμα 5.5 παριστάνει, στην απλούστερή του μορφή, ένα **τετραπολικό μονοφασικό εναλλακτήρα** με εσωτερικούς πόλους. Στο κάτω μέρος του σχήματος φαίνεται το τύλιγμα στο ανάπτυγμα του επαγωγικού τυμπάνου. Για απλότητα του σχεδίου, ο εναλλακτήρας αυτός παριστάνεται με τέσσερα αυλάκια στο επαγωγικό τύμ-

πανο, δηλαδή με ένα αυλάκι σε κάθε πολικό βήμα. Συνεπώς έχουμε μία ομάδα σε κάθε διπλό πολικό βήμα αντί για ένα συγκρότημα ομάδων, όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα. Οι ομάδες (O_1 , και O_2 στο σχήμα) συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά. Τα ελεύθερα άκρα τους U και V συνδέονται στους δύο ακροδέκτες του εναλλακτήρα.

5.6 Τριφασικοί εναλλακτήρες.

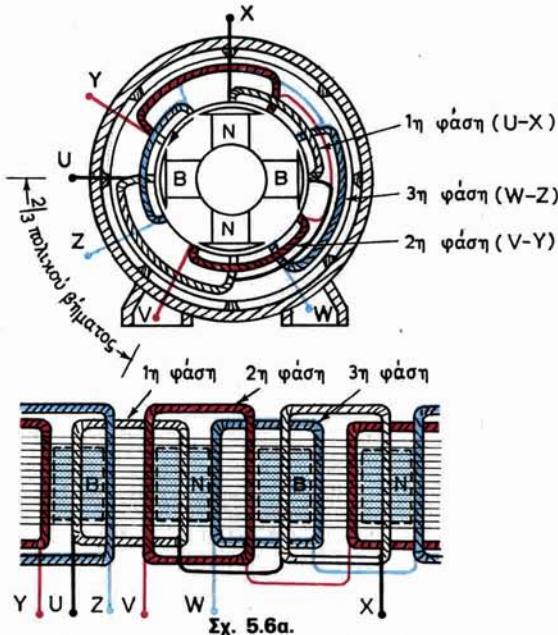
Οι τριφασικοί εναλλακτήρες έχουν στο επαγωγικό τους τύμπανο τρία όμοια και ανεξάρτητα μεταξύ τους μονοφασικά τυλίγματα, τις **τρεις φάσεις** του εναλλακτήρα. Το σχήμα 5.6α στο επάνω μέρος δείχνει ένα απλό τριφασικό εναλλακτήρα, ο οποίος έχει σε κάθε διπλό πολικό βήμα μία ομάδα τυλίγματος από την κάθε φάση. Στο κάτω μέρος του ίδιου σχήματος φαίνεται το ανάπτυγμα του επαγωγικού τυμπάνου.

Στα **τριφασικά τυλίγματα** έχουμε έξι ελεύθερα άκρα. Τρεις **αρχές** τις U, V, W, και τρία **πέρατα**, τα X, Y, Z. Το τύλιγμα U-X αποτελεί την **πρώτη φάση**, το V-Y τη **δεύτερη φάση** και το W-Z την **τρίτη φάση**.

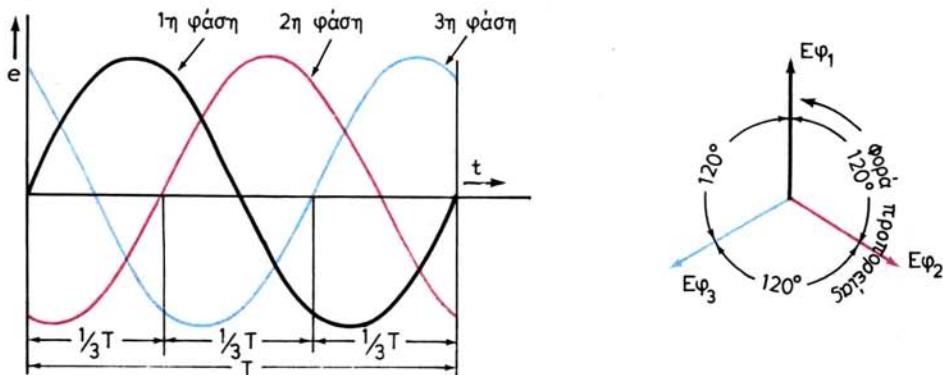
Στους τριφασικούς εναλλακτήρες, οι εναλλασσόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις, που αναπτύσσονται στις τρεις φάσεις, έχουν το ίδιο μέγεθος (τις ίδιες ενδεικνυμένες τιμές) και την ίδια συχνότητα. Οι ηλεκτρεγερτικές αυτές δυνάμεις ονομάζονται **φασικές ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις** του εναλλακτήρα.

Το τύλιγμα κάθε φάσεως απέχει από τις άλλες απόσταση ίση με $\frac{2}{3}$ του πολικού βήματος ή κατά γεωμετρική γωνία $\theta = 60^\circ$ (σε τετραπολικό εναλλακτήρα). Άρα οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα τρία τυλίγματα έχουν μεταξύ τους **φασική απόκλιση**:

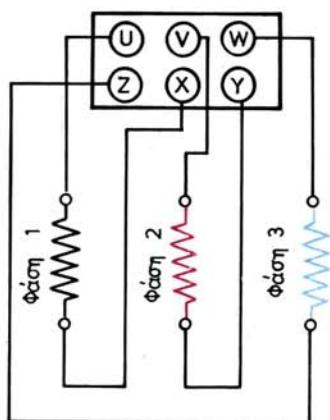
$$\theta_{\text{ηλ}} = p \cdot \theta = 2 \times 60 = 120 \text{ ηλεκτρικές μοίρες} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{3} \text{ της περιόδου } T$$



Σχ. 5.6α. Τετραπολικός τριφασικός εναλλακτήρας.



Σχ. 5.6β.
Ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις τριφασικού εναλλακτήρα.

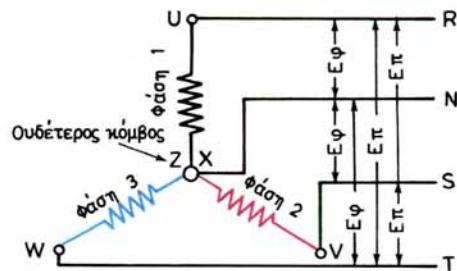
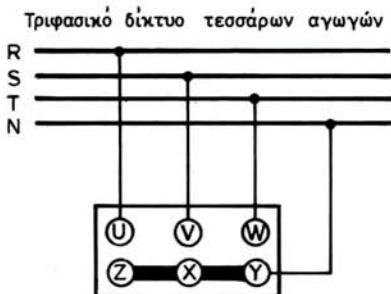


Σχ. 5.6γ.
Σύνδεση των τυλιγμάτων των τριών φάσεων με τους ακροδέκτες.

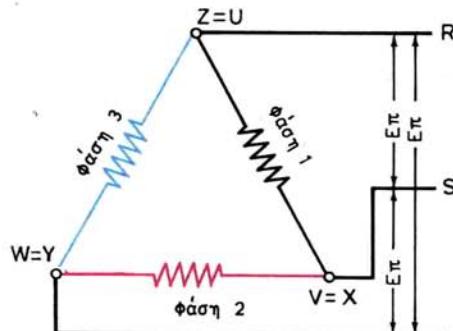
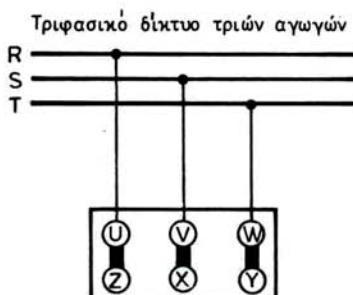
Όταν ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται κατά τη φορά, που δείχνει το τόξο στο σχήμα 5.6α, τότε η ηλεκτρεγερτική δύναμη της φάσεως 1 προπορεύεται της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως της φάσεως 2 και αυτή της φάσεως 3. Το σχήμα 5.6β παριστάνει, κατά τα γνωστά, με καμπύλες και με διανύσματα τις ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις των τριών φάσεων τριφασικού εναλλακτήρα, σε αντιστοιχία και με το σχήμα 5.6α.

Τα έξι ελεύθερα άκρα των τριών φάσεων του τριφασικού εναλλακτήρα συνδέονται στους έξι ακροδέκτες της μηχανής, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6γ. Στην περίπτωση αυτή οι τρεις φάσεις είναι τελείως ανεξάρτητες μεταξύ τους και αν συνδέσουμε ένα βολτόμετρο μεταξύ δύο ακροδεκτών, που ανήκουν σε διαφορετικές φάσεις, δεν θα δείξει τάση. Είναι η περίπτωση του **ανεξάρτητου τριφασικού συστήματος**.

Στην πράξη τα τυλίγματα των τριών φάσεων των τριφασικών εναλλακτήρων δεν τα αφήνουμε ανεξάρτητα, αλλά τα συνδέουμε μεταξύ τους με ορειχάλκινα ή χάλ-



Σχ. 5.6δ.
Σύνδεση σε αστέρα.



Σχ. 5.6ε.
Σύνδεση σε τρίγωνο.

κινα λαμάκια που τοποθετούμε στους ακροδέκτες της μηχανής. Πραγματοποιούμε έτσι αυτό που ονομάζομε **αλληλένδετο τριφασικό σύστημα**, το οποίο παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα για τα δίκτυα που τροφοδοτούνται από τέτοιους τριφασικούς εναλλακτήρες.

Υπάρχουν δύο τρόποι να συνδεθούν μεταξύ τους οι φάσεις τριφασικού εναλλακτήρα: η **σύνδεση σε αστέρα** και η **σύνδεση σε τρίγωνο**.

Στη σύνδεση σε αστέρα, συνδέομε μεταξύ τους τους ακροδέκτες Z , X , Y , όπως φαίνεται στο αριστερό μέρος του σχήματος 5.6δ, οι οποίοι έτσι αποτελούν τον **ουδέτερο κόμβο της μηχανής**. Στους τρεις άλλους ακροδέκτες U , V , W , συνδέεται το τριφασικό δίκτυο. Όταν το τριφασικό δίκτυο είναι τεσσάρων αγωγών, ο ουδέτερος αγωγός του δικτύου συνδέεται στον ουδέτερο κόμβο της μηχανής. Μεταξύ του ακροδέκτη μιας φάσεως (U , V , W) και του ουδέτερου κόμβου έχουμε τη φασική ηλεκτρεγερτική δύναμη του εναλλακτήρα E_ϕ . Μεταξύ των ακροδεκτών δύο φάσεων έχουμε την **πολική ηλεκτρεγερτική δύναμη** E_π , η οποία, όπως είναι γνωστό από την Ηλεκτροτεχνία, στη σύνδεση σε αστέρα είναι:

$$E_\pi = \sqrt{3} \cdot E_\phi = 1,73 \cdot E_\phi$$

Στη σύνδεση σε τρίγωνο τοποθετούμε τρία λαμάκια μεταξύ των ακροδεκτών,

όπως φαίνεται στο αριστερό μέρος του σχήματος 5.6ε. Στην περίπτωση αυτή η φασική ηλεκτρεγερτική δύναμη του εναλλακτήρα είναι ίση με την πολική:

$$E_\phi = E_\pi$$

Στη σύνδεση σε τρίγωνο μόνο τριφασικό δίκτυο τριών αγωγών είναι δυνατό να τροφοδοτηθεί από τον τριφασικό εναλλακτήρα. Εναλλακτήρες μονοφασικοί σπάνια χρησιμοποιούνται. Σήμερα στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται μόνο τριφασικοί εναλλακτήρες.

5.7 Τιμή ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως εναλλακτήρα.

Η ενδεικνυμένη τιμή της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως, που δημιουργείται μέσα στο τύλιγμα κάθε φάσεως ενός εναλλακτήρα, δηλαδή η φασική ηλεκτρεγερτική δύναμη, δίνεται από τη σχέση:

$$E_\phi = K \cdot p \cdot n_s \cdot w_0 \cdot \Phi \quad \text{σε V}$$

όπου: p είναι ο αριθμός των ζευγών μαγνητικών πόλων,

n_s η ταχύτητα περιστροφής σε στρ/ς,

w_0 ο αριθμός των συνδεμένων σε σειρά αγωγών του τυλίγματος κάθε φάσεως,

Φ η χρήσιμη μαγνητική ροή κάθε πόλου σε Vs

και K συντελεστής που εξαρτάται από τα γεωμετρικά στοιχεία του τυλίγματος και από το πραγματικό σχήμα της καμπύλης μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Το K στους τριφασικούς εναλλακτήρες κυμαίνεται μεταξύ 1,9 και 3,4. Συνήθως το παίρνουμε γύρω στο 2,22.

Αν στην παραπάνω εχέσαι θέσομε $f = p \cdot n_s$ έχομε:

$$E_\phi = K \cdot f \cdot w_0 \cdot \Phi \quad \text{σε V}$$

όπου: f είναι η συχνότητα της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως σε Hz.

Παράδειγμα.

Να υπολογισθεί η πολική ηλεκτρεγερτική δύναμη εξαπολικού τριφασικού εναλλακτήρα που περιστρέφεται με ταχύτητα 1000 στρ/πλην και του οποίου το επαγωγικό τύμπανο έχει 36 αυλάκια με 5 αγωγούς στο κάθε αυλάκι. Τα τυλίγματα του εναλλακτήρα είναι συνδεσμολογημένα σε αστέρα, η δε χρήσιμη μαγνητική ροή κάθε πόλου είναι 0,019 Vs (να ληφθεί $K = 2,23$).

Λύση.

Η συχνότητα της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως θα είναι:

$$f = \frac{p \cdot n_s}{60} = \frac{3 \times 1000}{60} = 50 \text{ Hz}$$

Ο αριθμός των αυλακιών σε κάθε φάση είναι:

$$z_0 = \frac{z}{3} = \frac{36}{3} = 12 \text{ αυλάκια}$$

Άρα ο αριθμός των αγωγών που είναι συνδεμένοι σε σειρά σε κάθε φάση θα είναι:

$$w_0 = 5 \times 12 = 60 \text{ αγωγοί}$$

Συνεπώς η ηλεκτρεγερτική δύναμη του εναλλακτήρα θα είναι:

$$E_\phi = 2,23 \times 50 \times 60 \times 0,019 = 127 \text{ V}$$

Η πολική ηλεκτρεγερτική δύναμη, αφού η σύνδεση είναι σε αστέρα, θα είναι:

$$E_\pi = \sqrt{3} \cdot E_\phi = 1,73 \times 127 = 220 \text{ V}$$

Στα επόμενα, όταν θα αναφέρομε την **ηλεκτρεγερτική δύναμη εναλλακτήρα** ή, θα εννοούμε την πολική ηλεκτρεγερτική δύναμη. Ανάλογα με τον τρόπο συνδεσμολογίας των τριών φάσεων του εναλλακτήρα, η E είναι ίση με την E_ϕ (σύνδεση σε τρίγωνο) ή με $1,73 \cdot E_\phi$ (σύνδεση σε αστέρα).

5.8 Μέθοδοι για ρύθμιση της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως εναλλακτήρα.

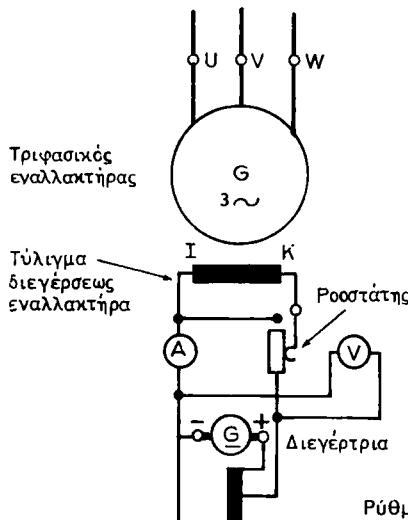
Από τη σχέση που δίνει τη φασική ηλεκτρεγερτική δύναμη (παράγρ. 5.7) συμπεραίνομε, ότι, για να μεταβάλοιμε την ηλεκτρεγερτική δύναμη ενός εναλλακτήρα, που λειτουργεί, θα πρέπει να μεταβάλομε ή την ταχύτητα περιστροφής n_s ή τη μαγνητική ροή Φ . Οι υπόλοιποι παράγοντες αναφέρονται στα κατασκευαστικά στοιχεία του εναλλακτήρα και δεν είναι δυνατό να μεταβληθούν.

Στην πράξη όμως, ούτε την ταχύτητα περιστροφής μπορούμε να μεταβάλλομε, γιατί, όπως είδαμε στο εδάφιο 5.4.2, η ταχύτητα καθορίζεται από τη συχνότητα του ρεύματος που θέλομε να παράγει ο εναλλακτήρας. Συνεπώς θα πρέπει να μεταβάλλομε τη μαγνητική ροή Φ , η οποία όπως γνωρίζομε, εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος διεγέρσεως. Άρα θα πρέπει να μεταβάλλομε την ένταση διεγέρσεως, δηλαδή την ένταση που δίνει η διεγέρτρια στο τύλιγμα των μαγνητικών πόλων του εναλλακτήρα.

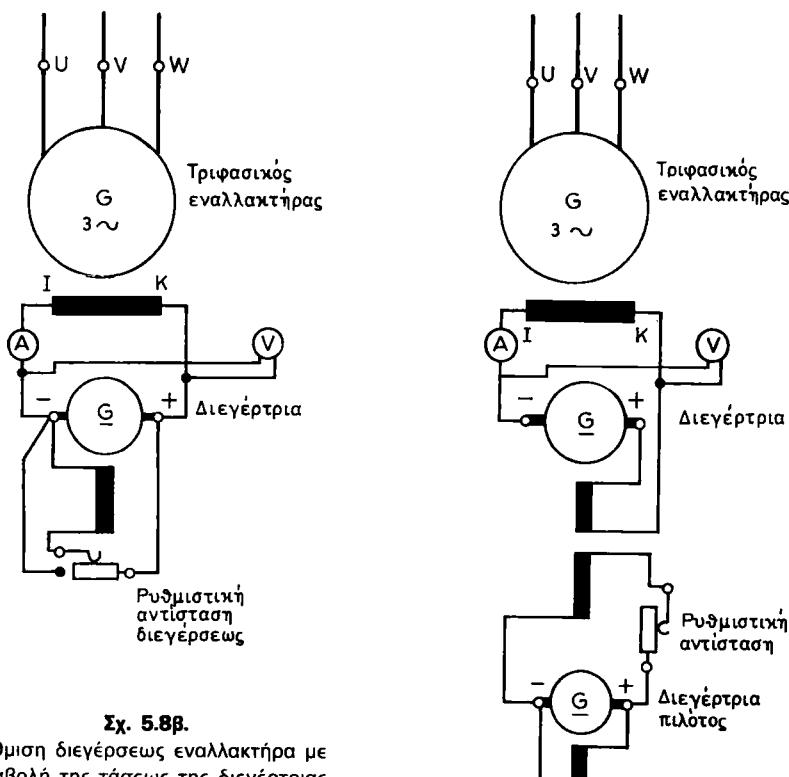
Η διεγέρτρια είναι μία γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με παράλληλη ή με σύνθετη διέγερση. Για να ρυθμίσομε την ένταση που δίνει στο τύλιγμα των μαγνητικών πόλων του εναλλακτήρα, μπορούμε να παρεμβάλλομε μια ρυθμιστική αντίσταση (ροοστάτη) σε σειρά στο κύκλωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8α. Η μέθοδος αυτή είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί μόνο σε εναλλακτήρες μικρού μεγέθους. Προτιμάται όταν από την ίδια διεγέρτρια τροφοδοτούνται οι διεγέρσεις πολλών μικρών εναλλακτήρων, οπότε καθένας έχει το δικό του ροοστάτη. Στην περίπτωση αυτή η κοινή διεγέρτρια έχει ιδιαίτερη κινητήρια μηχανή.

Στους μεγάλους εναλλακτήρες η ένταση διεγέρσεως φθάνει σε υψηλές τιμές (π.χ. 300 A), οπότε η ρύθμιση της διεγέρσεως με την παρεμβολή του ροοστάτη παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα. Στις περιπτώσεις αυτές κάθε εναλλακτήρας έχει τη δική του διεγέρτρια και η ρύθμιση της εντάσεως του ρεύματος διεγέρσεως γίνεται με τη ρύθμιση της τάσεως της διεγέρτριας. Αυτό γίνεται, όπως είναι γνωστό από τις μηχανές συνεχούς ρεύματος, με ρυθμιστική αντίσταση διεγέρσεως, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8β.

Το σχήμα 5.8γ δείχνει ένα άλλο σύστημα ρυθμίσεως της διεγέρσεως εναλλακτήρα. Σε αυτό, το κύριο τύλιγμα διεγέρσεως της διεγέρτριας τροφοδοτείται από άλλη μηχανή συνεχούς ρεύματος, τη διεγέρτρια-πιλότο, που παίρνει και αυτή κίνηση από τον άξονα του εναλλακτήρα. Η ρύθμιση της τάσεως του εναλλακτήρα



Σχ. 5.8α.
Ρύθμιση με ροοστάτη της διεγέρσεως εναλλακτήρα.



Σχ. 5.8β.

Ρύθμιση διεγέρσεως εναλλακτήρα με μεταβολή της τάσεως της διεγέρτριας.

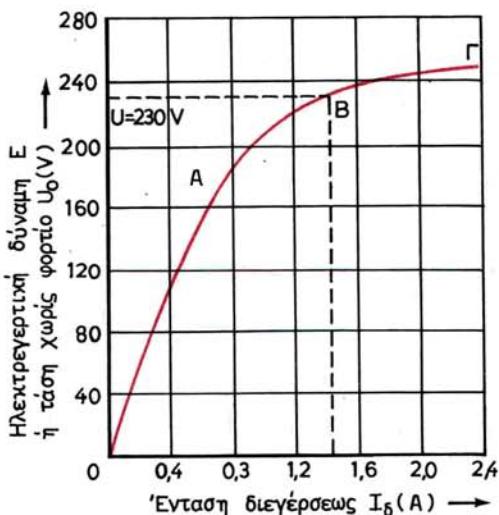
Σχ. 5.8γ.
Ρύθμιση διεγέρσεως εναλλακτήρα με διεγέρτρια-πιλότο.

γίνεται με μεταβολή της ρυθμιστικής αντιστάσεως. Το σύστημα αυτό είναι εξαιρετικά ευσταθές από άποψη σταθερότητας τάσεως.

Οι διεγέρτριες με το συλλέκτη και τις ψήκτρες που έχουν, αποτελούν συχνά πηγή ανωμαλιών στη λειτουργία των εναλλακτήρων. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια οι κατασκευαστές των μεγάλων εναλλακτήρων χρησιμοποιούν για διεγέρτρια μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, της οποίας το ρεύμα μετατρέπουν σε συνεχές με ανορθωτές. Μία διεγέρτρια-πιλότος τροφοδοτεί στις περιπτώσεις αυτές τη διέγερση της διεγέρτριας εναλλασσόμενου ρεύματος.

5.9 Λειτουργία εναλλακτήρα χωρίς φορτίο.

Η καμπύλη, η οποία δείχνει πώς μεταβάλλεται η ενδεικνυμένη τιμή της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως Ε ενός εναλλακτήρα (που, όπως γνωρίζομε, είναι ίση με την τάση χωρίς φορτίο U_0), όταν μεταβάλλεται η ένταση διεγέρσεως του I_d , ενώ η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή και ίση προς τη σύγχρονη ταχύτητα, ονομάζεται **χαρακτηριστική χωρίς φορτίο** ή **στατική χαρακτηριστική του εναλλακτήρα**.



Σχ. 5.9.
Στατική χαρακτηριστική εναλλακτήρα.

Το σχήμα 5.9 δείχνει τη στατική χαρακτηριστική ενός εναλλακτήρα. Όπως και στις μηχανές συνεχούς ρεύματος, (παράγρ. 3.1), η καμπύλη αποτελείται από το σχεδόν ευθύγραμμο τμήμα OA, στο οποίο η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι περίπου ανάλογη προς το ρεύμα διεγέρσεως, το γόνατο AB της καμπύλης και το επίσης σχεδόν ευθύγραμμο τμήμα BG. Στο τελευταίο αυτό τμήμα επέρχεται ο κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής και η ηλεκτρεγερτική της δύναμη φυσάνεται πολύ λίγο, έστω και αν η ένταση διεγέρσεως αυξηθεί σημαντικά. Οι εναλλα-

κτήρες συνήθως εργάζονται στην αρχή του τμήματος κορεσμού, δηλαδή αμέσως μετά το γόνατο της καμπύλης.

Για τους ίδιους λόγους που εξηγήσαμε στις μηχανές συνεχούς ρεύματος η καμπύλη του σχήματος 5.9 με άλλη κλίμακα παριστάνει και τη μεταβολή του Φ , όταν μεταβάλλεται η ένταση διεγέρσεως. Η καμπύλη τότε ονομάζεται **μαγνητική χαρακτηριστική του εναλλακτήρα**.

5.10 Λειτουργία εναλλακτήρων με φορτίο.

5.10.1 Χαρακτηριστική φορτίου – Διακύμανση τάσεως.

Όταν ένας εναλλακτήρας εργάζεται χωρίς φορτίο με τον κανονικό αριθμό στροφών, η τάση U_0 , που επικρατεί μεταξύ των ακροδεκτών, όπως αναφέραμε, είναι ίση με την ηλεκτρεγερτική του δύναμη E και εξαρτάται μόνο από την τιμή που έχει η ένταση διεγέρσεως. Αν φορτώσουμε τον εναλλακτήρα διατηρώντας σταθερή την τιμή της εντάσεως διεγέρσεως και την ταχύτητα περιστροφής, η τάση του εναλλακτήρα μεταβάλλεται. Ενώ όμως στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος η μεταβολή της τάσεως εξαρτάται μόνο από την ένταση φορτίσεως, στους εναλλακτήρες εξαρτάται βέβαια και από την ένταση φορτίσεως αλλά και από το συντελεστή ισχύος (συνφ) του φορτίου.

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε, ότι, όταν θα λέμε τάση του εναλλακτήρα U , θα εννοούμε την πολική του τάση, δηλαδή την τάση μεταξύ των ακροδεκτών δύο φάσεων. Επίσης, όταν θα λέμε ένταση φορτίσεως I του εναλλακτήρα, θα εννοούμε την ένταση γραμμής. Στους τριφασικούς εναλλακτήρες, παραδεχόμαστε συμμετρική φόρτιση ($I_R = I_S = I_T = I$). Κατά τα γνωστά από την Ηλεκτροτεχνία, η φασική τάση U_ϕ (η τάση στα άκρα μιας φάσεως) και η φασική ένταση I_ϕ (η ένταση που περνά μέσα από το τύλιγμα μιας φάσεως) υπολογίζονται από τις σχέσεις:

Για συνδεσμολογία του εναλλακτήρα σε αστέρα (σχ. 5.6δ):

$$U_\phi = \frac{U}{1,73} \quad \text{και} \quad I_\phi = I$$

Για συνδεσμολογία του εναλλακτήρα σε τρίγωνο (σχ. 5.6ε):

$$U_\phi = U \quad \text{και} \quad I_\phi = \frac{I}{1,73}$$

Χαρακτηριστική φορτίου του εναλλακτήρα είναι η καμπύλη, που δείχνει πώς μεταβάλλεται η τάση του (η ενδεικνυμένη τιμή της), όταν μεταβάλλεται η ένταση φορτίσεως (η ενδεικνυμένη τιμή της), ενώ ο συντελεστής ισχύος του φορτίου και η ένταση διεγέρσεως παραμένουν σταθερά και ο εναλλακτήρας περιότρέφεται με την κανονική του ταχύτητα.

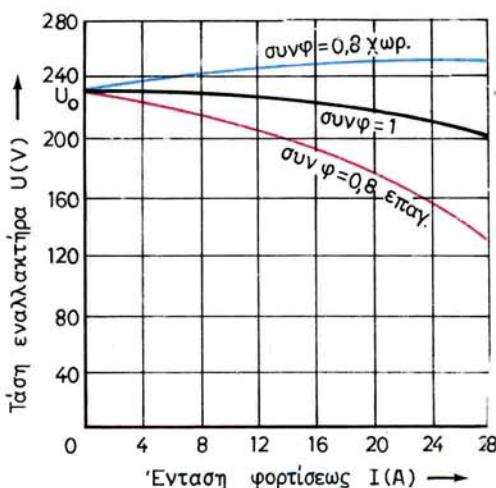
Το σχήμα 5.10α δίνει τρεις χαρακτηριστικές φορτίου ενός εναλλακτήρα, δηλαδή για τρεις συντελεστές ισχύος του φορτίου: για **ωμική φόρτιση** (συνφ = 1), για **επαγγελματική φόρτιση** με συνφ = 0,8 και για **χωρητική φόρτιση** του εναλλακτήρα με συνφ = 0,8. Όπως παρατηρούμε από τις καμπύλες του σχήματος στην περίπτωση της ωμικής φορτίσεως η τάση του εναλλακτήρα πέφτει, όταν αυξάνεται η ένταση φορτίσεως. Η πιώση αυτή της τάσεως είναι σημαντικά μεγαλύτερη όταν η φόρτι-

ση είναι επαγωγική. Αντίθετα, όταν η φόρτιση είναι χωρητική έχομε αύξηση της τάσεως του εναλλακτήρα όταν αυξάνεται η ένταση φορτίσεως.

Είναι φανερό, ότι για $I = 0$ όλες οι χαρακτηριστικές φορτίου ενός εναλλακτήρα για την ίδια ένταση διεγέρσεως και τον κανονικό αριθμό στροφών, διέρχονται από το ίδιο σημείο U_0 (σχ. 5.10a), δηλαδή από το σημείο που παριστάνει την τάση χωρίς φορτίο, γιατί τότε το συνφ του καταναλωτή δεν έχει καμιά επίδραση.

Αν U_0 είναι η τάση του εναλλακτήρα χωρίς φορτίο και U_N η τάση του με το κανονικό φορτίο (για σταθερή ένταση διεγέρσεως και ορισμένο συντελεστή ισχύος του φορτίου), τότε η **διακύμανση τάσεως** του εναλλακτήρα δίνεται από τη γνωστή και από τις μηχανές συνεχούς ρεύματος σχέση:

$$\epsilon\% = \frac{U_0 - U_N}{U_N} \cdot 100\%$$



Σχ. 5.10a.
Χαρακτηριστικές φορτίου εναλλακτήρα.

Παράδειγμα.

Ένας εναλλακτήρας έχει χαρακτηριστικές φορτίου τις καμπύλες του σχήματος 5.10a. Αν η κανονική έντασή του είναι $I = 24$ A, ποιά είναι η διακύμανση τάσεως για τους τρεις συντελεστές ισχύος του φορτίου;

Λύση.

$$\text{Για } \sigma_{\text{υφ}} = 0,8 \text{ έπαγ. } \epsilon_1\% = \frac{230 - 160}{160} \times 100\% = 44\%$$

$$\text{Για } \sigma_{\text{υφ}} = 1 \quad \epsilon_2\% = \frac{230 - 210}{210} \times 100\% = 9,5\%$$

$$\text{Για } \sigma_{\text{υφ}} = 0,8 \text{ χωρ. } \epsilon_3\% = \frac{230 - 246}{246} \times 100\% = - 6,5\%$$

5.10 Ισχύς, απώλειες και βαθμός αποδόσεως εναλλακτήρα.

a) Ισχύς.

Με τη διαθέσια των οργάνων, που έχει κάθε εγκατάσταση εναλλακτήρα, μπορούμε να μετρήσουμε κατά τη λειτουργία του την (πολική) τάση U , την ένταση γραμμής I και την **πραγματική ισχύ N** που δίνει στο δίκτυο. Από τα μεγέθη αυτά είναι δυνατό να υπολογίσουμε τη **φαινόμενη ισχύ N_s** και την **άεργη ισχύ N_b** που δίνει ο εναλλακτήρας, καθώς και το συντελεστή ισχύος συνφ. Οι σχέσεις για τον υπολογισμό είναι γνωστές από την Ηλεκτροτεχνία και τις ανακεφαλαιώνομε στον Πίνακα 5.10.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10.1
Σχέσεις υπολογισμού της ισχύος.

	Μονοφασικός εναλλακτήρας	Τριφασικός εναλλακτήρας	Γιά μονοφασικό και τριφασικό εναλλακτήρα
Φαινόμενη ισχύς (VA)	$N_s = U \cdot I$	$N_s = 1,73 \cdot U \cdot I$	$N_s = \sqrt{N_s^2 + N_b^2}$ $N_s = \frac{N}{\text{συνφ}}$
Πραγματική ισχύς (W)	$N = U \cdot I \cdot \text{συνφ}$	$N = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \text{συνφ}$	$N = \sqrt{N_s^2 - N_b^2}$ $N = N_s \cdot \text{συνφ}$
Άεργη ισχύς (var)	$N_b = U \cdot I \cdot \text{ημφ}$	$N_b = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \text{ημφ}$	$N_b = \sqrt{N_s^2 - N_v^2}$ $N_b = N_s \cdot \text{ημφ}$
Συντελεστής ισχύος	$\text{συνφ} = \frac{N}{U \cdot I}$	$\text{συνφ} = \frac{N}{1,73 \cdot U \cdot I}$	$\text{συνφ} = \frac{N}{N_s}$

β) Απώλειες.

Οι απώλειες των εναλλακτήρων που λειτουργούν με σταθερή τάση και σταθερή συχνότητα, δηλαδή με σταθερή ταχύτητα περιστροφής, όπως και των γεννητριών συνεχούς ρεύματος (παράγρ. 3.5) διακρίνονται σε:

- **Απώλειες σταθερές**, δηλαδή ανεξάρτητες από το φορτίο του εναλλακτήρα και
- **απώλειες μεταβλητές**, δηλαδή μεταβαλλόμενες με το φορτίο.

Σταθερές απώλειες N_1 , είναι και εδώ οι μηχανικές απώλειες και οι μαγνητικές απώλειες ή απώλειες σιδήρου. Οι τελευταίες διακρίνονται σε απώλειες υστερήσεως και απώλειες δινορρευμάτων. Στις σταθερές απώλειες προστίθενται επίσης και οι ηλεκτρικές απώλειες διεγέρσεως, οι οποίες είναι ίσες με το γινόμενο της εντάσεως διεγέρσεως I_d επί την τάση διεγέρσεως U_d .

Μεταβλητές απώλειες N_2 είναι μόνο οι ηλεκτρικές απώλειες ή απώλειες χαλκού του τυλίγματος του επαγγειακού τυμπάνου του εναλλακτήρα. Αν R είναι η ωμική αντίσταση ανά φάση του τυλίγματος του επαγγειακού τυμπάνου και I η ένταση φορτίσεως (γραμμής) τριφασικού εναλλακτήρα, τότε είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι το N_2 για ζεύξη του εναλλακτήρα:

— σε αστέρα είναι: $N_2 = 3 \cdot R \cdot I^2$

— σε τρίγωνο είναι: $N_2 = R \cdot I^2$

Οι ολικές απώλειες $N_{\text{απ}}$ του εναλλακτήρα είναι:

$$N_{\text{απ}} = N_1 + N_2$$

γ) Βαθμός αποδόσεως.

Ο βαθμός αποδόσεως του εναλλακτήρα είναι, κατά τα γνωστά, **ο λόγος της πραγματικής ισχύος, την οποία αποδίδει, προς την ισχύ, την οποία παίρνει από την κινητήρια μηχανή**:

$$\eta = \frac{N}{N_{\text{εισ}}} = \frac{N}{N + N_{\text{απ}}}$$

Είναι αυτονόητο ότι στη σχέση αυτή, όπου **το η προκύπτει πάντοτε αριθμός μικρότερος του 1**, όλες οι τιμές των ισχύων πρέπει να παίρνονται με την ίδια μονάδα (βαττ ή κιλοβάττ).

Ο βαθμός αποδόσεως των εναλλακτήρων έχει συνήθως τη μέγιστη τιμή του όταν ο εναλλακτήρας φορτίζεται με τα ονομαστικά του μεγέθη: Τάση, ένταση και συντελεστή ισχύος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

6.1 Χρήση και είδη μετασχηματιστών.

Παρουσιάζεται συχνά η περίπτωση να έχομε ανάγκη ηλεκτρικού ρεύματος με τάση διαφορετική από την τάση του δίκτυου, από το οποίο γίνεται η τροφοδότηση με ηλεκτρική ενέργεια. Π.χ. ενώ έχομε ανάγκη ηλεκτρικού ρεύματος με τάση 110 V, το δίκτυο ηλεκτροδοτήσεως έχει τάση 220 V.

Στο συνεχές ρεύμα η περίπτωση αυτή είναι δυνατό να αντιμετωπισθεί με μία αντίσταση στην οποία δημιουργούμε την πτώση τάσεως που απαιτείται. Τότε όμως έχομε σημαντική απώλεια ενέργειας, από τη θερμότητα που δημιουργείται στην αντίσταση. Σε συβαρές περιπτώσεις αναγκαζόμαστε να χρησιμοποιήσουμε ένα **ζεύγος κινητήρα-γεννήτριας**, οπότε η γεννήτρια μας δίνει συνεχές ρεύμα με την επιθυμητή τάση, ενώ ο κινητήρας τροφοδοτείται από το δίκτυο ηλεκτροδοτήσεως. Και στις δύο περιπτώσεις ο βαθμός αποδόσεως του συστήματος είναι χαμηλός ή το πολύ μέτριος.

Η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας, για να είναι οικονομικά αντίθετα η αλλαγή της τάσεως στο εναλλασσόμενο ρεύμα γίνεται με απλά μηχανήματα, τους «στατούς μετασχηματιστές» ή απλώς «**μετασχηματιστές**», οι οποίοι, εκτός του ότι είναι απλά και στιβαρά μηχανήματα, έχουν και πολύ καλό βαθμό αποδόσεως (π.χ. 98%).

Ανάλογα με τον προσορισμό τους, οι μετασχηματιστές κατασκευάζονται ως:

- Τριφασικοί μετασχηματιστές.**
- Μονοφασικοί μετασχηματιστές.**

Οι πρώτοι χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της τάσεως σε τριφασικό σύστημα και οι δεύτεροι για τον ίδιο σκοπό στο μονοφασικό ρεύμα, ή πράγμα που είναι το ίδιο, για τη μετατροπή της τάσεως μιας φάσεως τριφασικού συστήματος.

Μια άλλη διάκριση των μετασχηματιστών είναι σε:

- Μετασχηματιστές ισχύος.**
- Μετασχηματιστές οργάνων μετρήσεως.**

Οι μετασχηματιστές ισχύος είναι κατασκευασμένοι για να μεταβιθάζουν σημαντικές ισχείς, όταν πραγματοποιούν μετατροπή της τάσεως του ρεύματος. Οι μετασχηματιστές οργάνων είναι ειδικοί μετασχηματιστές πολύ μικρής ισχύος, κατάλληλοι μόνο για να υποβιθάζουν κατά ένα γνωστό λόγο την τάση ή την ένταση του ρεύματος που θέλουμε να μετρήσουμε. Όσα αναφέρομε στα επόμενα, αφορούν μόνο τους μετασχηματιστές ισχύος.

Ως προς τον τρόπο ψύξεως των μετασχηματιστών, διακρίνομε τους:

α) Ξηρούς μετασχηματιστές.

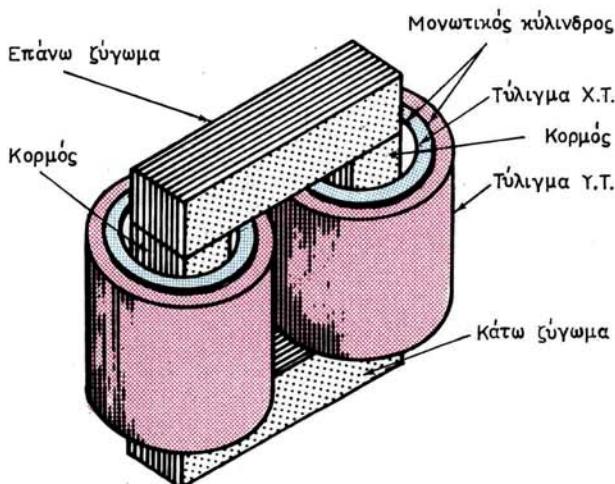
β) Μετασχηματιστές λαδιού.

Η ψύξη των ξηρών μετασχηματιστών γίνεται απ' ευθείας από τον αέρα που τους περιβάλλει, ενώ των μετασχηματιστών λαδιού γίνεται από κατάλληλο ορυκτόλαιο, μέσα στο οποίο βρίσκεται ο μετασχηματιστής.

Σημειώνομε τέλος ότι ένα είδος μετασχηματιστών είναι και οι **αυτομετασχηματιστές**, τους οποίους θα εξετάσουμε επίσης στο κεφάλαιο αυτό.

6.2 Κατασκευή μονοφασικών μετασχηματιστών.

Το κύριο μέρος κάθε μετασχηματιστή αποτελείται (σχ. 6.2α) από ένα μαγνητικό κύκλωμα, στο οποίο είναι περιελιγμένα δύο τυλίγματα, το **τύλιγμα υψηλής τάσεως** (Υ.Τ.) και το **τύλιγμα χαμηλής τάσεως** (Χ.Τ.).



Σχ. 6.2α.
Μονοφασικός μετασχηματιστής.

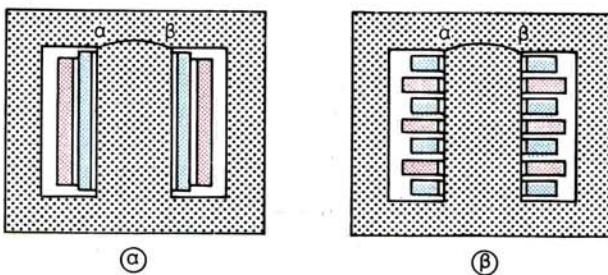
Το μαγνητικό κύκλωμα που ονομάζεται και **πυρήνας του μετασχηματιστή**, κατασκευάζεται από πολλά μαγνητικά ελάσματα, όπως αυτά που είδαμε ότι χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του πυρήνα του επαγγειακού τυμπάνου των στρεφομένων ηλεκτρικών μηχανών. Το πάχος των ελασμάτων αυτών είναι 0,35 ως 0,5 mm και φέρουν επιφανειακή μόνωση από ειδικό βερνίκι για περιορισμό των δινορρευμάτων. Σήμερα κατασκευάζονται μαγνητικά ελάσματα για μετασχηματιστές, τα οποία έχουν εξαιρετικά χαμηλές ολικές απώλειες. Αυτό επέτρεψε την κατασκευή μετασχηματιστών με πολύ καλό βαθμό αποδόσεως.

Το τύλιγμα υψηλής τάσεως των μετασχηματιστών αποτελείται από πολλές σπείρες μονωμένου χάλκινου αγωγού κυκλικής διατομής. Το τύλιγμα χαμηλής τάσεως κατασκευάζεται συνήθως από αγωγό τετραγωνικής ή ορθογωνικής διατομής μονωμένο με ταινία από χαρτί ή βαμβάκι. Αυτό έχει πάντοτε μικρότερο αριθμό σπειρών από το τύλιγμα Υ.Τ. και μεγαλύτερη διατομή αγωγού. Τα δύο τυλίγματα είναι προσεκτικά μονωμένα μεταξύ τους.

Στην περίπτωση μετασχηματιστών υποβιβασμού τάσεως, το τύλιγμα Υ.Τ. συνδέεται με την πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ από το τύλιγμα Χ.Τ. τροφοδοτείται η κατανάλωση. Σε αυτή την περίπτωση το τύλιγμα Υ.Τ. ονομάζεται **πρωτεύον τύλιγμα** ή απλά **πρωτεύον**, ενώ το τύλιγμα Χ.Τ. ονομάζεται **δευτερεύον τύλιγμα** ή **δευτερεύον**. Αντίθετα στους μετασχηματιστές ανυψώσεως τάσεως πρωτεύον ονομάζομε το τύλιγμα Χ.Τ., που συνδέεται με την πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας, και δευτερεύον το τύλιγμα Υ.Τ.

Το σχήμα 6.2α παριστάνει ένα μικρό μονοφασικό μετασχηματιστή. Ο πυρήνας του μετασχηματιστή, κατασκευασμένος όπως αναφέρθηκε από μαγνητικά ελάσματα, αποτελείται από τους δύο **κορμούς**, δηλαδή τα κατακόρυφα μέρη και από τα δύο ζυγώματα, δηλαδή τα οριζόντια μέρη. Το επάνω ζύγωμα αποχωρίζεται από τον υπόλοιπο πυρήνα για να είναι δυνατή η τοποθέτηση των τυλιγμάτων στους κορμούς. Στους μεγάλους μετασχηματιστές, και το κάτω ζύγωμα αποτελεί ιδιαίτερο τμήμα του πυρήνα.

Οι μετασχηματιστές, που έχουν τα τυλίγματα στους δύο κορμούς, όπως στο σχήμα 6.2α, ονομάζονται **μετασχηματιστές τύπου πυρήνα**. Άλλος τύπος μετασχηματιστών είναι οι **μετασχηματιστές τύπου μανδύα**. Σε αυτούς ο πυρήνας έχει τρεις κορμούς, από τους οποίους ο μεσαίος έχει διπλάσια διατομή από τους ακραίους. Στον κορμό αυτό τοποθετούνται τα τυλίγματα, τα οποία μπορεί να είναι διαμορφωμένα σε κυλινδρούς ή δίσκους, όπως δείχνει το σχήμα 6.2β. Οι ακραίοι κορμοί χρησιμεύουν μόνο για να κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα και συνεπώς περιβάλλουν τα τυλίγματα σαν μανδύας.



Σχ. 6.28.

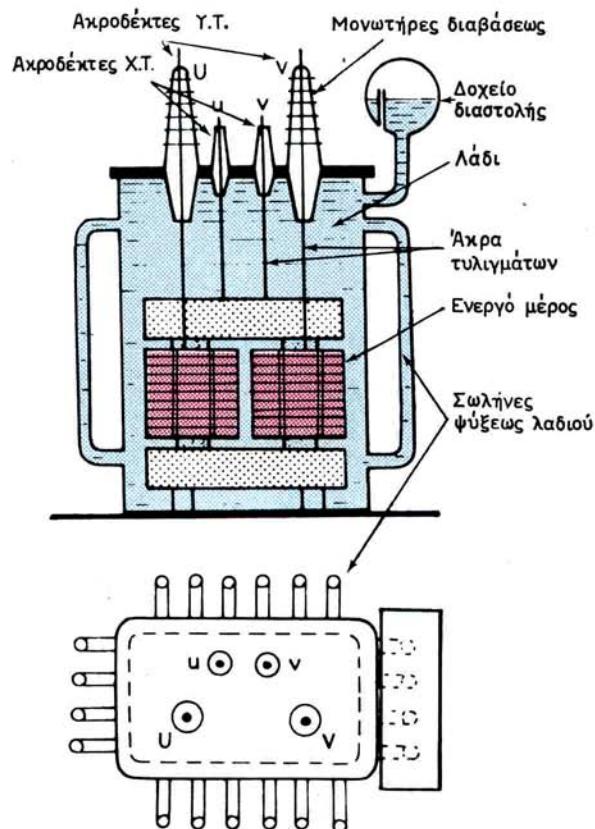
Μονοφασικοί μετασχηματιστές τύπου μανδύα: α) Με κυλινδρικό τύλιγμα. β) Με τυλίγματα σε δίσκους.

Τα τυλίγματα των μετασχηματιστών, μετά την τοποθέτησή τους στους πυρήνες, διαιποτίζονται με βερνίκι και στη συνέχεια ξηραίνονται σε ειδικούς κλιβάνους. Με τον τρόπο αυτό όχι μόνο πετυχαίνομε καλύτερη μόνωση αλλά επίσης τα τυλίγματα αποκτούν και μεγαλύτερη δυσκαμψία, η οποία ελαττώνει τις δονήσεις των αγωγών στη λειτουργία του μετασχηματιστή.

Όταν ο μετασχηματιστής είναι κατασκευασμένος για χαμηλές τάσεις, τότε ο πυρήνας με τα τυλίγματα, που ονομάζεται και **ενεργό μέρος** του μετασχηματιστή, είναι συνήθως εκτεθειμένος στον αέρα του περιβάλλοντος. Οι μετασχηματιστές αυτοί ονομάζονται **ξηροί μετασχηματιστές**. Όταν όμως είναι κατασκευασμένος για δίκτυα υψηλής τάσεως, το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή είναι τοποθετημένο

μέσα σε ένα λέβητα που είναι γεμάτος από ειδικό μονωτικό ορυκτέλαιο, τελείως απαλλαγμένο από υγρασία. Οι μετασχηματιστές αυτοί ονομάζονται **μετασχηματιστές λαδιού**. Όπως βλέπουμε στο σχήμα 6.2γ, που δείχνει παραστατικά σε τομή μετασχηματιστή αυτού του είδους, οι μονωτήρες διαβάσεως, που αποτελούν και τους ακροδέκτες των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή είναι στερεωμένοι στο κάλυμμα του λέβητα. Το μέρος των μονωτήρων κάτω από το κάλυμμα είναι βυθισμένο μέσα στο λάδι, ενώ το μέρος επάνω από το κάλυμμα είναι κατάλληλα διαμορφωμένο, ώστε να μην προκαλούνται υπερπηδήσεις, από την υψηλή τάση.

Σε ορισμένους μετασχηματιστές, όπως αυτός του σχήματος 6.2γ, ο λέβητας επικοινωνεί με δοχείο διαστολής, το οποίο είναι ως τα μισά γεμάτο λάδι και επικοινωνεί με τον ατμοσφαιρικό αέρα, για να είναι δυνατό στο λάδι του μετασχηματιστη να διαστέλλεται ελεύθερα, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του. Ταυτόχρονα το λάδι μέσα στο δοχείο διαστολής έχει χαμηλότερη θερμοκρασία και δεν παθαίνει αλλοιώσεις από τον ατμοσφαιρικό αέρα, με τον οποίο βρίσκεται σε επαφή.



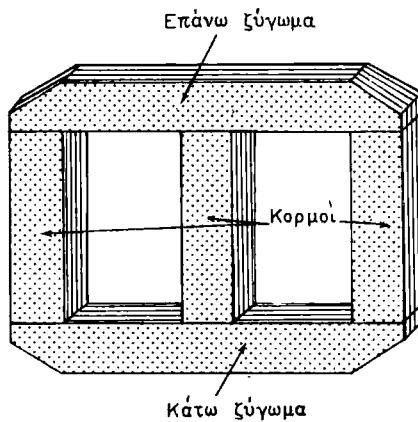
Σχ. 6.2γ.
Μονοφασικός μετασχηματιστής λαδιού.

Με το δοχείο διαστολής πετυχαίνομε να είναι πάντοτε γεμάτος με λάδι ο λέβητας του μετασχηματιστή. Έτσι δεν είναι δυνατό να σχηματισθούν κάτω από το κάλυμμα του λέβητα φυσαλίδες από αέρια λαδιού και αέρα, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν έκρηξη, όταν δημιουργηθεί κάποιος σπινθήρας.

Σε άλλους μετασχηματιστές, οι οποίοι δεν έχουν δοχείο διαστολής, ο λέβητας είναι αεροστεγώς κλεισμένος και στο άνω μέρος του υπάρχει ένα στρώμα από άζωτο, το οποίο επιτρέπει τη διαστολή του λαδιού. Με τη χρησιμοποίηση του αζώτου το ζεστό λάδι του μετασχηματιστή δεν έρχεται σε επαφή με τον ατμοσφαρικό αέρα και διατηρείται σε καλή κατάσταση για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

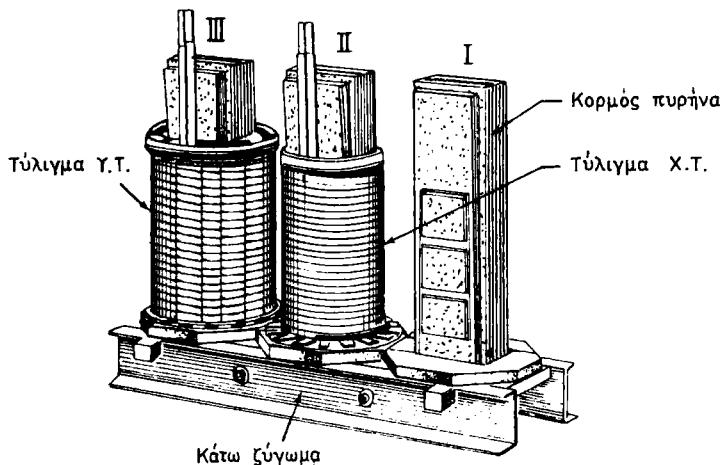
6.3 Κατασκευή τριφασικών μετασχηματιστών.

Το κύριο μέρος των τριφασικών μετασχηματιστών αποτελείται, όπως και στους μονοφασικούς, από τον πυρήνα και τα τυλίγματα. Το σχήμα 6.3α δείχνει τη μορφή του πυρήνα ενός τριφασικού μετασχηματιστή. Όπως παραπρούμε, ο πυρήνας έχει τώρα τρεις ίδιους κορμούς. Πριν τοποθετηθεί στη θέση του το επάνω ζύγωμα τοποθετούνται στους κορμούς τα τυλίγματα X.T. και Y.T. Σε κάθε κορμό έχομε ένα τύλιγμα X.T. και ένα τύλιγμα Y.T. Έτσι έχομε συνολικά τρία τυλίγματα, τις **τρεις φάσεις της X.T.** και τις **τρεις φάσεις της Y.T.** Δηλαδή έχομε έξι άκρα από τα τυλίγματα X.T. και έξι άκρα από τα τυλίγματα Y.T. Η σύνδεση των άκρων αυτών μεταξύ τους και προς τους ακροδέκτες του μετασχηματιστή θα εξηγηθεί σε άλλη παράγραφο.



Σχ. 6.3α.
Πυρήνας τριφασικού μετασχηματιστή.

Στο σχήμα 6.3β, στον κορμό I δεν έχει τοποθετηθεί ακόμη κανένα τύλιγμα. Στον κορμό II έχει τοποθετηθεί μόνο το τύλιγμα X.T. Στον κορμό III έχουν τοποθετηθεί και τα δύο τυλίγματα. Στην περίπτωση του σχήματος πρόκειται για τυλίγματα συγκεντρικά.



Σχ. 6.3β.

6.4 Ψύξη μετασχηματιστών.

Αν και οι μετασχηματιστές είναι από τις ηλεκτρικές μηχανές, που έχουν τους καλύτερους βαθμούς αποδόσεως, όμως στη λειτουργία τους θερμαίνονται και αυτοί, όπως κάθε ηλεκτρική μηχανή, από τη θερμότητα που παράγεται από τις μαγνητικές και ηλεκτρικές απώλειες, τις οποίες θα εξετάσουμε σε άλλη παράγραφο.

Κατά την κατασκευή των μετασχηματιστών λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα, ώστε να διευκολύνεται η μετάδοση της θερμότητας των απωλειών στον περιβάλλοντα χώρο. Δηλαδή λαμβάνονται μέτρα για την **ψύξη των μετασχηματιστών**, ώστε η θερμοκρασία τους στη λειτουργία να μην ανεβαίνει σε όρια επικίνδυνα για τις μονώσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα όρια αυτά έχουν σημαντικά αυξηθεί τα τελευταία χρόνια χάρη στη χρησιμοποίηση νέων μονωτικών υλικών.

Ανάλογα με τον τρόπο ψύξεως τους μετασχηματιστές τους διακρίνομε σε:

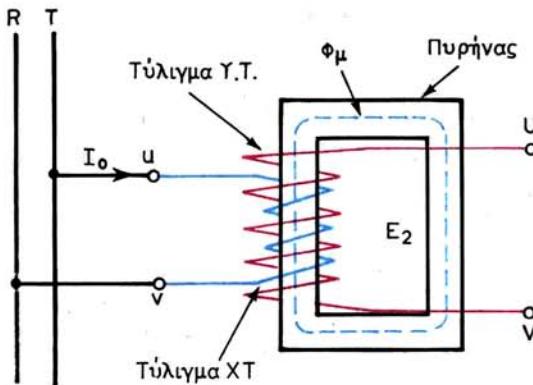
α) **Ξηρούς**, με φυσική ψύξη ή και με εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα.
Κατασκευάζονται γενικά σε μικρά μόνο μεγέθη.

β) **Λαδιού**, με φυσική κυκλοφορία του λαδιού (σχ. 6.2γ), ή και εξαναγκασμένη κυκλοφορία για πολύ μεγάλα μεγέθη.

6.5 Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστών.

6.5.1 Αρχή λειτουργίας μονοφασικών μετασχηματιστών.

Το σχήμα 6.5α παριστάνει ένα μονοφασικό μετασχηματιστή, στον οποίο χάρη απλότητας δεχόμασθε ότι υπάρχουν τυλίγματα μόνο στον ένα κορμό του πυρήνα. Το πρωτεύον τύλιγμα (X.T. στο σχήμα) τροφοδοτείται από δίκτυο με εναλλασσόμενη τάση που έχει ενδεικνυμένη τιμή U_1 . Το δευτερεύον τύλιγμα (Y.T. στο σχήμα)



Σχ. 6.5α.
Λειτουργία μονοφασικού μετασχηματιστή χωρίς φορτίο.

είναι ανοικτό, δηλαδή δεν έχει συνδεθεί κατανάλωση σε αυτό.

Η εναλλασσόμενη τάση U_1 , δημιουργεί στο πρωτεύον τύλιγμα μία εναλλασσόμενη ένταση I_0 . Αποτέλεσμα της εντάσεως αυτής είναι, όπως γνωρίζομε από την Ηλεκτροτεχνία, να αναπτυχθεί μέσα στον πυρήνα του μετασχηματιστή μαγνητική ροή Φ_μ , που κλείνει κύκλωμα όπως φαίνεται στο σχήμα. Μπορούμε να δεχθούμε ότι η μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος αυτού είναι σταθερή. Αυτό πλησιάζει πολύ στην πραγματικότητα, όταν η μαγνητική επαγωγή στον πυρήνα δεν είναι μεγάλη. Τότε η μαγνητική ροή που δημιουργείται από την εναλλασσόμενη ένταση I_0 θα είναι και αυτή εναλλασσόμενη, δηλαδή η μεταβολή της με το χρόνο θα παριστάνεται από μία ημιτονοειδή καμπύλη. Η συχνότητα f της εναλλασσόμενης αυτής μαγνητικής ροής θα είναι η ίδια με τη συχνότητα της I_0 , δηλαδή με τη συχνότητα του δικτύου τροφοδοτήσεως.

Μέσα από το δευτερεύον τύλιγμα περνά συνεπώς μία εναλλασσόμενη, δηλαδή μεταβαλλόμενη με το χρόνο μαγνητική ροή. Γνωρίζομε από την Ηλεκτροτεχνία ότι μέσα σε αυτό θα αναπτυχθεί ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή, που είναι και αυτή εναλλασσόμενη της ίδιας συχνότητας f . Η ενδεικνυμένη τιμή της δίνεται από τη σχέση:

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_\mu \quad \text{σε Vs}$$

όπου: f είναι η συχνότητα σε Hz,

w_2 ο αριθμός σπειρών του δευτερεύοντος τυλίγματος και

Φ_μ η μέγιστη τιμή σε Vs της (ημιτονοειδούς) μαγνητικής ροής.

Μπορούμε να πούμε ότι **το δευτερεύον τύλιγμα λειτουργεί σαν μια μονοφασική γεννήτρια με ηλεκτρεγερτική δύναμη E_2 , από την οποία μπορούμε να τροφοδοτήσουμε μονοφασικό καταναλωτή**, συνδέοντας τα άκρα του στους ακροδέκτες U και V .

Όπως παρατηρούμε, η ηλεκτρεγερτική δύναμη E_2 είναι ανάλογη του αριθμού των σπειρών w_2 του δευτερεύοντος. Άρα είναι δυνατό να γίνει όσο θέλομε μεγάλη, αρκεί να τοποθετήσουμε τον κατάλληλο αριθμό σπειρών (και οι μονώσεις να αντέχουν στην τάση που θα δημιουργήθει).

Η μαγνητική ροή Φ_μ υπολογίζεται από τη μέγιστη τιμή B_μ της μαγνητικής επαγωγής, την οποία θέλομε να έχομε στον κορμό του πυρήνα και από την πραγματική διατομή (διατομή σιδήρου) του κορμού:

$$\Phi_\mu = s \cdot B_\mu \quad \text{σε Vs}$$

όπου: s είναι η πραγματική διατομή του πυρήνα σε m^2 και
 B_μ η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής σε Vs/m^2 .

Στους μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος η διατομή του κορμού του πυρήνα είναι μεγάλη. Συνεπώς και η μαγνητική ροή είναι μεγάλη, δεδομένου ότι το B_μ εκλέγεται συνήθως μέσα σε ορισμένα όρια. Άρα για ορισμένη τάση δευτερεύοντος E_2 , ο μεγάλος μετασχηματιστής θα έχει μικρότερο αριθμό σπειρών w_2 από το μικρό μετασχηματιστή.

Παράδειγμα.

Μετασχηματιστής έχει διατομή κορμού $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$. Αν η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής είναι $B_\mu = 1\text{ Vs}/m^2$ και η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί το πρωτεύον είναι $f = 50\text{ Hz}$ να βρεθεί:

α) Ποια ηλεκτρεγερτική δύναμη δημιουργείται στο δεύτερευον, όταν αυτό έχει $w_2 = 200$ σπείρες και β) ποιος πρέπει να είναι ο αριθμός των σπειρών w_2 του δευτερεύοντος για να δίνει την ίδια ηλεκτρεγερτική δύναμη, όταν η διατομή του κορμού έχει διαστάσεις $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$.

Λύση.

α) Η διατομή του κορμού είναι:

$$s' = 0,1 \times 0,1 = 0,01\text{ m}^2$$

Για να βρούμε την πραγματική διατομή του πυρήνα στον κορμό, μετά την αφαίρεση των επιφανειακών μονώσεων των ελασμάτων κλπ. πάρινομε συνήθως τα $\frac{9}{10}$ της s' . Δηλαδή είναι:

$$s = 0,9 \cdot s' = 0,9 \times 0,01 = 0,009\text{ m}^2$$

΄οα: $\Phi_\mu = s \cdot B_\mu = 0,009 \times 1 = 0,009\text{ Vs}$

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_\mu = 4,44 \times 50 \times 200 \times 0,009 = 399\text{ V}$$

β) Τώρα είναι: $s = 0,9 \cdot s' = 0,9 \times 0,015 = 0,015\text{ m}^2$

Άρα: $\Phi_\mu = s \cdot B_\mu = 0,015 \times 1 = 0,015\text{ Vs}$

και $w_2 = \frac{E_2}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_\mu} = \frac{399}{4,44 \times 50 \times 0,015} \cong 90\text{ σπείρες}$

Με όμοιο τρόπο, όπως εξηγήθηκε για το δευτερεύον τύλιγμα, δημιουργείται και

στο πρωτεύον ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή E_1 , η οποία όμως δρα εδώ σαν αντιηλεκτρεγερτική δύναμη προς την τάση U_1 . Η ενδεικνυμένη τιμή της δίνεται από τη σχέση:

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_\mu \quad \text{σε Vs}$$

όπου: w_1 είναι ο αριθμός σπειρών του πρωτεύοντος τυλίγματος

Φ_μ η μέγιστη τιμή σε Vs της μαγνητικής ροής και

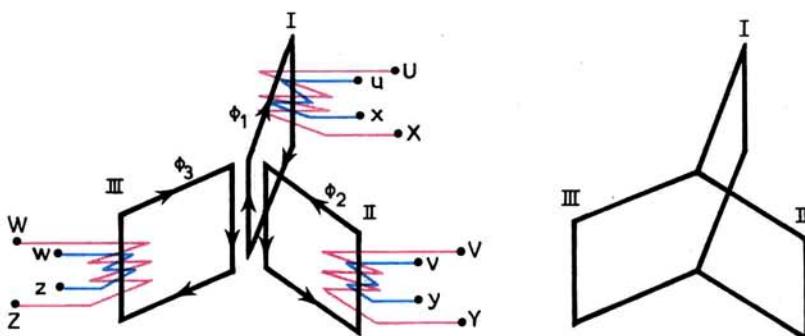
f η συχνότητα του ρεύματος σε Hz.

Η μαγνητική ροή Φ_μ (σχ. 6.5a) είναι η **χρήσιμη μαγνητική ροή του μετασχηματιστή**, γιατί συντελεί στη δημιουργία των ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων. Η ένταση I_0 όμως διερχόμενη από το πρωτεύον τύλιγμα δημιουργεί και **mία πρωτεύουσα ροή σκεδάσεως** $\Phi_{1\sigma}$, η οποία κλίνει κύκλωμα με τον αέρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5a. Αν και η ροή αυτή είναι μικρό ποσοστό της χρήσιμης μαγνητικής ροής (κάτω από 0,5%), έχει ιδιαίτερη σημασία στη λειτουργία του μετασχηματιστή, γιατί δημιουργεί αυτεπαγωγική πτώση τάσεως.

6.5.2 Αρχή λειτουργίας τριφασικών μετασχηματιστών.

Τρεις όμοιοι μονοφασικοί μετασχηματιστές είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν σε τριφασικό σύστημα για τη μετατροπή της τάσεως. Η λύση αυτή χρησιμοποιείται για μεγάλες ισχείς και πολύ υψηλές τάσεις. Στις άλλες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται οι τριφασικοί μετασχηματιστές, που περιγράψαμε στην παράγραφο 6.3. εδάφιο 3.

Για να εξηγήσουμε την αρχή λειτουργίας των τριφασικών μετασχηματιστών, ας πάρομε τρεις μονοφασικούς μετασχηματιστές με τυλίγματα μόνο στον ένα κορμό. Οι μετασχηματιστές έχουν τοποθετηθεί σε διάταξη ακτινωτή έτσι, ώστε οι κορμοί, οι οποίοι δεν έχουν τυλίγματα, να είναι ενωμένοι, όπως φαίνεται στο αριστερό μέρος του σχήματος 6.5β. Αν τα πρωτεύοντα τυλίγματα, π.χ. τα τυλίγματα χαμηλής τάσεως $u-x$, $v-y$ και $w-z$ τα ενώσουμε μεταξύ τους σε αστέρα ή σε τρίγωνο και τα συνδέσουμε σε τριφασικό δίκτυο, τότε, όπως γνωρίζουμε από την Ηλεκτροτεχνία, οι εντάσεις, που θα περάσουν από αυτά, θα έχουν κάθε στιγμή άθροισμα μηδέν. Άρα μηδενικό άθροισμα θα έχουν και οι στιγμιαίες τιμές Φ_1 , Φ_2 και Φ_3 των μαγνητικών ροών, που θα δημιουργηθούν στους τρεις πυρήνες από τις εντάσεις αυτές.



Σχ. 6.5β.

Δηλαδή από τους τρεις ενωμένους κορμούς δεν θα περνά μαγνητική ροή. Συνεπώς μπορούμε να αφαιρέσουμε τους κορμούς αυτούς και να έχομε τριφασικό μετασχηματιστή με πυρήνα, όπως φαίνεται στο δεξιό μέρος του σχήματος 6.5β.

Η κατασκευή του πυρήνα όπως τον δείχνει το σχήμα παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες, ενώ ταυτόχρονα ένας μετασχηματιστής με τέτοιο πυρήνα θα είχε μεγάλο όγκο. Γι' αυτούς τους λόγους, τους τριφασικούς μετασχηματιστές τους κατασκευάζουν με πυρήνα που έχει τη μορφή του σχήματος 6.3α. Αυτό συνεπάγεται μια μικρή ασυμμετρία στις μαγνητικές ροές, χωρίς όμως ιδιαίτερη σημασία.

Σε κάθε κορμό του πυρήνα του τριφασικού μετασχηματιστή τοποθετείται, όπως εξηγήσαμε, ένα τύλιγμα X.T. και ένα Y.T. Έτσι κάθε κορμός συμπεριφέρεται σαν μονοφασικός μετασχηματιστής. Στα επόμενα, όπου θα ασχοληθούμε με τη λειτουργία των μετασχηματιστών, θα εξετάσουμε μονοφασικούς μετασχηματιστές. Τα συμπεράσματα όμως, στα οποία θα καταλήξουμε, εφαρμόζονται εύκολα και στους τριφασικούς μετασχηματιστές. Αρκεί να έχομε υπόψη μας, ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη, η τάση και η ένταση του μονοφασικού μετασχηματιστή είναι τα αντίστοιχα φασικά μεγέθη για τους τριφασικούς μετασχηματιστές. Ανάλογα με τη σύνδεση των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών αυτών, είναι εύκολο τα φασικά μεγέθη να μετατραπούν σε πολικά.

6.6 Λειτουργία των μετασχηματιστών χωρίς φορτίο - Σχέση μεταφοράς.

Όταν ο μετασχηματιστής εργάζεται χωρίς φορτίο στο δευτερεύον (σχ. 6.5α) η ένταση I_0 είναι μικρό ποσοστό της ονομαστικής του εντάσεως (1 ως 5% για τους μέτριου και μεγάλου μεγέθους μετασχηματιστές, φθάνει μέχρι 10% για τους μικρούς). Άρα, είναι πολύ μικρές τόσο η ωμική πτώση τάσεως ($I_0 . R_1$) στο πρωτεύον τύλιγμα λόγω της ωμικής αντιστάσεως του αγωγού, όσο και η αυτεπαγωγική πτώση τάσεως ($I_0 . X_1$) λόγω της ροής σκεδάσεως. Συνεπώς στη λειτουργία χωρίς φορτίο η τάση U_1 είναι ίση με μεγάλη προσέγγιση προς την ηλεκτρεγερτική δύναμη E_1 , που δημιουργείται στο πρωτεύον:

$$U_1 = E_1$$

Στο δευτερεύον τύλιγμα στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι:

$$U_2 = E_2$$

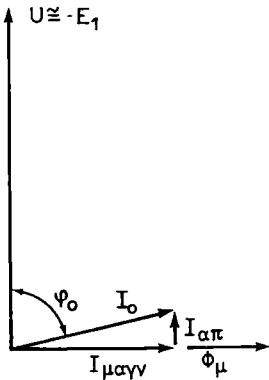
Άρα μπορούμε να γράψουμε:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_{\mu}}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_{\mu}} = \frac{w_1}{w_2} = K$$

Δηλαδή στη λειτουργία χωρίς φορτίο του μετασχηματιστή **ο λόγος των τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι ίσος με το λόγο των αριθμών σπειρών των αντιστοίχων τυλιγμάτων. Ο τελευταίος αυτός λόγος w_1/w_2 ονομάζεται σχέση μεταφοράς K του μετασχηματιστή.**

Παράδειγμα.

Ποιος είναι ο αριθμός σπειρών w_1 ενός μετασχηματιστή, ο οποίος έχει $w_2 = 2000$, και ο οποίος στη λειτουργία χωρίς φορτίο άταν τροφοδοτήθηκε με τάση



Σχ. 6.6.

$U_1 = 12$ V έδωσε $U_2 = 120$ V; Ποια είναι η σχέση μεταφοράς του μετασχηματιστή;

Λύση.

$$\text{Είναι} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

$$\text{'Αρα:} \quad w_1 = w_2 \cdot \frac{U_1}{U_2} = 2000 \times \frac{12}{120} = 200 \text{ σπείρες}$$

Η σχέση μεταφοράς είναι:

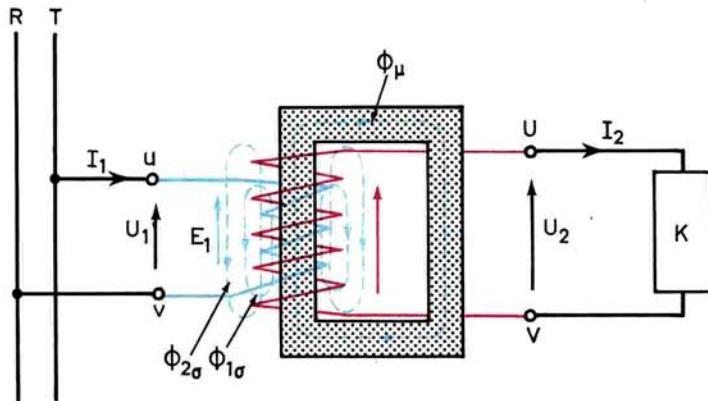
$$K = \frac{w_1}{w_2} = \frac{200}{2000} = 0,1 \quad \text{ή} \quad \frac{1}{10}$$

Στη λειτουργία χωρίς φορτίο η ένταση I_0 έχει φασική απόκλιση Φ_0 προς την τάση U_1 , περίπου ίση με 90° . Στην πραγματικότητα, λόγω των μαγνητικών απωλειών του μετασχηματιστή, η Φ_0 είναι μικρότερη από 90° , όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6. Η I_0 αναλύεται σε μία ένταση $I_{\mu\text{αγ}}$, η οποία προκαλεί τη μαγνήτιση του πυρήνα και δεν ξοδεύει ισχύ, και σε μία ένταση $I_{\alpha\pi}$, η οποία είναι σε φάση με την τάση U_1 , και δίνει την ισχύ για τις μαγνητικές απώλειες στον πυρήνα (από υστέρηση και δινορρεύματα). Η $I_{\alpha\pi}$ είναι περίπου 10% της I_0 , οπότε είναι συνθετική $I_0 \cong 0,1$.

6.7 Λειτουργία μετασχηματιστών με φορτίο.

6.7.1 Φόρτωση μετασχηματιστή.

Όταν συνδέσομε ένα καταναλωτή K στο δευτερεύον του μετασχηματιστή (σχ. 6.7a), που το πρωτεύον του τροφοδοτείται με σταθερή τάση U_1 , από το δευτερεύον τύλιγμα θα περάσει μια εναλλασσόμενη ένταση με ενδεικνυμένη τιμή I_2 . Ταυτόχρονα η ένταση, την οποία το πρωτεύον απορροφά από το δίκτυο τροφοδοτήσεως, θα αυξηθεί **αυτόματα** από I_0 σε I_1 . Αυτό, που μπορούμε να το διαπιστώσουμε πειραματικά, εξηγείται και θεωρητικά, και οφείλεται στα φαινόμενα της ηλε-



Σχ. 6.7α.
Λειτουργία μετασχηματιστή με φορτίο.

κτρομαγνητικής επαγωγής. Τελικά την ισχύ, την οποία απορροφά ο καταναλωτής από το δευτερεύον τύλιγμα, μαζί με τις απώλειες του μετασχηματιστή, την δίνει το δίκτυο, που τροφοδοτεί το πρωτεύον τύλιγμα.

Χωρίς να επεκταθούμε περισσότερο, θα αναφέρομε μόνο, ότι στη φόρτιση του μετασχηματιστή η μαγνητική ροή Φ_μ που περνά μέσα από τον πυρήνα μένει περίπου η ίδια, όση ήταν στη λειτουργία χωρίς φορτίο. Η Φ_μ εξαρτάται μόνο από τα κατασκευαστικά στοιχεία του μετασχηματιστή και όχι από τις συνθήκες φορτίσεως του. Αυτό γίνεται, γιατί όταν η I_0 γίνει I_1 , τα περισσότερα αμπερελίγματα του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή εξουδετερώνονται από τα αντίθετα αμπερελίγματα, που δημιουργούνται από το δευτερεύον τύλιγμα λόγω της εντάσεως φορτίσεως I_2 .

6.7.2 Σχέσεις μεταξύ εντάσεων και τάσεων.

Αν μετρήσομε τις εντάσεις I_1 και I_2 , θα διαπιστώσομε ότι με αρκετή προσέγγιση ισχύει η σχέση:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} = K \quad \text{ή} \quad I_2 = K \cdot I_1$$

Με προσέγγιση επίσης ισχύει και με φορτίο η σχέση, που είδαμε ότι ισχύει χωρίς φορτίο:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = K \quad \text{ή} \quad U_2 = \frac{U_1}{K}$$

Η προσέγγιση στις σχέσεις αυτές είναι τόσο μεγαλύτερη όσο οι απώλειες και οι ροές σκεδάσεως του μετασχηματιστή είναι μικρότερες. Δηλαδή σε ένα **ιδανικό μετασχηματιστή**, χωρίς απώλειες και σκεδάσεις, οι σχέσεις θα ισχουαν απόλυτα.

Από τις παραπάνω σχέσεις βγάζομε το συμπέρασμα, ότι **αν ένας μετασχηματιστής ανυψώνει την τάση στο δευτερεύον, θα υποβιβάζει με την ίδια περίπου σχέση την ένταση, που κυκλοφορεί σε αυτό**. Επίσης, επειδή η πυκνότητα του ρεύμα-

τος πρέπει να είναι η ίδια στους αγωγούς και των δυο τυλιγμάτων, μπορούμε να πούμε, ότι: **Το τύλιγμα χαμηλής τάσεως και μεγάλης εντάσεως έχει μικρό αριθμό σπειρών και αγωγό μεγάλης διατομής. Το τύλιγμα υψηλής τάσεως και χαμηλής εντάσεως έχει μεγάλο αριθμό σπειρών και αγωγό μικρής διατομής.**

Αν θεωρήσουμε αμελητέες τις απώλειες του μετασχηματιστή τότε η ισχύς N_1 , που απορροφά το πρωτεύον από το δίκτυο, είναι ίση περίπου με την ισχύ N_2 , που δίνει το δευτερεύον:

$$N_1 = N_2 \quad \text{ή} \quad U_1 \cdot I_1 \cdot \sigma_{\text{υφ}} = U_2 \cdot I_2 \cdot \sigma_{\text{υφ}}$$

$$\text{Έχουμε όμως} \quad U_2 = \frac{U_1}{K} \quad \text{και} \quad I_2 = K \cdot I_1$$

$$\text{Άρα: } U_2 \cdot I_2 = U_1 \cdot I_1 \quad \text{και συνεπώς:}$$

$$\sigma_{\text{υφ}} = \sigma_{\text{υφ}}$$

Δηλαδή η φασική απόκλιση ϕ_1 μεταξύ τάσεως και εντάσεως του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή είναι ίση περίπου με τη ϕ_2 που προκύπτει από το συντελεστή ισχύος του καταναλωτή ($\sigma_{\text{υφ}}^2$). Περίπου ίση είναι και η φαινόμενη ισχύς του πρωτεύοντος ($N_{s_1} = U_1 \cdot I_1$) με τη φαινόμενη ισχύ του δευτερεύοντος ($N_{s_2} = U_2 \cdot I_2$):

$$N_{s_1} = N_{s_2}$$

Παράδειγμα.

Ένας μονοφασικός μετασχηματιστής δίνει ένταση δευτερεύοντος $I_2 = 2 \text{ A}$ με τάση $U_2 = 20 \text{ V}$, όταν η τάση του δικτύου τροφοδοτήσεως είναι $U_1 = 220 \text{ V}$. Ποια σύνθετη αντίσταση παρουσιάζει ο μετασχηματιστής αυτός στο δίκτυο τροφοδοτήσεως, αν θεωρηθούν αμελητέες οι απώλειες του;

Η σύνθετη αντίσταση που ζητάμε είναι:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{K \cdot U_2}{I_2/K} = K^2 \cdot \frac{U_2}{I_2}$$

$$\text{όπου:} \quad K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{20} = 11$$

$$\text{Άρα:} \quad Z_1 = 11^2 \times \frac{20}{2} = 2420 \Omega$$

Κατά τη λύση του παραπάνω παραδείγματος προέκυψε η πολύ ενδιαφέρουσα σχέση ότι:

$$Z_1 = K^2 \cdot Z_2$$

$$\text{όπου: } Z_2 \text{ είναι η σύνθετη αντίσταση του καταναλωτή: } Z_2 = \frac{U_2}{I_2}$$

Όπως αναφέραμε, οι σχέσεις, που δώσαμε στην παράγραφο αυτή, είναι σχέσεις που ισχύουν με προσέγγιση. Τα πραγματικά μεγέθη διαφέρουν λίγο από εκεί-

να που προκύπτουν από τις σχέσεις αυτές. Δηλαδή μπορούμε να τις χρησιμοποιούμε όταν δεν υπάρχει ανάγκη μεγάλης ακρίβειας. Σημειώνομε επίσης ότι για τον ακριβή υπολογισμό των μεγεθών πρέπει να γίνει χρήση συνθέτων διανυσματικών διαγραμμάτων, των οποίων η ανάπτυξη ξεφεύγει από τους σκοπούς του βιβλίου. Επειδή όμως έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, στο επόμενο εδάφιο θα εξετάσομε το φαινόμενο της πτώσεως τάσεως στους μετασχηματιστές.

6.7.3 Χαρακτηριστική φορτίου - Πτώση τάσεως.

Κάθε ένα από τα δυο τυλίγματα ενός μετασχηματιστή έχει ορισμένη ωμική αντίσταση και δημιουργεί ορισμένη ροή σκεδάσεως ($\Phi_{1\sigma}$ και $\Phi_{2\sigma}$ στο σχήμα 6.7α). Αποτέλεσμα αυτών είναι, όταν ο μετασχηματιστής εργάζεται με φορτίο, να δημιουργείται σε κάθε τύλιγμά του μια ωμική και μια αυτεπαγωγική (λόγω της ροής σκεδάσεως) πτώση τάσεως. Συνεπώς η τάση U_2 με φορτίο δεν είναι ποτέ ακριβώς ίση με την τάση του δευτερεύοντος χωρίς φορτίο. Δηλαδή η U_2 με φορτίο δεν είναι ακριβώς ίση με U_1/K :

Τη μεταβολή της τάσεως του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή από τη λειτουργία χωρίς φορτίο στη λειτουργία με το κανονικό φορτίο του, για ορισμένο συντελεστή ισχύος του φορτίου και σταθερή τάση πρωτεύοντος, την ονομάζουμε **διακύμανση τάσεως** και την εκφράζουμε ως ποσοστό επί τοις εκατό της τάσεως του δευτερεύοντος με το κανονικό φορτίο.

Επειδή στη λειτουργία χωρίς φορτίο, η τάση του δευτερεύοντος είναι ίση με την ηλεκτρεγερτική του δύναμη, για τη διακύμανση τάσεως έχομε:

$$\epsilon\% = \frac{E_2 - U_{2N}}{U_{2N}} \cdot 100\%$$

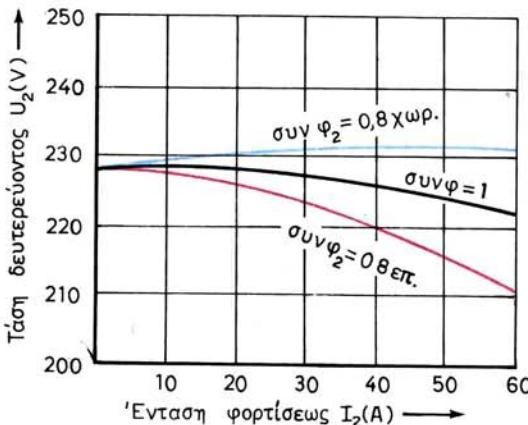
Όσο μικρότερη είναι η διακύμανση τάσεως, τόσο ποιοτικά καλύτερος είναι ο μετασχηματιστής. Στους μετασχηματιστές μέσου και μεγάλου μεγέθους, η διακύμανση τάσεως είναι κάτω του 5%.

Χαρακτηριστική φορτίου ενός μετασχηματιστή ονομάζουμε την καμπύλη, η οποία δείχνει πώς μεταβάλλεται η τάση του δευτερεύοντός του, όταν μεταβάλλεται το φορτίο του, με σταθερή τάση του πρωτεύοντος και σταθερό συντελεστή ισχύος του φορτίου.

Το σχήμα 6.7β δίνει τις χαρακτηριστικές φορτίου ενός μετασχηματιστή για τρεις διαφορετικούς συντελεστές ισχύος του φορτίου, δηλαδή για $\sigma_1 = 0,8$ χωρητικό, για $\sigma_1 = 1$ και για $\sigma_1 = 0,8$ επαγωγικό. Γενικά η τάση με φορτίο είναι χαμηλότερη της τάσεως χωρίς φορτίο. Είναι όμως δυνατό να παρουσιασθεί και μεγαλύτερη τάση, όταν το φορτίο είναι πολύ χωρητικό (π.χ. πυκνωτής).

Παράδειγμα.

Να υπολογισθεί η διακύμανση τάσεως του μετασχηματιστή, ο οποίος έχει χαρακτηριστικές φορτίου τις καμπύλες του σχήματος 6.7β, αν το κανονικό του φορτίο είναι $I_{2N} = 50 \text{ A}$.



Σχ. 6.7β.
Χαρακτηριστικές φορτίου μετασχηματιστή.

Λύση.

$$\text{Για } \sigma_{\text{υν}}\varphi_2 = 0,8 \text{ επαγ.} \quad \epsilon_1 \% = \frac{228 - 217}{217} \times 100\% = 5\%$$

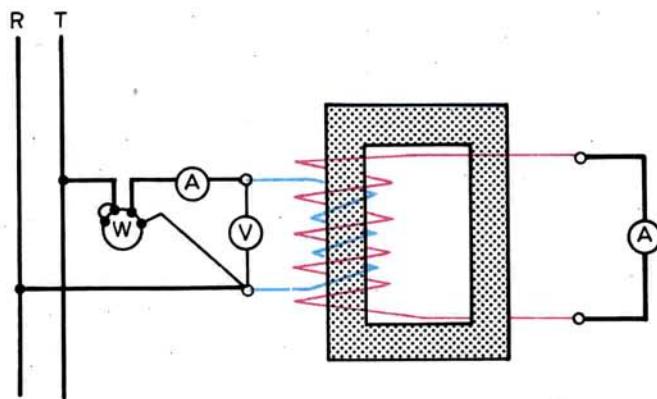
$$\text{Για } \sigma_{\text{υν}}\varphi_2 = 1 \quad \epsilon_2 \% = \frac{228 - 224}{224} \times 100\% = 1,8\%$$

$$\text{Για } \sigma_{\text{υν}}\varphi_2 = 0,8 \text{ χωρ.} \quad \epsilon_3 \% = \frac{228 - 232}{232} \times 100\% = -1,7\%$$

Σημειώνομε ότι στο διάγραμμα του σχήματος 6.7β, επειδή η πτώση τάσεως στους μετασχηματιστές είναι πολύ μικρή (συνήθως δεν υπερβαίνει τό 5%), η βαθμολόγηση του άξονα των τάσεων έχει αρχίσει από τα 200 V. Αυτό πρέπει πάντοτε να το προσέχουμε, για να μην παρασυρόμαστε σε ψεύτικες εντυπώσεις, σχετικά με την ποσοστιαία μεταβολή ενός μεγέθους (π.χ. εδώ της τάσεως U_2).

6.7.4 Τάση βραχυκυκλώσεως.

Εκτελούμε το ακόλουθο πείραμα: Σε ένα μετασχηματιστή βραχυκυκλώνομε το δευτερεύον τύλιγμα αφού παρεμβάλλομε ένα αμπερόμετρο στον αγωγό της βραχυκυκλώσεως (σχ. 6.7γ). Έπειτα τροφοδοτούμε το πρωτεύον τύλιγμα με τάση (που έχει συχνότητα ίση με την ονομαστική), την οποία αυξάνομε σιγά - σιγά αρχίζοντας από πολύ μικρές τιμές. Για κάποια τιμή U_{1K} της τάσεως του πρωτεύοντος, την οποία μετρούμε με βολτόμετρο, η ένταση στο βραχυκυκλωμένο δευτερεύον θα γίνει ίση με την ονομαστική ένταση I_{2N} του μετασχηματιστή. Τότε και η ένταση του πρωτεύοντος θα είναι ίση με την ονομαστική του ένταση I_{1N} . Την τάση αυτή U_{1K} , η οποία ξοδεύεται ολόκληρη για εσωτερική πτώση τάσεως μέσα στο μετασχηματιστή, τον ονομάζομε **τάση βραχυκυκλώσεως**. Συνήθως την εκφράζομε σαν



Σχ. 6.7γ.

Πείραμα βραχυκυκλώσεως μετασχηματιστή.

ποσοστό επί τοις εκατό της ονομαστικής τάσεως του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή:

$$u_K \% = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} \cdot 100\%$$

Παράδειγμα.

Ποια είναι η τάση βραχυκυκλώσεως ενός μετασχηματιστή 6000/400 V, στον οποίο κατά το πείραμα βραχυκυκλώσεως, για να έχομε την ονομαστική ένταση στο δευτερεύον, χρειάσθηκε να τροφοδοτήσουμε το πρωτεύον με τάση 240 V;

Λύση.

$$u_K \% = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} \cdot 100 \% = \frac{240}{6000} \times 100 \% = 4\%$$

Όπως θα εξηγήσουμε στην επόμενη παράγραφο, η τάση βραχυκυκλώσεως καθορίζει τη διανομή των φορτίων σε μετασχηματιστές που λειτουργούν παράλληλα.

Όταν γνωρίζουμε την τάση βραχυκυκλώσεως, μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανή ένταση ενός βραχυκυκλώματος στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, όταν το πρωτεύον τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση, από τη σχέση:

$$I_{2K} = \frac{I_{2N}}{u_K} \cdot 100$$

Παράδειγμα.

Στο μετασχηματιστή του προηγούμενου παραδείγματος να υπολογισθεί σε ποια τιμή μπορεί να φθάσει η ένταση βραχυκυκλώσεως στο δευτερεύον με την ονομαστική τάση τροφοδοτήσεως στο πρωτεύον, όταν η ονομαστική ένταση του δευτερεύοντος είναι $I_{2N} = 200$ A.

Λύση.

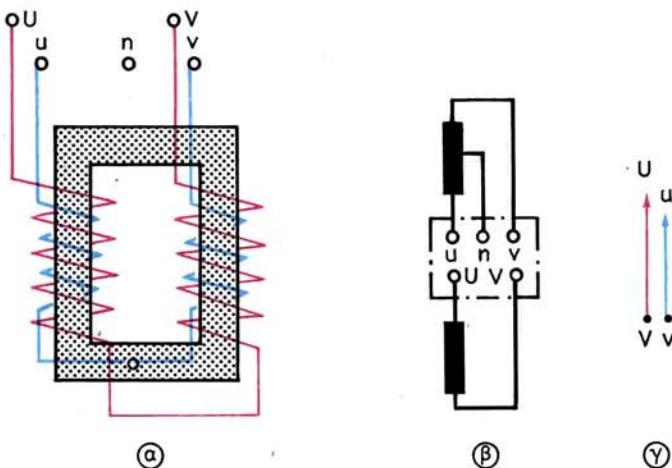
Είναι:

$$I_{2K} = \frac{I_{2N} \cdot 100}{u_K} = \frac{200 \times 100}{4} = 5000 \text{ A}$$

6.8 Συνδεσμολογία των τυλιγμάτων μετασχηματιστών.

6.8.1 Συνδεσμολογία των τυλιγμάτων μονοφασικών μετασχηματιστών.

Το σχήμα 6.8a(a) παριστάνει πώς είναι συνδεσμολογημένα τα τυλίγματα ενός μονοφασικού μετασχηματιστή, τα οποία δεχόμαστε ότι είναι περιελιγμένα κατά



Σχ. 6.8a.

Συνδεσμολογία των τυλιγμάτων μονοφασικού μετασχηματιστή.

την ίδια φορά και, όπως γνωρίζομε, είναι τοποθετημένα στους δύο κορμούς του πυρήνα. Στο (β) του σχήματος φαίνεται μία άλλη (συμβολική) σχεδίαση των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή. Στη σχεδίαση αυτή τα τυλίγματα πρέπει να θεωρηθούν ότι πηγαίνουν στην πραγματική τους (φυσική) θέση, αν στραφούν προς τα κάτω.

Οι ακροδέκτες του τυλίγματος Y.T. σημειώνονται στο κάλυμμα του μετασχηματιστή με τα κεφαλαία γράμματα U και V (ή A και B ή H_1 , και H_2). Οι ακροδέκτες του τυλίγματος X.T. σημειώνονται με τα μικρά γράμματα u και v (ή a και b ή x_1 , και x_2). Αν γίνεται και **μεσαία λήψη**, όπως στο σχήμα, ο αντίστοιχος ακροδέκτης τοποθετείται μεταξύ των άλλων δυο και σημειώνεται με τα μικρά γράμματα n (ή n_p ή x_o).

Απέναντι ακριβώς από τον ακροδέκτη U της Y.T. τοποθετείται ο ακροδέκτης u της X.T., ο οποίος έχει πάντοτε την ίδια πολικότητα με τον U . Δηλαδή τα παραστατικά διανύσματα των τάσεων UV και vu είναι σε φάση [σχ. 6.8a(γ)].

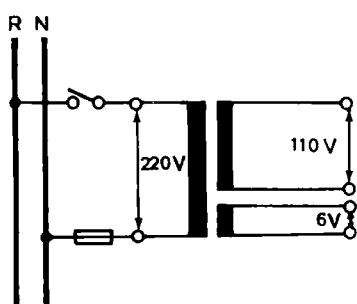
Στους μετασχηματιστές με μεσαία λήψη, μεταξύ του ακροδέκτη t_3 n και ενός από τους δύο άλλους ακροδέκτες u και v επικρατεί το μισό της τάσεως του δευτερ

ρεύοντος. Αν π.χ. η τάση του δευτερεύοντος είναι 220 V, τότε μεταξύ η και υ καθώς και μεταξύ η και ν έχομε τάση 110 V. Δηλαδή ο μετασχηματιστής δίνει στο δευτερεύον στις περιπτώσεις αυτές δύο τάσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν (110 και 220 V). Μικροί μετασχηματιστές με μεσαία λήψη χρησιμοποιούνται πολύ στις **ανορθωτικές διατάξεις** των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Με τον ίδιο τρόπο, όπως έχομε τη μεσαία λήψη, είναι δυνατό από το δευτερεύον του μετασχηματιστή να πάρομε **περισσότερες λήψεις**. Έχομε τότε ένα μετασχηματιστή ο οποίος μπορεί να δώσει πολλές τάσεις στο δευτερεύον του. Το μέγεθος κάθε μιας από τις τάσεις αυτές εξαρτάται από τον αριθμό των σπειρών του αντίστοιχου σημείου λήψεως.

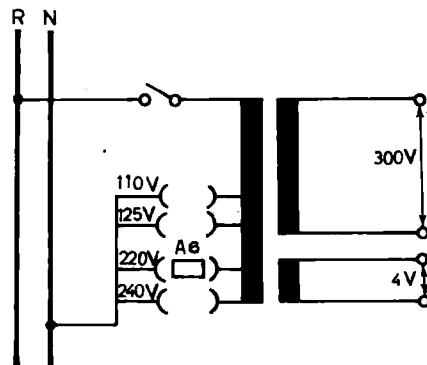
Σε ορισμένες περιπτώσεις θέλουμε να έχουμε από το δευτερεύον του μετασχηματιστή ένα ορισμένο αριθμό τάσεων **ανεξαρτήτων μεταξύ τους**. Το δευτερεύον του μετασχηματιστή έχει τότε αντίστοιχο αριθμό τυλίγματων ανεξαρτήτων επίσης μεταξύ τους. Π.χ. ο μετασχηματιστής του σχήματος 6.8β έχει στο δευτερεύον δύο τυλίγματα, τα οποία δίνουν τάσεις 110 V και 6 V, όταν το πρωτεύον του τροφοδοτείται με τάση 220 V. Ο αριθμός των σπειρών κάθε τυλίγματος καθορίζεται από τις σχέσεις μεταφοράς 220/110 V και 220/6 V.

Όταν θέλουμε ο μετασχηματιστής να είναι κατάλληλος να λειτουργήσει με περισσότερες από μία τάσεις πρωτεύοντος, δηλαδή να μπορεί να λειτουργήσει σε διάφορα δίκτυα ηλεκτροδοτήσεως, τότε βγάζουμε λήψεις από το πρωτεύον τύλιγμα. Ο μετασχηματιστής του σχήματος 6.8γ μπορεί να λειτουργήσει με τάσεις πρωτεύοντος 110, 125, 220 και 240 V, αρκεί να τοποθετήσουμε στην κατάλληλη λήψη την ασφάλεια Ασ. Από το δευτερεύον του μετασχηματιστή, το οποίο έχει δύο τυλίγματα, παίρνουμε τάσεις 300 V και 4 V.



Σχ. 6.8β.

Μετασχηματιστής με δύο τυλίγματα στο δευτερεύον.

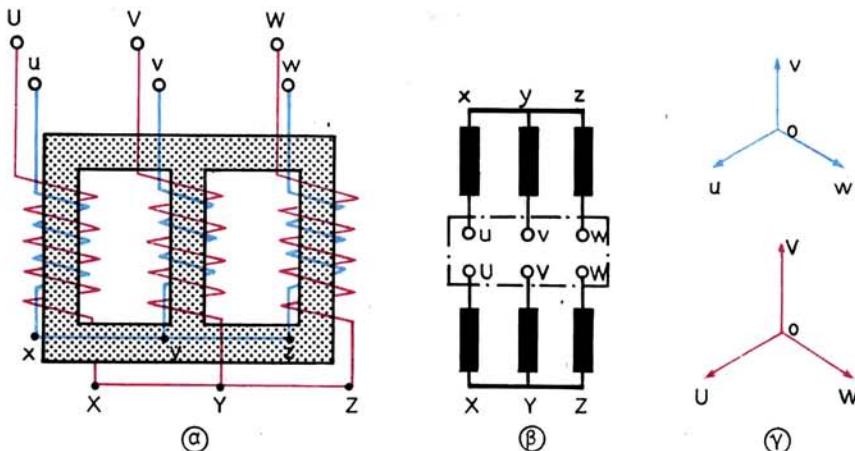


Σχ. 6.8γ.

Μετασχηματιστής για διάφορες τάσεις πρωτεύοντος.

6.8.2 Συνδεσμολογία των τυλίγματων τριφασικών μετασχηματιστών.

Το σχήμα 6.8ε(α) παριστάνει σχηματικά πώς είναι τοποθετημένα τα τρία τυλίγματα (φάσεις) Y.T. και τα τρία τυλίγματα (φάσεις) X.T. στον τριφασικό μετασχηματιστή. Τα τυλίγματα αυτά δεχόμαστε ότι είναι περιελιγμένα κατά την ίδια φορά, όπως γίνεται συνήθως στην πράξη. Στην περίπτωση του σχήματος, τόσο τα τυλίγματα Y.T. όσο και τα τυλίγματα X.T. είναι συνδεσμολογημένα σε αστέρα. Δηλαδή πρόκειται για μετασχηματιστή **ζεύξεως αστέρα-αστέρα**, όπως λέμε.



Σχ. 6.8ε.
Τριφασικός μετασχηματιστής ζεύξεως αστέρα-αστέρα.

Τα ελεύθερα áκρα των τριών φάσεων της Υ.Τ. éχουν συνδεθεί στους τρεις αντίστοιχους ακροδέκτες του καλύμματος του μετασχηματιστή, οι οποίοι είναι χαρακτηρισμένοι με τα κεφαλαία γράμματα U, V, W (ή A, B, C, ή H₁, H₂, H₃). Αντίστοιχα οι τρεις ακροδέκτες της Χ.Τ. είναι χαρακτηρισμένοι με τα μικρά γράμματα u, v, w (ή a, b, c, ή x₁, x₂, x₃). Οι συνδέσεις των áκρων X, Y, Z και x, y, z, γίνονται μέσα στο μετασχηματιστή και σχηματίζουν τους ουδέτερους κόμβους Υ.Τ. και Χ.Τ. Σε ορισμένους μετασχηματιστές οι ουδέτεροι κόμβοι συνδέονται με ιδιαίτερους ακροδέκτες πάνω στο κάλυμμα, οι οποίοι φέρουν τότε το γράμμα N (ή N_p ή H₀) για την Υ.Τ. και n (ή n_p ή x₀) για την Χ.Τ.

Το σχήμα 6.8ε(β) δίνει τη συμβολική σχεδίαση των τυλιγμάτων μετασχηματιστή ζεύξεως αστέρα-αστέρα. Στο (γ) του ίδιου σχήματος φαίνεται το διανυσματικό διάγραμμα υψηλής και χαμηλής τάσεως. Όπως παρατηρούμε, στη ζεύξη αυτή η φασική απόκλιση μεταξύ των διανυσμάτων των αντιστοίχων φάσεων είναι μηδενική.

Στη συνδεσμολογία του αστέρα (για την υψηλή ή χαμηλή τάση) ισχύουν οι γνωστές σχέσεις:

$$U_{\phi} = \frac{U}{1,73}$$

$$I_{\phi} = I$$

Παράδειγμα.

Ένας τριφασικός μετασχηματιστής κατασκευάσθηκε για να τροφοδοτείται από δίκτυο τάσεως 380 V. Στο πλήρες φορτίο του το πρωτεύον τύλιγμα, που είναι συνδεσμολογημένο σε αστέρα, απορροφά από το δίκτυο ένταση 10 A. Για ποια τάση και ποια ένταση κατασκευάσθηκε κάθε φάση του πρωτεύοντος τυλίγματος;

Λύση.

Ο αριθμός των σπειρών κάθε φάσεως του πρωτεύοντος τυλίγματος υπολογίσθηκε για τάση:

$$U_{1\phi} = \frac{U_1}{1,73} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ V}$$

Η διατομή του αγωγού, από τον οποίο είναι κατασκευασμένη κάθε φάση του πρωτεύοντος τυλίγματος, υπολογίσθηκε για ένταση:

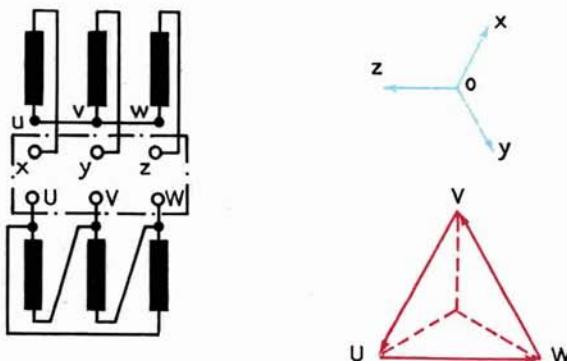
$$I_{1\phi} = I_1 = 10 \text{ A}$$

Στους τριφασικούς μετασχηματιστές τα τυλίγματα Y.T. ή X.T. ή και τα δύο μπορεί να συνδεσμολογηθούν και σε τρίγωνο. Στο σχήμα 6.8στ παριστάνεται μετασχηματιστής ζεύξεως **τριγώνου-αστέρα**, δηλαδή τριγώνου στην Y.T. και αστέρα στη X.T.

Σε κάθε φάση του τυλίγματος Y.T. εφαρμόζονται τώρα οι πολικές τάσεις του δικτύου. Συνεπώς ισχύουν οι γνωστές σχέσεις:

$$U_\phi = U$$

$$I_\phi = \frac{I}{1,73}$$



Σχ. 6.8στ.

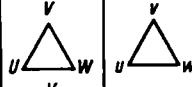
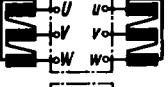
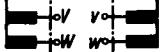
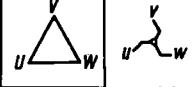
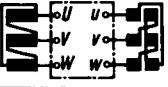
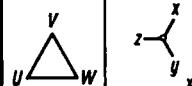
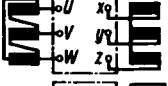
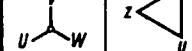
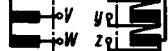
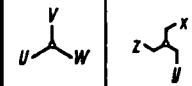
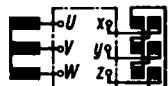
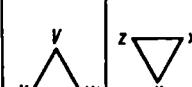
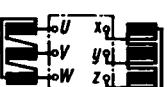
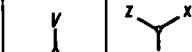
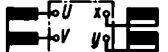
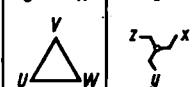
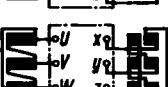
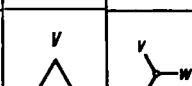
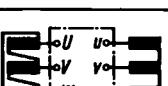
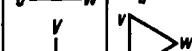
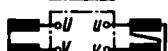
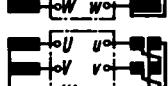
Τριφασικός μετασχηματιστής ζεύξεως τριγώνου-αστέρα.

6.8.3 Κατάταξη των τριφασικών μετασχηματιστών σε ομάδες.

Από όσα αναφέραμε στο προηγούμενο εδάφιο συμπεραίνομε, ότι υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί στη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων των τριφασικών μετασχηματιστών. Ο Πίνακας 6.8.1 δίνει τις συνδεσμολογίες που χρησιμοποιούνται στην πράξη. Ο συμβολισμός κάθε μετασχηματιστή που αναφέρεται στον πίνακα αυτό είναι ο **διεθνής συμβολισμός**. Τα γράμματα που χρησιμοποιούνται δίνουν α-μέσως και το είδος της συνδεσμολογίας. Το πρώτο γράμμα (κεφαλαίο) δίνει τη ζεύξη του τυλίγματος Y. T. και το δεύτερο (μικρό) του τυλίγματος X. T., ως εξής:

Σε τρίγωνο	= D, d
Σε αστέρα	= Y, y
Σε τεθλασμένο αστέρα	= Z, z

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.8.1
Συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών

Αριθμός διμάδας	Συμβολισμός	Διανυσματικό διάγραμμα Υ.Τ. X.Τ.	Συνδεσμολογία Υ.Τ. X.Τ.
0	Dd 0		
	Yy 0		
	Dz 0		
5	Dy 5		
	Yd 5		
	Yz 5		
6	Dd 6		
	Yy 6		
	Dz 6		
11	Dy 11		
	Yd 11		
	Yz 11		

Μετά τα δύο γράμματα ακολουθεί ένας αριθμός (0,5,6,11), που είναι ο αριθμός της ομάδας, στην οποία ανήκει ο μετασχηματιστής και έχει την ακόλουθη σημασία: Αν τον αριθμό αυτό τον πολλαπλασιάσουμε επί 30°, μας δίνει τη γωνία κατά την οποία καθυστερούν τα διανύσματα της Χ.Τ. ως προς τα αντίστοιχα διανύσματα της Υ.Τ. Ο μετασχηματιστής π.χ. του σχήματος 6.8ε έχει συμβολισμό Υ_YΟ, γιατί η γωνία μεταξύ των αντίστοιχων διανυσμάτων Υ.Τ. και Χ.Τ. είναι μηδενική.

Από την παραπάνω σημασία, που έχει ο χαρακτηριστικός αριθμός της ομάδας, συμπεραίνομε ότι όλοι οι μετασχηματιστές, που ανήκουν σε μία ομάδα, έχουν τάσεις στο δευτερεύον, οι οποίες είναι σε φάση μεταξύ τους, όταν τα πρωτεύοντά τους τροφοδοτούνται από το ίδιο δίκτυο. Αυτό φαίνεται και από τα διανυσματικά διαγράμματα του Πίνακα 6.8.1, στα οποία δεν έχουν σημειωθεί χάρη απλότητας τα βέλη των διανυσμάτων.

6.9 Παράλληλη λειτουργία μετασχηματιστών.

Όταν ένας μετασχηματιστής δεν επαρκεί για την τροφοδότηση ενός φορτίου, π.χ. ενός δίκτυου, τότε ή πρέπει να τον αντικαταστήσουμε με άλλο μεγαλύτερης ισχύος ή να συνδέσουμε παράλληλα με αυτόν ένα δεύτερο μετασχηματιστή, ο οποίος να πάρει ένα μέρος του φορτίου.

Για να μπορούν δύο ή περισσότεροι μετασχηματιστές να λειτουργήσουν παράλληλα πρέπει να εκπληρώνουν τις ακόλουθες συνθήκες:

α) **Να είναι κατασκευασμένοι για την ίδια τάση πρωτεύοντος και για την ίδια τάση δευτερεύοντος.**

β) **Να ανήκουν στην ίδια ομάδα συνδεσμολογίας (Πίνακας 6.8.1).**

γ) **Να έχουν ίσες τάσεις βραχικυκλώσεως.**

δ) **Να γίνει σωστή σύνδεση των αντίστοιχων ακροδεκτών.**

Οι τρεις πρώτες συνθήκες μπορούν εύκολα να εξακριβωθούν από τα στοιχεία, που είναι γραμμένα στις πινακίδες των μετασχηματιστών. Η εξακρίβωση της τέταρτης συνθήκης, αν δεν είμαστε βέβαιοι για την αντίστοιχία των ακροδεκτών, γίνεται με τη βοήθεια ενός βολτόμετρου που να έχει κλίμακα μετρήσεων διπλάσια της τάσεως του δευτερεύοντος των μετασχηματιστών.

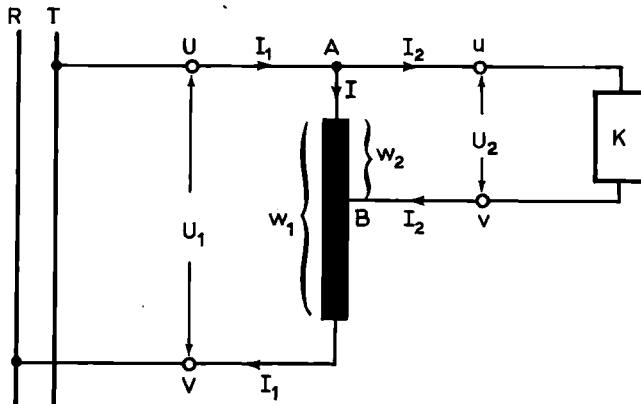
Αν εκπληρώνονται όλες οι συνθήκες που αναφέραμε, οι μετασχηματιστές θα λειτουργήσουν παράλληλα με απόλυτα ικανοποιητικό τρόπο και **καθένας θα αναλάβει από το συνολικό φορτίο ένα μέρος ανάλογο προς την ονομαστική του ισχύ.**

Στην πράξη όμως σπάνια συμβαίνει να έχομε μετασχηματιστές με απόλυτα ίσες τάσεις βραχικυκλώσεως. Γί' αυτό δεχόμασθε ότι η τρίτη συνθήκη ισχύει όταν οι τάσεις βραχικυκλώσεως δεν διαφέρουν μεταξύ τους περισσότερο από 10%. Όταν η διαφορά είναι μεγαλύτερη, ο μετασχηματιστής με τη μικρότερη τάση βραχικυκλώσεως θα αναλάβει φορτίο μεγαλύτερο από αυτό που του αναλογεί με βάση την ισχύ του.

6.10 Αυτομετασχηματιστές.

Αυτομετασχηματιστής (μονοφασικός) είναι ο μετασχηματιστής, ο οποίος έχει ένα μόνο τύλιγμα, του οποίου τα άκρα αποτελούν τους ακροδέκτες Ζ και Ζ' της υ-

ψηλης τάσεως. Οι ακροδέκτες υ και ν της χαμηλής τάσεως είναι συνδεμένοι με το ένα άκρο Α του τυλίγματος και με μία ενδιάμεση λήψη Β αυτού, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.10α. Άρα το τρήμα ΑΒ του τυλίγματος ανήκει και στο πρωτεύον και στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.



Σχ. 6.10α.
Συνδεσμολογία μονοφασικού αυτομετασχηματιστή.

Όσα έχομε αναφέρει για τις υχέσεις τάσεων και εντάσεων για το μονοφασικό μετασχηματιστή με δυο ξεχωριστά τυλίγματα (παράγρ. 6.6 και 6.7), ισχύουν και για το μονοφασικό αυτομετασχηματιστή. Ισχύουν δηλαδή και εδώ κατά προσέγγιση οι σχέσεις:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = K \quad \text{et} \quad U_2 = \frac{U_1}{K}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} = K \quad \text{et} \quad I_2 = K I_1$$

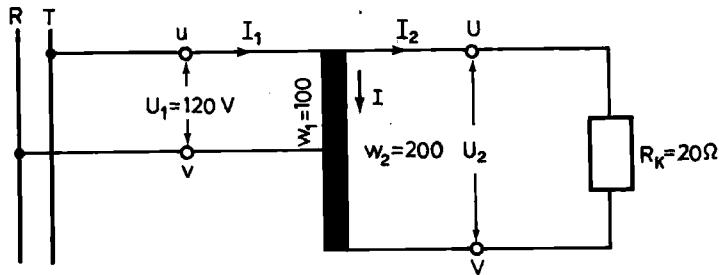
όπου: U_1 , I_1 και w_1 είναι τα γνωστά μεγέθη του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή και U_2 , I_2 , w_2 , τα αντίστοιχα του δευτερεύοντος.

Το κοινό τρήμα ΑΒ του τυλίγματος διαρρέεται από ένταση I , που είναι ίση με τη διαφορά των δύο εντάσεων I_1 και I_2 :

$$I = I_1 - I_2$$

Παράδειγμα.

Ένας αυτομετασχηματιστής τροφοδοτείται με τάση $U_1 = 120$ V. Ο αριθμός σπειρών του πρωτεύοντος είναι $w_1 = 100$. Το όλο τύλιγμα έχει $w_2 = 200$ σπείρες. Αν στο δευτερεύον του μετασχηματιστή είναι συνδεμένος ένας καταναλωτής που έχει αριθμή αντίσταση 20Ω , να υπολογισθούν η ένταση που απορροφά-ο αυτομετασχηματιστής από το δίκτυο και η ένταση στο κοινό μέρος του τυλίγματος του.



Σχ. 6.10β.

Λύση.

Στον αυτομετασχηματιστή αυτό το δευτερεύον είναι το τύλιγμα Υ.Τ. (σχ. 6.10β). Οι σχέσεις ισχύουν όπως δόθηκαν. Συνεπώς έχομε:

$$K = \frac{w_1}{w_2} = \frac{100}{200} = \frac{1}{2}$$

Άρα: $U_2 = \frac{U_1}{K} = \frac{120}{1/2} = 240 \text{ V}$

Αφού η ωμική αντίσταση του καταναλωτή είναι $R_K = 20 \Omega$ θα έχομε:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_K} = \frac{240}{20} = 12 \text{ A}$$

Συνεπώς η ένταση που απορροφά ο αυτομετασχηματιστής από το δίκτυο τροφοδοτήσεως, είναι:

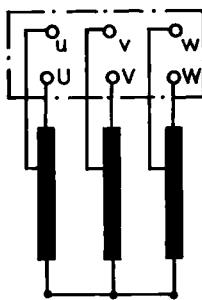
$$I_1 = \frac{I_2}{K} = \frac{12}{1/2} = 24 \text{ A}$$

και

$$I = I_1 - I_2 = 24 - 12 = 12 \text{ A}$$

Αποτέλεσμα της μειωμένη εντάσεως στο κοινό τρίμα του τυλίγματος των αυτομετασχηματιστών είναι ότι αυτό κατασκευάζεται με αγωγό μικρότερης διατομής. Συνεπώς οι αυτομετασχηματιστές απαιτούν μικρότερο βάρος αγωγών χαλκού από τους μετασχηματιστές με δύο τυλίγματα. Άλλο πλεονέκτημα των αυτομετασχηματιστών είναι ότι έχουν μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες, δηλαδή έχουν καλύτερο βαθμό αποδόσεως. Έχουν όμως και ένα σοβαρό μειονέκτημα. Επειδή υπάρχει το κοινό τρίμα του τυλίγματος, **η πλευρά της χαμηλής τάσεως δεν είναι ηλεκτρικά μονωμένη από την πλευρά της ψηλής τάσεως**. Αυτό δημιουργεί κινδύνους κατά τη χρήση τους. Γ' αυτό χρησιμοποιούνται σε ειδικές μόνο περιπτώσεις και κατασκευάζονται για σχέσεις μεταφοράς πού πλησιάζουν τη μονάδα (π.χ. 1/2).

Το σχήμα 6.10γ δείχνει τη συνδεσμολογία τριφασικού αυτομετασχηματιστή, ο οποίος, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στους μονοφασικούς αυτομετασχηματιστές, έχει σε κάθε ένα από τους τρείς κορμούς του πυρήνα από ένα μόνο τύλιγμα.



Σχ. 6.10γ.
Τριφασικός αυτομετασχηματιστής.

6.11 Ισχύς, απώλειες και θαθμός αποδόσεως μερασχηματιστών

α) Ισχύς.

Η πραγματική ισχύς που δίνει ένας μετασχηματιστής στο δευτερεύον του, όταν τροφοδοτεί κατανάλωση με τάση U_2 , ένταση I_2 και συνφ₂, δίνεται από τις σχέσεις:

Για μονοφασικό μετασχηματιστή:

$$N_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \text{συνφ}_2$$

Για τριφασικό μετασχηματιστή:

$$N_2 = 1,73 \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \text{συνφ}_2$$

Αντίστοιχα, η πραγματική ισχύς που ο μετασχηματιστής απορροφά από το δίκτυο είναι:

Για μονοφασικό μετασχηματιστή:

$$N_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \text{συνφ}_1$$

Για τριφασικό μετασχηματιστή:

$$N_1 = 1,73 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \text{συνφ}_1$$

όπου U_1 και I_1 είναι η τάση και η ένταση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή και συνφ₁ ο αντίστοιχος συντελεστής ισχύος. Για τον υπολογισμό της φαινόμενης και άεργης ισχύος καθώς και του συνφ, τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον των μετασχηματιστών, ισχύουν οι ίδιες ακριβώς σχέσεις που δίνονται στον πίνακα 5.14.1 για τις γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος.

β) Απώλειες.

Οι απώλειες στους μετασχηματιστές είναι δύο ειδών:

α) **Ηλεκτρικές απώλειες ή απώλειες χαλκού (N_h)**, είναι αυτές που οφείλονται στο φαινόμενο Τζουλ, το οποίο δημιουργείται από το ρεύμα που κυκλοφορεί στα τυλίγματα (πρωτεύον και δευτερεύον). Οι απώλειες αυτές προσδιορίζονται με το

πείραμα βραχυκυκλώσεως, που περιγράφαμε στο εδάφιο 6.7.4. Όταν η ένταση στο βραχυκυκλωμένο δευτερεύον γίνει ίση με την ονομαστική ένταση, η ένδειξη του βαττομέτρου στο πρωτεύον δίνει τις ηλεκτρικές απώλειες για το ονομαστικό φορτίο του μετασχηματιστή. Στο πείραμα βραχυκυκλώσεως, επειδή έχει μικρή τιμή η τάση βραχυκυκλώσεως (συνήθως μέχρι 6 ή 7% της ονομαστικής τάσεως πρωτεύοντος), οι μαγνητικές απώλειες που θα δούμε παρακάτω είναι αμελητέες.

β) Μαγνητικές απώλειες ή απώλειες σιδήρου (N_μ), είναι αυτές που οφείλονται στην υστέρηση και στα δινορρεύματα του σιδερένιου πυρήνα του μετασχηματιστή. Οι απώλειες αυτές προσδιορίζονται με ένα πείραμα λειτουργίας του μετασχηματιστή χωρίς φορτίο στο δευτερεύον. Στο πρωτεύον, που τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση, τοποθετούνται τα όργανα που δείχνει το σχήμα 6.7γ. Η ένδειξη του βαττομέτρου δίνει τώρα τις μαγνητικές απώλειες του μετασχηματιστή, γιατί οι ηλεκτρικές απώλειες ($I_0^2 \cdot R_1$) είναι τώρα αμελητέες.

γ) Βαθμός αποδόσεως.

Βαθμός αποδόσεως ενός μετασχηματιστή είναι ο λόγος της πραγματικής ισχύος που δίνει το δευτερεύον προς την πραγματική ισχύ που απορροφά το πρωτεύον, όταν αυτό τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση.

$$\eta = \frac{N_2}{N_1} = \frac{N_2}{N_2 + N_\eta + N_\mu}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ
ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ
ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

7.1 Είδη και τύποι κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος.

Από την άποψη του δικτύου τροφοδοτήσεως, για το οποίο είναι κατασκευασμένοι να εργάζονται, τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος τους διακρίνομε σε:

- α) Τριφασικούς κινητήρες και**
- β) Μονοφασικούς κινητήρες.**

Είτε τριφασικοί είναι οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος είτε μονοφασικοί, υπάγονται σε μια από τις ακόλουθες τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- α) Σύγχρονοι κινητήρες.**
- β) Ασύγχρονοι ή επαγγειακοί κινητήρες.**
- γ) Κινητήρες με συλλέκτη.**

Κάθε μια από τις κατηγορίες αυτές περιλαμβάνει διάφορα είδη κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια του βιβλίου.

α) Οι σύγχρονοι κινητήρες είναι όμοιοι στην κατασκευή τους με τις σύγχρονες γεννήτριες, τις οποίες περιγράφαμε στην παράγραφο 5.2. Στους κινητήρες αυτούς η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι απόλυτα σταθερή και ανεξάρτητη από το φορτίο (σύγχρονη ταχύτητα). Κατασκευάζονται συνήθως μόνο ως τριφασικοί. Μικροί σύγχρονοι μονοφασικοί κινητήρες που κατασκευάζονται για ειδικές χρήσεις π.χ. για ηλεκτρικά ρολόγια κ.τ.λ. δεν θα εξετασθούν στο βιβλίο αυτό.

β) Οι ασύγχρονοι ή επαγγειακοί κινητήρες έχουν ταχύτητα που εξαρτάται από το φορτίο και είναι πάντοτε μικρότερη από τη σύγχρονη. Είναι κινητήρες γενικής χρήσεως αφού είναι απλοί στην κατασκευή τους και στη λειτουργία τους. Κατασκευάζονται ως μονοφασικοί και ως τριφασικοί και υπάρχουν αρκετά είδη από τον κάθε τύπο.

γ) Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος με συλλέκτη είναι γενικά κινητήρες ειδικής χρήσεως. Χρησιμοποιούνται εκεί όπου τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους στη λειτουργία τους καθιστούν απαραίτητους. Κατασκευάζονται ως μονοφασικοί και ως τριφασικοί και υπάρχουν αρκετά είδη από τον κάθε τύπο. Η ταχύτητα περιστροφής τους που εξαρτάται από το φορτίο μπορεί να είναι ίση, μεγαλύτερη ή μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα. Από την άποψη δηλαδή της ταχύτητας λειτουργίας ανήκουν και αυτοί στη μεγάλη κατηγορία των ασύγχρονων μηχανών.

Εξετάζονται όμως πάντοτε ως ιδιαίτερη κατηγορία, λόγω της τελείως διαφορετικής κατασκευής τους.

7.2 Περιστρεφόμενα μαγνητικά πεδία. Σύγχρονη ταχύτητα.

Όταν τροφοδοτήσουμε με ρεύμα το τριφασικό τύλιγμα του στάτη μιας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος (σχ. 5.6α), θα δημιουργηθεί στο διάκενο της μηχανής ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο θα περιστρέφεται περί τον άξονά της. Το πεδίο αυτό μοιάζει με το μαγνητικό πεδίο, ποζ δημιουργεί ο περιστρεφόμενος δρομέας ενός εναλλακτήρα με εσωτερικούς πόλους. Η ουσιαστική διαφορά στην περίπτωση που εξετάζομε, είναι ότι το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από το ακίνητο τριφασικό τύλιγμα του στάτη.

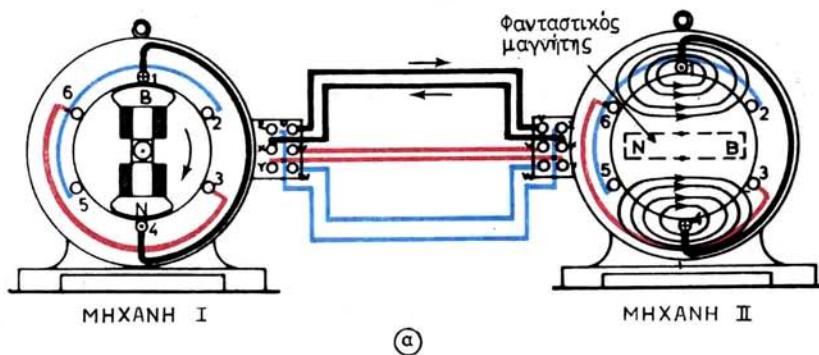
Για να εξηγήσουμε πώς δημιουργείται το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, θα χρησιμοποιήσουμε την απλή μηχανή, που δείχνει το σχήμα 7.2 στο δεξιό μέρος (μηχανή II). Η μηχανή αυτή έχει μέσα σε 6 αυλάκια στο στάτη διπολικό τριφασικό τύλιγμα, δηλαδή τύλιγμα διπολικής τριφασικής μηχανής. Κάθε φάση του τυλίγματος αποτελείται από μια ομάδα. Χάρη απλότητας δεχόμαστε επίσης ότι η μηχανή αυτή δεν έχει δρομέα και ότι το τύλιγμά της τροφοδοτείται με τριφασικό ρεύμα, μέσω 6 αγωγών (δυο για κάθε φάση) από ένα διπολικό εναλλακτήρα τελείως όμοιο στην κατασκευή του τυλίγματος [μηχανή I στο σχήμα 7.2]. Για τον ίδιο λόγο δεχόμαστε ότι η ένταση φορτίσεως του εναλλακτήρα είναι σε φάση με την αντίστοιχη ηλεκτρεγερτική δύναμη. Δηλαδή, όταν γίνεται μέγιστη η ηλεκτρεγερτική δύναμη στο τύλιγμα μιας φάσεως του εναλλακτήρα γίνεται μέγιστη και η ένταση στο τύλιγμα της φάσεως αυτής άρα και στο τύλιγμα της αντίστοιχης φάσεως της μηχανής II.

Τη χρονική στιγμή που παριστάνει το σχήμα 7.2 (a), η ένταση στη φάση 1-4 της μηχανής II είναι μέγιστη. Η φορά της εντάσεως έχει σημειωθεί επάνω στους αντίστοιχους αγωγούς του τυλίγματος. Όπως παρατηρούμε από τους αγωγούς αυτούς δημιουργείται διπολικό μαγνητικό πεδίο όπως αυτό, που θα δημιουργούσε διπολικός μαγνήτης, ο οποίος θα είχε την κατεύθυνση του φανταστικού μαγνήτη N-B που είναι σχεδιασμένος μέσα στη μηχανή II.

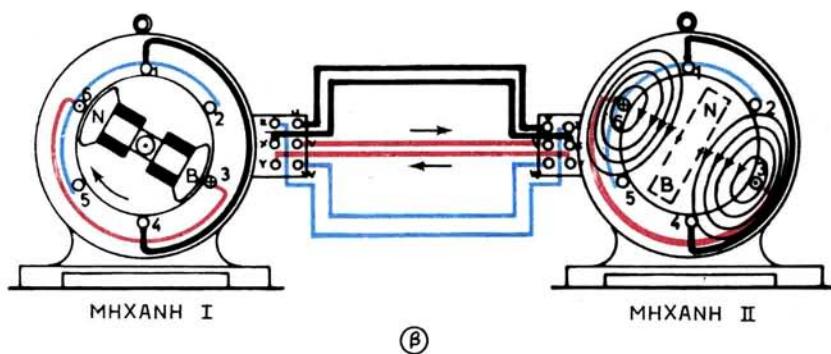
Για λόγους απλότητας επίσης στο σχήμα 7.2 (a) δεν παριστάνονται οι εντάσεις στις άλλες δυο φάσεις (3-6 και 5-2). Όπως είναι γνωστό, τη χρονική στιγμή που η ένταση στη φάση 1-4 γίνεται μέγιστη, οι εντάσεις στις άλλες φάσεις έχουν τιμή το 1/2 της μέγιστης και αντίθετη κατεύθυνση. Οι εντάσεις αυτές ενισχύουν το μαγνητικό πεδίο, που δημιουργεί η φάση 1-4, αλλά δεν του αλλάζουν κατεύθυνση.

Καθώς περιστρέφεται ο δρομέας του εναλλακτήρα, δηλαδή της μηχανής I, μετά από ορισμένο χρόνο, που εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του, θα βρεθεί στη θέση που δείχνει το σχήμα 7.2 (β). Τώρα θα είναι μέγιστη η ένταση στη φάση 3-6 της μηχανής II. Το μαγνητικό πεδίο θα έχει την κατεύθυνση, που δείχνει το σχήμα 7.2 (β), δηλαδή θα έχει στραφεί σε σχέση με την κατεύθυνση, που είχε τη χρονική στιγμή του σχήματος 7.2(a) κατά γωνία ίση με τη γωνία στροφής του δρομέα του εναλλακτήρα.

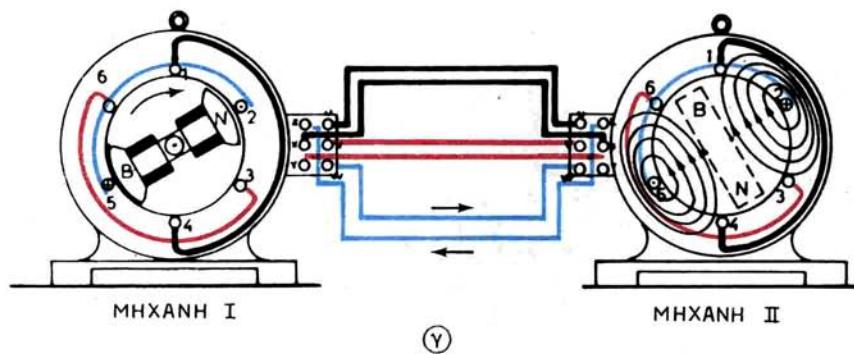
Την ίδια παρατήρηση κάνομε και για την κατεύθυνση, την οποία έχει το μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος της μηχανής II τη χρονική στιγμή, που παριστάνει το σχήμα 7.2(γ), σε σχέση με αυτή του σχήματος 7.2(β). Το ίδιο διαπιστώνομε και αν εξετάσουμε ενδιάμεσες θέσεις από αυτές, που παριστάνουν τα παραπάνω σχήματα. Μπορούμε συνεπώς να διατυπώσουμε το ακόλουθο συμπέρασμα:



(a)



(b)



(c)

Σχ. 7.2.
Δημιουργία περιστρεφομένου μαγνητικού πεδίου.

Το μαγνητικό πεδίο, που δημιουργεί το τριφασικό τύλιγμα της μηχανής II, στρέφεται περί τον άξονα της μηχανής με την ίδια ταχύτητα, που περιστρέφεται και ο δρομέας της όμοιας σύγχρονης γεννήτριας I, που την τροφοδοτεί.

Το συμπέρασμα παραμένει το ίδιο, αν υποθέσουμε, ότι τα τυλίγματα των φάσεων των μηχανών I και II είναι αλληλένδετα (σε τρίγωνο ή σε αστέρα) και η τροφοδότηση γίνεται με 3 αγωγούς, αντί για 6 όπως στο σχήμα 7.2.

Το παραπάνω συμπέρασμα ισχύει και αν η μηχανή II έχει τύλιγμα για 2.p πόλους. Δημιουργείται πάλι περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, όπως είναι το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί στο διάκενο ο περιστρεφόμενος δρομέας εναλλακτήρα με 2. p εσωτερικούς πόλους. Π.χ. για τύλιγμα τετραπολικής μηχανής στο στάτη το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, που δημιουργεί το τύλιγμα, θα έχει τη μορφή που δείχνει το σχήμα 5.2ia.

Η φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου της μηχανής II αλλάζει όταν αντιμεταθέσουμε τη σύνδεση με τους ακροδέκτες του τυλίγματος σε δυο από τους τρεις τροφοδοτικούς αγωγούς. Αυτό όπως θα δούμε γίνεται όταν θέλομε να αλλάξουμε τη φορά περιστροφής των σύγχρονων και ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων.

Από όσα αναπτύχθηκαν παραπάνω συμπεραίνουμε ότι μεταξύ της συχνότητας f του ρεύματος, που τροφοδοτεί το τύλιγμα της μηχανής II, του αριθμού ζευγών των πόλων ρ του τυλίγματος και της ταχύτητας περιστροφής του μαγνητικού πεδίου n_s θα ισχύει η ίδια σχέση, που δίνει τη σύγχρονη ταχύτητα ενός εναλλακτήρα (εδάφιο 5.4.2):

$$n_s = \frac{f}{p} \quad \text{σε στρ/s} \quad \text{ή}$$

$$n_s = \frac{60.f}{p} \quad \text{σε στρ/min}$$

Η ταχύτητα αυτή, που ονομάζεται **σύγχρονη ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου**, εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα του ρεύματος του δικτύου τροφοδοτήσεως και βέβαια και από τον αριθμό των πόλων του τυλίγματος της μηχανής II που είναι ο κινητήρας. Στην πραγματικότητα δηλαδή δεν έχει σημασία ο αριθμός των πόλων και η ταχύτητα περιστροφής του εναλλακτήρα, που τροφοδοτεί το δίκυτο, αλλά μόνο η συχνότητα του ρεύματος, που παράγει.

Η σύγχρονη ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου έχει μεγάλη σημασία στους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, γιατί, όπως θα δούμε, καθορίζει την ταχύτητα περιστροφής τόσο των σύγχρονων, όσο και των ασύγχρονων κινητήρων.

Ο πίνακας 7.2.1 δίνει τις σύγχρονες ταχύτητες των περιστρεφόμενων μαγνητικών πεδίων σε στρ/τινό για διάφορες συχνότητες του ρεύματος τροφοδοτήσεως και διάφορους αριθμούς πόλων (2.p).

7.3 Τυλίγματα μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος.

Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, ένα τριφασικό τύλιγμα ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο στάτη της μηχανής I (σχ. 7.2) που λειτουργούσε

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2.1
Σύγχρονες ταχύτητες n_s σε στρ/min

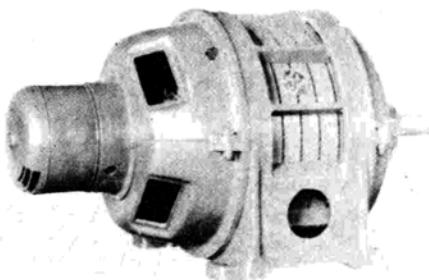
Αριθμός πόλων 2 . p	Για συχνότητα f		
	60 Hz	50 Hz	25 Hz
2	3600	3000	1500
4	1800	1500	750
6	1200	1000	500
8	900	750	375
10	720	600	300
12	600	500	250
14	514,2	428,6	214,3
16	450	375	187,5
18	400	333,3	166,6
20	360	300	150
22	327,2	272,7	136,3
24	300	250	125
26	277	230,8	115,4
28	257,1	214,3	107,1
30	240	200	100
32	225	187,5	93,7
34	212	176,5	88,2
36	200	166,6	83,3
38	189,5	157,9	78,9
40	180	150	75

σάν γεννήτρια, χρησιμοποιήθηκε και στη μηχανή II, στην οποία δημιουργήθηκε το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Στο πεδίο αυτό, όπως θα εξηγήσομε στα επόμενα, στηρίζεται η λειτουργία των τριφασικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος.

Τα τυλίγματα του στάτη των τριφασικών κινητήρων είναι όμοια με τα τυλίγματα του στάτη των τριφασικών σύγχρονων γεννητριών. Το ίδιο ισχύει και για τα τυλίγματα των μονοφασικών γεννητριών, με τη διαφορά ότι στους κινητήρες τα μονοφασικά τυλίγματα δεν μπορούν να δημιουργήσουν μόνα τους περιστρεφόμενα μαγνητικά πεδία. Επίσης αναφέρομε ότι με τις ίδιες αρχές διαμορφώνονται και τα τυλίγματα του δρομέα, σε όσες μηχανές ο δρομέας φέρει τύλιγμα εναλλασσόμενου ρεύματος. Σημειώνομε ακόμα ότι στους ασύγχρονους κινητήρες, στους οποίους όπως θα δούμε δεν υπάρχουν μαγνητικοί πόλοι, δεχόμαστε για το τύλιγμα κάθε κινητήρα έναν αριθμό ζευγών μαγνητικών πόλων p (ανάλογα με την ταχύτητα που θέλομε να έχει ο κινητήρας). Με βάση τον αριθμό αυτό, όπως και στις σύγχρονες μηχανές, διαμορφώνομε το τύλιγμα ως διπολικό, τετραπολικό κ.τ.λ. Αυτός ο αριθμός ζευγών μαγνητικών πόλων μπαίνει στη σχέση που δώσαμε στην προηγούμενη παράγραφο για τον υπολογισμό της σύγχρονης ταχύτητας του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

7.4 Κατασκευή των σύγχρονων κινητήρων.

Οι σύγχρονοι κινητήρες είναι μηχανές όμοιες στην κατασκευή τους με τις σύγχρονες γεννήτριες ή εναλλακτήρες. Όταν ένας εναλλακτήρας τροφοδοτηθεί με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο, δίνει μηχανική ενέργεια στον άξονά του. Γίνεται διηλαδή σύγχρονος κινητήρας. Για την εκκίνηση όμως του σύγχρονου κινητήρα, όπως θα εξηγήσουμε σε επόμενη παράγραφο, πρέπει να ληφθούν ορισμένα μέτρα,



Σχ. 7.4.
Σύγχρονος κινητήρας.

χωρις τα οποια δεν είναι δυνατό να ξεκινήσει.

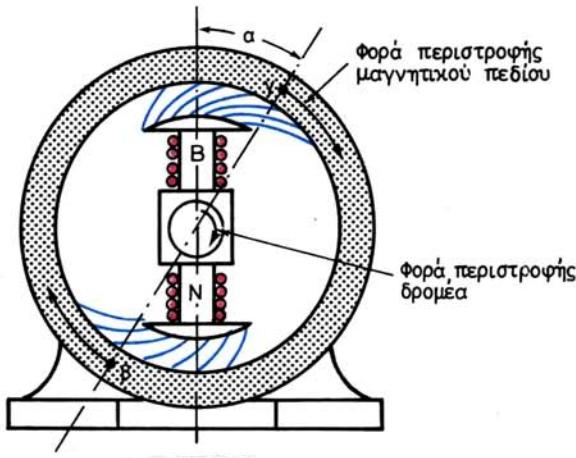
Η περιγραφή της κατασκευής των εναλλακτήρων (παράγρ. 5.2) ισχύει και για τους σύγχρονους κινητήρες. Το σχήμα 7.4 δείχνει ένα σύγχρονο κινητήρα γενικής χρησεως. Στο βιβλίο αυτό θα ασχοληθούμε μόνο με τους τριφασικούς σύγχρονους κινητήρες. Όπως θα δούμε αμέσως παρακάτω, η αρχή της λειτουργίας των κινητήρων αυτών στηρίζεται στο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί το τύλιγμα του στάτη, όταν ο κινητήρας είναι κατασκευασμένος με εσωτερικούς πόλους. Όταν έχει εξωτερικούς πόλους, η αρχή λειτουργίας είναι ακριβώς η ίδια, με μόνη διαφορά ότι το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το δημιουργεί τότε το τύλιγμα του δρομέα, ο οποίος περιστρέφεται με φορά αντίθετη από τη φορά του ιτεδίου.

7.5 Αρχή λειτουργίας των σύγχρονων τριφασικών κινητήρων.

Για να εξηγήσουμε την αρχή λειτουργίας των κινητήρων αυτών θα χρησιμοποιήσουμε το σχήμα 7.5, στο οποίο παριστάνεται ένας διπολικός σύγχρονος κινητήρας με αιπλοποιημένη μορφή. Στο σχήμα δεν έχει σχεδιασθεί το τύλιγμα του στάτη, δεχόμαστε όμως ότι το τύλιγμα αυτό τροφοδοτείται με τριφασικό ρεύμα και ότι συνεπώς δημιουργεί ένα διπολικό μαγνητικό πεδίο. Για απλότητα το παριστάνομε στο σχήμα με τους δυο (φανταστικούς) πόλους ν και β , οι οποίοι περιστρέφονται, σύμφωνα με όσα αναφέραμε σε προηγούμενη παράγραφο, με τη σύγχρονη ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου κατά τη φορά που δείχνουν τα τόξα στο σχήμα.

Δεχόμαστε επίσης, ότι ο δρομέας του σύγχρονου κινητήρα περιστρέφεται και αυτός με τη σύγχρονη ταχύτητα κατά την ίδια φορά με το μαγνητικό πεδίο. Τα τύλιγμα του δρομέα τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα και συνεπώς δημιουργούν τους δυο (πραγματικούς) μαγνητικούς πόλους B και N .

Με τις παραπάνω παραδοχές είναι εύκολο να αντιληφθούμε, ότι οι περιστρεφόμενοι πόλοι ν και β του μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος του στάτη ασκούν ελκτικές δυνάμεις στους ετερώνυμους πόλους B και N του δρομέα, που περιστρέφονται και αυτοί με την ίδια ταχύτητα. Οι ελκτικές αυτές δυνάμεις έχουν σημειωθεί παραστατικά στο σχήμα 7.5 με γαλάζιες γραμμές. Οι εφαπτομενικές συνιστώσες (κάθετες προς τον άξονα $B - N$ των πόλων) των δυνάμεων αυτών ασκούν ροπή στο δρομέα, ο οποίος μπορεί έτσι να κινήσει το φορτίο που έχει στον άξονά του.



Σχ: 7.5.

Αν δεχθούμε ότι είναι αμελητέα η ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη, δόλαδή ότι το τύλιγμα αυτό έχει αμελητέες ηλεκτρικές απώλειες, είναι εύκολο να υπολογίσουμε τη ροπή T , την οποία το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο ασκεί στο δρομέα. Η πραγματική ισχύς, την οποία ο κινητήρας απορροφά από το τριφασικό δίκτυο, είναι:

$$N_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \text{συνφ}$$

Η ισχύς αυτή μεταβιβάζεται όλη (αφού αμελήσαμε τις ηλεκτρικές απώλειες) στο δρομέα μέσω των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων ως μηχανική ισχύς, η οποία όπως γνωρίζουμε, είναι ίση με $2 \cdot \pi \cdot n_s \cdot T$.

Άρα:

$$N_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \text{συνφ} = 2 \cdot \pi \cdot n_s \cdot T \quad \text{ή}$$

$$T = \frac{N_1}{2 \cdot \pi \cdot n_s} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \text{συνφ}}{2 \cdot \pi \cdot n_s} \quad \text{σε Nm}$$

οπου: N_1 , είναι η πραγματική ισχύς σε W που απορροφά ο κινητήρας,

U η πολική τάση σε V του δικτύου,

I η ένταση γραμμής σε A που απορροφά ο κινητήρας,

συνφ ο συντελεστής ισχύος του κινητήρα και

n_s η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα σε str/s.

Από τη ροπή αυτή μικρό μέρος ξοδεύεται για την υπερνίκηση των μηχανικών και των μαγνητικών απώλειών του δρομέα και το υπόλοιπο κινεί το φορτίο, που είναι στον άξονα του κινητήρα.

Όταν το φορτίο είναι μηδενικό, οι άξονες των πόλων ν, β και Β, Ν σχεδόν συμπίπτουν. Δηλαδή η γωνία α' του σχήματος 7.5 γίνεται πολύ μικρή γιατί οι εφαπτομενικές συνιστώσες των ελκτικών δυνάμεων έχουν να υπερνικήσουν μόνο τις μηχανικές και μαγνητικές απώλειες του κινητήρα.

Όταν το φορτίο του κινητήρα αυξηθεί, ο δρομέας καθυστερεί για λίγο, ώστε να αυξηθεί η γωνία α. Η γωνία αυτή δεν πρέπει να υπερβεί το μισό της γωνιακής αποστασεως μεταξύ δυο διαδοχικών πόλων ν και β (τις 90° στην πέριπτωση του σχήματος 7.5), οπότε γίνεται μέγιστη η ροπή του κινητήρα. Αν η γωνία αυτή γίνει μεγαλύτερη, λόγω αυξήσεως του φορτίου πέρα από ένα όριο, η περιστροφή του δρομέα του σύγχρονου κινητήρα δεν είναι πια δυνατή. Ο δρομέας **απαγκιστρώνεται από το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και σταματά απότομα**.

Δηλαδη **οι σύγχρονοι κινητήρες δεν είναι δυνατό να λειτουργήσουν παρά μόνο αν περιστρέφονται με ταχύτητα ακριβώς ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα**. Άρα, η ταχυτητα περιστροφής ενός σύγχρονου κινητήρα δίνεται από την ίδια σχέση, που δίνει τη σύγχρονη ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου (παράγρ. 7.2).

Το συμπέρασμα αυτό εξηγεί επίσης και το γιατί **οι σύγχρονοι κινητήρες δεν μπορούν να ξεκινήσουν μόνοι τους**. Όταν στην εκκίνηση κλείσομε το διακόπτη, ο οποίος τροφοδοτεί το τύλιγμα του κινητήρα με εναλλασσόμενο ρεύμα, δημιουργείται αρμέσως το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Ο δρομέας όμως του κινητήρα δεν είναι δυνατό, λόγω των δυνάμεων της αδράνειας, να αποκτήσει και αυτός αρμέσως τη συγχρονή ταχύτητα. Θα πρέπει δηλαδή ο κινητήρας να λειτουργήσει στην εκκίνηση για ορισμένο χρονικό διάστημα με ταχύτητα διαφορετική από τη σύγχρονη ταχυτητα. Αυτό όμως, όπως είδαμε, είναι αδύνατο για τους σύγχρονους κινητήρες.

Κατά τη λειτουργία **του σύγχρονου κινητήρα η φορά περιστροφής είναι η ίδια με τη φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου**. Άρα για να αλλάξουμε τη φορά περιστροφής του κινητήρα, πρέπει να αλλάξουμε τη φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου. Στην παράγραφο 7.2 αναφέρομε με ποια μεταβολή στη σύνθεση των τροφοδοτικών αγωγών το πετυχαίνομε.

7.6 Εκκίνηση των σύγχρονων κινητήρων.

Για την εκκίνησή τους οι σύγχρονοι κινητήρες έχουν ανάγκη από ένα εξωτερικό μέσο, π.χ. από ένα μικρό βιοηθητικό ασύγχρονο κινητήρα, για να τους θέσουμε προοδευτικά σε κίνηση και να τους φέρουμε στη σύγχρονη ταχύτητα. Επειδή ο βιοηθητικός αυτός κινητήρας έχει μικρή ισχύ, πρέπει η εκκίνηση να γίνεται χωρίς φορτίο στον άξονα του σύγχρονου κινητήρα.

Όταν ο σύγχρονος κινητήρας φθάσει στη σύγχρονη ταχύτητα, τροφοδοτούμε τη διεγέρση του με συνεχές ρεύμα. Τώρα ο σύγχρονος κινητήρας συμπεριφέρεται σαν εναλλακτήρας, αφού κινείται ακόμη από το βιοηθητικό κινητήρα. Για να τον συνδέσουμε λοιπόν στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος, δηλαδή για να τροφοδοτήσουμε το τύλιγμα του στάτη, πρέπει πρώτα να τον συγχρονίσουμε με το δίκτυο, όπως ακριβώς κάνομε με τους εναλλακτήρες (παράγρ. 5.12). Έτσι οι εγκαταστάσεις των συγχρόνων κινητήρων περιλαμβάνουν και τα απαιτούμενα για το συγχρονισμό όργανα.

Μετά το συγχρονισμό διακόπτουμε την τροφοδότηση του βοηθητικού κινητήρα, που χρησιμοποιήσαμε για την εκκίνηση και αν υπάρχει κατάλληλη διάταξη τον αποσυμπλέκομε από τον άξονα του σύγχρονου κινητήρα. Είναι φανερό ότι ο βοηθητικός κινητήρας, πρέπει να έχει τέτοια ταχύτητα περιστροφής, ώστε να μπορεί να δίνει τη σύγχρονη ταχύτητα στο σύγχρονο κινητήρα.

Όταν ο σύγχρονος κινητήρας χρησιμεύει για να κινεί γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, άλλος τρόπος για να τον βάλομε σε κίνηση είναι να μετατρέπουμε στην εκκίνηση τη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος σε κινητήρια. Αυτό βεβαίως προϋποθέτει ότι διαθέτουμε κατάλληλη πηγή συνεχούς ρεύματος.

Τέλος, άλλος τρόπος είναι να γίνει η εκκίνηση του σύγχρονου κινητήρα σαν ασύγχρονου. Στην περίπτωση αυτή ο κινητήρας έχει από την κατασκευή του στα πέδιλα των μαγνητικών πόλων ένα τύλιγμα κλωβού, όπως αυτό που, όπως θα δουμε, έχουν οι ασύγχρονοι κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα. Η εκκίνηση τού σύγχρονου κινητήρα γίνεται τώρα με ένα από τους τρόπους, με τους οποίους εκκινούν οι ασύγχρονοι κινητήρες (θα τους περιγράψουμε στο επόμενο κεφάλαιο) και χωρίς να τροφοδοτείται η διέγερσή του με συνεχές ρεύμα. Με τον τρόπο αυτό η ταχύτητα περιστροφής του σύγχρονου κινητήρα φθάνει σε μία τιμή 2 ως 5% μικρότερη της σύγχρονης. Τότε κλείνομε το κύκλωμα, που τροφοδοτεί το τύλιγμα της διεγέρσεως με συνεχές ρεύμα και ο κινητήρας αυτοσυγχρονίζεται, οπότε περιστρέφεται πια με το σύγχρονο αριθμό τροφών. Η μέθοδος αυτή της εκκινήσεως των συγχρόνων κινητήρων εφαρμόζεται σήμερα πολύ, γιατί έχει το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζεται βοηθητικό κινητήρα ούτε πηγή συνεχούς ρεύματος. Επίσης αποφεύγεται με αυτή η διαδικασία του συγχρονισμού και τα όργανα που απαιτούνται για το σκοπό αυτό. Τέλος, με τη μέθοδο αυτή ο κινητήρας μπορεί να ξεκινά με φορτίο, όπως γίνεται και με τους ασύγχρονους κινητήρες.

7.7 Λειτουργία των σύγχρονων κινητήρων.

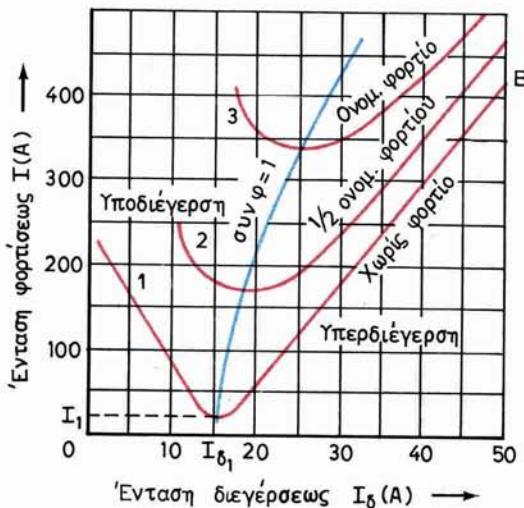
Όταν ο σύγχρονος κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο στον άξονά του, η ένταση (ένταση φορτίσεως), που απορροφά από το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος, εξαρτάται από την ένταση διεγέρσεως I_d με την οποία τροφοδοτείται το τύλιγμα των πόλων του δρομέα.

Η καμπύλη 1 στο σχήμα 7.7 δείχνει πώς μεταβάλλεται η ένταση I, όταν μεταβάλλεται η ένταση διεγέρσεως I_d , στη λειτουργία χωρίς φορτίο του σύγχρονου κινητήρα. Την I_d τη ρυθμίζουμε με ένα από τους τρόπους που αναφέραμε στην παράγραφο 5.8 για τη ρύθμιση της διεγέρσεως των εναλλακτήρων.

Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 7.7, η καμπύλη 1 έχει περίπου σχήμα V. Για μια ορισμένη τιμή I_d , της εντάσεως διεγέρσεως, η ένταση φορτίσεως γίνεται ελάχιστη (I). **Με τη διέγερση αυτή, που ονομάζεται κανονική διέγερση, ο σύγχρονος κινητήρας φορτίζει το δίκτυο ωμικά. Τότε η τάση του δικτύου και η ένταση I, είναι σε φάση, δηλαδή ο συντελεστής ισχύος του κινητήρα είναι ίσος με 1 (συνθ=1).**

Για κάθε άλλη τιμή της εντάσεως διεγέρσεως, μικρότερη ή μεγαλύτερη της I_d , η ένταση φορτίσεως μεγαλώνει. Άρα το συνθ ου του κινητήρα γίνεται μικρότερο της μονάδας και μάλιστα τόσο μικρότερο, όσο η I είναι μεγαλύτερη. Όταν η ένταση διεγέρσεως γίνει μικρότερη της I_d , λέμε ότι ο σύγχρονος κινητήρας **υποδιεγείρεται**, και όταν γίνει μεγαλύτερη, ότι **υπερδιεγείρεται**.

'Όταν ο σύγχρονος κινητήρας φορτισθεί και λειτουργεί με σταθερό φορτίο, πάλι η ένταση, που απορροφά από το δίκτυο, εξαρτάται από τη διέγερση, όπως γίνεται και στη λειτουργία χωρίς φορτίο. Δηλαδή για κάθε φορτίο έχουμε μια καμπύλη σχήματος V. Το σχήμα 7.7 δείχνει τις καμπύλες αυτές για το $\frac{1}{2}$ του ονομαστικού φορτίου και για το πλήρες φορτίο.



Σχ. 7.7.
Καμπύλες V ενός σύγχρονου κινητήρα.

Για κάθε καμπύλη V υπάρχει μια κανονική ένταση διεγέρσεως, για την οποία η ένταση φορτίσεως γίνεται ελάχιστη και το συνθηκό του κινητήρα ίσο με τη μονάδα. Δηλαδή ο κινητήρας τότε φορτίζει το δίκτυο ωμικά. Τα σημεία, που παριστάνουν, τη λειτουργία του κινητήρα με $\sigma_{\text{υφ}} = 1$ για τα διάφορα φορτία βρίσκονται σε μια καμπύλη (γαλάζια στο σχήμα 7.7). Δεξιά της καμπύλης αυτής ο σύγχρονος κινητήρας βρίσκεται σε υπερδιέγερση και αριστερά σε υποδιέγερση.

'Όταν ένας σύγχρονος κινητήρας υποδιεγείρεται, η ένταση που απορροφά από το δίκτυο υστέρει ως προς την τάση του δικτύου, δηλαδή ο κινητήρας φορτίζει το δίκτυο επαγγειακά. Η ένταση αυτή για ορισμένο φορτίο είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο η υποδιέγερση είναι μεγαλύτερη. Αντίστοιχα ελαττώνεται και το συνθηκό του κινητήρα.

'Όταν ένας σύγχρονος κινητήρας υπερδιεγείρεται, η ένταση που απορροφά προπορεύεται της τάσεως και ο κινητήρας φορτίζει το δίκτυο χωρητικά. Η ένταση αυτή για ορισμένο φορτίο είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η υπερδιέγερση του κινητήρα. Επίσης όσο μεγαλώνει η υπερδιέγερση, τόσο ελαττώνεται το (χωρητικό) συνθηκό, με το οποίο ο σύγχρονος κινητήρας φορτίζει το δίκτυο.

7.8 Χρήση των σύγχρονων κινητήρων.

Οι σύγχρονοι κινητήρες είναι ακριβοί κινητήρες σε σύγκριση με τους ασύγχρονους. Έχουν όμως ορισμένες ιδιότητες για τις οποίες προτιμούνται σε ειδικές περι-

πτώσεις. Οι σύγχρονοι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία είναι συνήθως πάνω από 100 kW.

Οι κινητήρες αυτοί προτιμούνται, όταν χρειαζόμαστε απόλυτα σταθερή ταχύτητα περιστροφής, σε συνδυασμό με μεγάλο βαθμό αποδόσεως. Σαν παραδείγματα εφαρμογών αναφέρομε την κίνηση εναλλακτήρων, που παράγουν ρεύμα συχνότητας διαφορετικής από τη συχνότητα του δίκτυου, την κίνηση ελάστρων, την κίνηση ορισμένων μεγάλων φυγοκεντρικών αντλιών, συμπιεστών κλπ.

Άλλο πεδίο εφαρμογής των συγχρόνων κινητήρων είναι η βελτίωση του συντελεστή ισχύος μιας εγκαταστάσεως ή γενικότερα ενός δικτύου. Στις περιπτώσεις αυτές ο σύγχρονος κινητήρας είναι δυνατό να κινεί φορτίο (μηχάνημα) και να βελτιώνει ταυτόχρονα το συντελεστή ισχύος της εγκαταστάσεως, ή να χρησιμοποιείται μόνο για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος, χωρίς να κινεί μηχάνημα. Στην τελευταία περίπτωση ονομάζεται **σύγχρονος πυκνωτής** ή **σύγχρονος αντισταθμιστής**. Για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος γίνεται εκμετάλλευση της ιδιότητας που έχουν οι σύγχρονοι κινητήρες να φορτίζουν το δίκτυο χωρητικά, όταν υπερδιεγείρονται, όπως εξηγήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο.

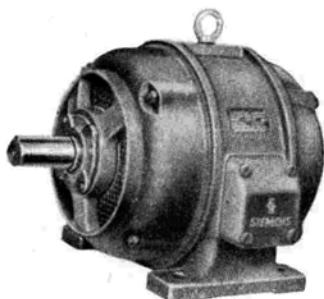
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ

ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

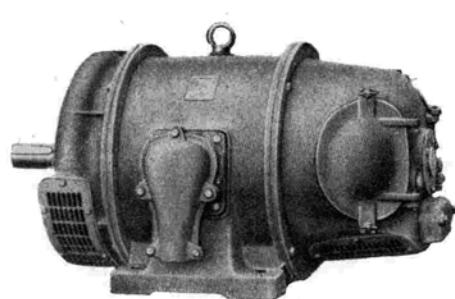
8.1 Είδη ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων.

Οι **ασύγχρονοι κινητήρες**, που ονομάζονται και **επαγωγικοί κινητήρες**, διακρίνονται σε μονοφασικούς και τριφασικούς. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε τους τριφασικούς ασύγχρονους κινητήρες, ενώ με τους μονοφασικούς θα ασχοληθούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες υποδιαιρούνται σε δυο κύριες κατηγορίες: τους **κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα** (σχ. 8.1α) και τους **κινητήρες με δακτυλίδια** (σχ. 8.1β).



Σχ. 8.1α.
Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα.



Σχ. 8.1β.
Κινητήρας με δακτυλίδια.

Στους κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα υπάγονται τα ακόλουθα τρία είδη, που τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους θα εξετάσουμε στα επόμενα:

- α) Οι κινητήρες με (απλό) τύλιγμα κλωβού.
- β) Οι κινητήρες διπλού κλωβού.
- γ) Οι κινητήρες με βαθειά αυλάκια.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες είναι κινητήρες γενικής χρήσεως. Δηλαδή χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση, όπου ειδικές απαιτήσεις δεν επιβάλλουν τη χρησιμοποίηση άλλου τύπου κινητήρα.

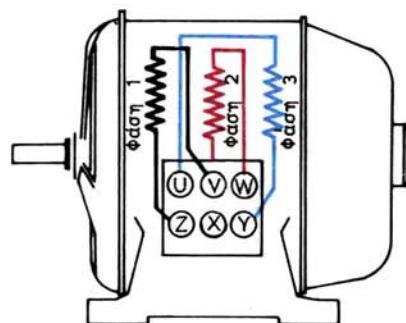
8.2 Κατασκευή των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων.

8.2.1 Κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα.

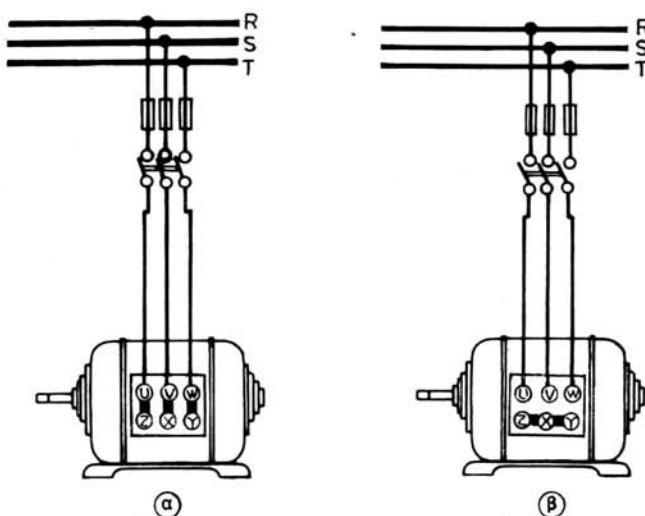
Η κατασκευή του στάτη των κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα όπως και

των κινητήρων με δακτυλίδια, είναι όμοια με την κατασκευή του στάτη των σύγχρονων κινητήρων με εσωτερικούς πόλους. Διαφορά είναι δυνατό να υπάρχει στη διαμόρφωση του κελύφους, το οποίο προσαρμόζεται στις συνθήκες κάτω από τις οποίες πρόκειται να εργασθεί ο ασύγχρονος κινητήρας. Μέσα στο κέλυφος είναι τοποθετημένος ο πυρήνας του τυμπάνου, που κατασκευάζεται από πολλά μαγνητικά ελάσματα. Στα αυλάκια του τυμπάνου τοποθετείται τριφασικό τύλιγμα.

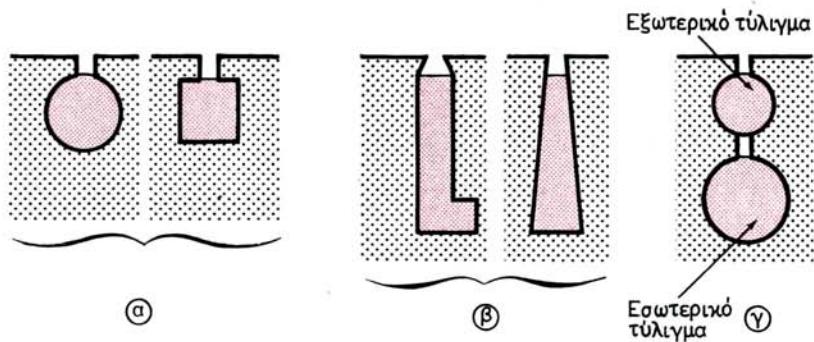
Τα έξι άκρα των τριών φάσεων του τυλίγματος καταλήγουν στους έξι ακροδέκτες του κινητήρα, όπως φαίνεται παραστατικά στο σχήμα 8.2α. Η σύνδεση των τριών φάσεων του στάτη σε τρίγωνο ή σε αστέρα γίνεται είτε με ορειχάλκινα λαμάκια, τα οποία τοποθετούνται μεταξύ των ακροδεκτών (σχ. 8.2β), είτε με κατάλληλους διακόπτες, όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο.



Σχ. 8.2α.
Τύλιγμα στάτη ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.

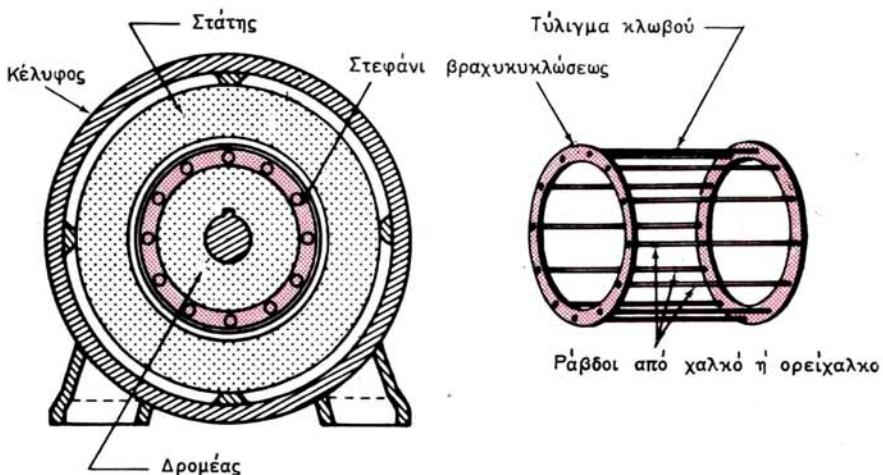


Σχ. 8.2β.
Σύνδεση σε τρίγωνο (α) και σε αστέρα (β) των τριών φάσεων του στάτη.



Σχ. 8.2γ.

Οδοντώσεις βραχυκυκλωμένου δρομέα, απλές (α), βαθιές (β), διπλές (γ).



Σχ. 8.2δ.

Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Ο δρομέας των κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα φέρει στερεωμένο επάνω στον άξονα τον **πυρήνα** που έχει σχήμα κυλινδρικού τυμπάνου και ο οποίος αποτελείται από πολλά μαγνητικά ελάσματα. Τα ελάσματα αυτά έχουν οδοντώσεις, οι οποίες σχηματίζουν αυλάκια. Η μορφή που έχουν οι οδοντώσεις και συνεπώς και τα αυλάκια έχει επίδραση στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των κινητήρων. Συνήθως τις διακρίνομε σε τρεις κατηγορίες: τις **απλές**, τις **βαθιές** και τις **διπλές οδοντώσεις**, όπως φαίνονται στο σχήμα 8.2γ.

Μέσα στα αυλάκια του δρομέα τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο χωρίς μόνωση. Οι ράβδοι συγκολλούνται στα δυο άκρα τους σε δυο **στεφάνια βραχυκυκλώσεως**. Έτσι σχηματίζεται το **τύλιγμα κλωβού**, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.2δ.

Στους μικρούς κινητήρες το τύλιγμα κλωβού κατασκευάζεται συνήθως από κα-



Σχ. 8.2ε.

Βραχυκυκλωμένος δρομέας με τύλιγμα κλωβού από αλουμίνιο.

Θαρό αλουμίνιο, το οποίο χύνεται με πίεση απευθείας μέσα στα αυλάκια. Στις περιπτώσεις αυτές τα στεφάνια βραχυκυκλώσεως σχηματίζουν και τα πτερύγια του ανεμιστήρα, οπότε ο δρομέας παίρνει τη μορφή του σχήματος 8.2ε.

Όταν στον πυρήνα του δρομέα έχουμε διπλές οδοντώσεις, τότε σχηματίζονται δυο τυλίγματα κλωβού, ένα εξωτερικό και ένα εσωτερικό, τα οποία είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους [σχ. 8.2γ(γ)]. Οι κινητήρες αυτοί ονομάζονται **κινητήρες διπλού κλωβού**.

Τα τελευταία χρόνια η προτίμηση των κατασκευαστών στρέφεται ολοένα και περισσότερο στους δρομείς που έχουν **τυλίγματα κλωβού με βαθιά αυλάκια**, οι οποίοι ονομάζονται και **δρομείς μετατοπίσεως ρεύματος**. Οι δρομείς αυτοί έχουν περίπου τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των δρομέων διπλού κλωβού, είναι όμως απλούστεροι στην κατασκευή τους.

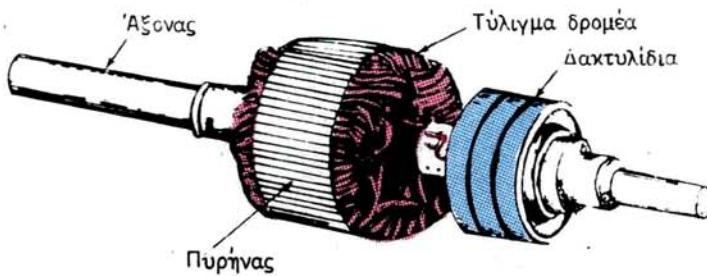
Για την ελάττωση του **μαγνητικού θορύβου** των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων, ο αριθμός των οδοντώσεων του δρομέα πρέπει να είναι διαφορετικός από τον αριθμό των οδοντώσεων του στάτη. Το ίδιο πετυχαίνεται και αν τα αυλάκια του δρομέα δεν είναι απόλυτα παράλληλα με τον άξονα, αλλά έχουν μικρή κλίση, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.2ε.

8.2.2 Κινητήρες με δακτυλίδια.

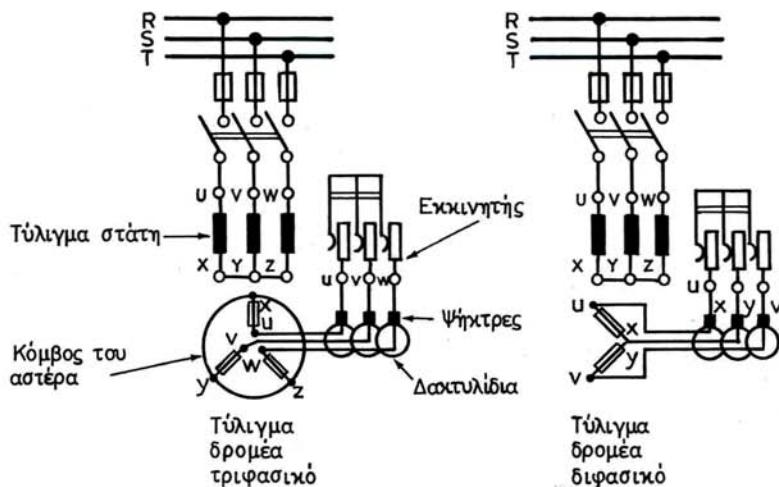
Όπως αναφέραμε στην αρχή του προηγούμενου εδαφίου, ο στάτης των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων με δακτυλίδια είναι όμοιος με το στάτη των κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα. Η κατασκευή όμως του δρομέα είναι διαφορετική. Ο πυρήνας του δρομέα των κινητήρων με δακτυλίδια αποτελείται επίσης από πολλά μαγνητικά ελάσματα, που φέρουν ημίκλειστες οδοντώσεις (σχ. 8.2στ). Μέσα στα αυλάκια, που σχηματίζουν οι οδοντώσεις, τοποθετείται διφασικό ή τριφασικό τύλιγμα, όπως αυτά που τοποθετούνται στο στάτη των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο αριθμός των πόλων του τυλίγματος αυτού είναι υποχρεωτικά ο ίδιος με τον αριθμό των πόλων του τυλίγματος του στάτη. Ο αριθμός των φάσεων είναι δυνατό να είναι διαφορετικός, π.χ. σε τριφασικό στάτη είναι δυνατό να υπάρχει διφασικό τύλιγμα στο δρομέα. Συνήθως και το τύλιγμα του δρομέα είναι τριφασικό και μάλιστα συνδεσμολογημένο σε αστέρα (σχ. 8.2ζ).

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 8.2στ, στον άξονα του δρομέα είναι στερεωμένα και τρία δακτυλίδια. Στα δακτυλίδια αυτά, τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους και προς τον άξονα, συνδέονται τα τρία ελεύθερα άκρα του τυλίγματος του δρομέα.

Επάνω στα δακτυλίδια εφάπτονται αντίστοιχες ψήκτρες, των οποίων οι ψηκτροθήκες είναι στερεωμένες στο στάτη της μηχανής (σχ. 8.2η). Μέσω των δακτυλι-

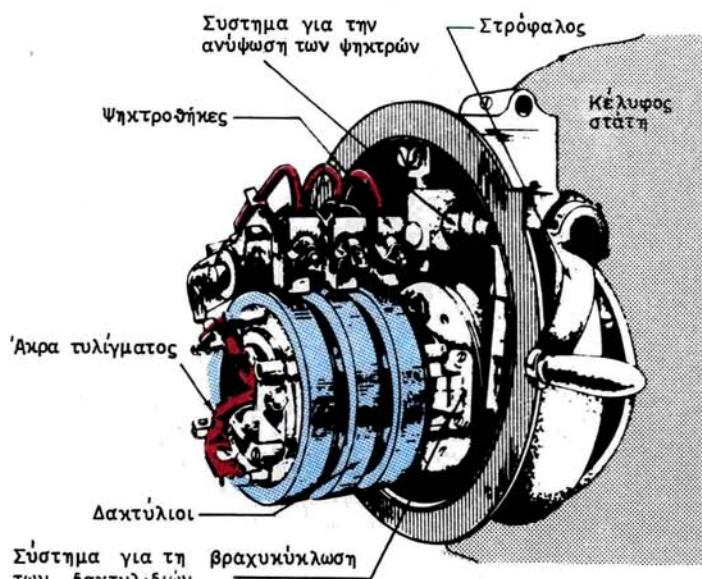


Σχ. 8.2στ.
Δρομέας κινητήρα με δακτυλίδια.



Σχ. 8.2ζ.

Συνδεσμολογία ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια (τριφασικό ή διφασικό τύλιγμα δρομέα).



Σχ. 8.2η.
Σύστημα ανυψώσεως ψηκτρών κινητήρα με δακτυλίδια.

διών και των ψηκτρών αυτών, κάθε φάση του τυλίγματος του δρομέα συνδέεται σε σειρά με την αντίστοιχη αντίσταση ενός τριφασικού εκκινητή (σχ. 8.2ζ).

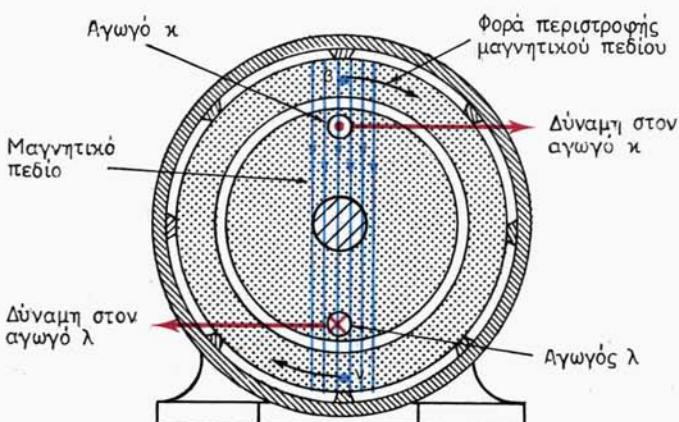
Πολλοί κινητήρες με δακτυλίδια έχουν ένα σύστημα για την ανύψωση των ψηκτρών, όπως δείχνει το σχήμα 8.2η. Με το σύστημα αυτό, μετά την εκκίνηση του κινητήρα, οπότε οι τρεις αντιστάσεις του εκκινητή πρέπει να είναι βραχυκυκλωμένες, ανυψώνομε τις ψηκτρες, ώστε να μην εφάπτονται στα δακτυλίδια. Ταυτόχρονα, με τον ίδιο μηχανισμό βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους τα τρία δακτυλίδια. Έτσι αποφεύγεται η φθορά των ψηκτρών κατά τη λειτουργία του κινητήρα και βελτιώνεται ο βαθμός αποδόσεώς του με την ελάττωση των τριβών.

8.3 Αρχή λειτουργίας ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων.

Η λειτουργία των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων βασίζεται στο φαινόμενο της δημιουργίας ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων από επαγωγή στους αγωγούς του δρομέα από το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος του στάτη. Αυτός είναι ο λόγος που οι κινητήρες αυτοί ονομάζονται, όπως είπαμε, και επαγωγικοί κινητήρες.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα απλό κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα, όπως τον δείχνει το σχήμα 8.3. Το τύλιγμα κλωβού του δρομέα αυτού του κινητήρα έχει δυο μόνο αγωγούς (ράβδους), τους κ και λ. Το τύλιγμα του στάτη, το οποίο δεν παριστάνεται στο σχήμα, είναι τριφασικό με ένα ζεύγος πόλων. Όταν τροφοδοτήσουμε το τύλιγμα αυτό με τριφασικό ρεύμα, θα δημιουργηθεί περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με δυο πόλους β και ν, σύμφωνα με όσα αναπτύξαμε στην παράγραφο 7.2.

Οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου τέμνουν τους αγωγούς κ και λ του δρομέα που είναι ακόμα ακίνητος. Όπως γνωρίζουμε (εδάφιο 2.1.1), θα δημιουργηθούν μέσα στους αγωγούς ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις από επαγωγή, οι οποίες σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού θα έχουν φορά αυτή που δείχνουν τα σύμβολα επάνω στους αγωγούς στο σχήμα 8.3. Οι ηλεκτρεγερτικές αυτές δυνάμεις δημιουρ-



Σχ. 8.3.

γούν ρεύματα της ίδιας φοράς, τα οποία κλείνουν κύκλωμα μέσα από τα στεφάνια βραχυκυκλώσεως (δεν παριστάνονται στο σχήμα).

Με τα ρεύματα που κυκλοφορούν μέσα στους αγωγούς και λ, εμφανίζεται το γνωστό φαινόμενο κινητήρα (εδάφιο 2.2.1). Στους αγωγούς αυτούς που βρίσκονται μέσα στο μαγνητικό πεδίο και διαρρέονται από ρεύμα αναπτύσσονται δυνάμεις, των οποίων η διεύθυνση ορίζεται από τον κανόνα του αριστερού χεριού. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 8.3, οι δυνάμεις αυτές δημιουργούν ροπή, η οποία βάζει σε κίνηση το δρομέα κατά τη φορά που περιστρέφεται το μαγνητικό πεδίο.

Τα ρεύματα που δημιουργούνται από επαγωγή μέσα στους αγωγούς του δρομέα είναι εναλλασσόμενα. Η φορά όμως της ροπής των δυνάμεων που αναπτύσσονται από αυτά είναι πάντοτε η ίδια. Αυτό είναι εύκολο να το διαπιστώσει κανείς, αν εξετάσει μια χρονική στιγμή επόμενη από αυτή που δείχνει το σχήμα 8.3, κατά την οποία απέναντι από τον αγωγό κ θα βρίσκεται ο νότιος πόλος του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και απέναντι από τον αγωγό λ ο βόρειος.

Στο παράδειγμα του σχήματος 8.3 ο δρομέας για λόγους απλότητας έχει τύλιγμα κλωβού με δυο αγωγούς. Τα πραγματικά τυλίγματα κλωβού έχουν πολύ περισσότερους από δυο αγωγούς. **Σε κάθε αγωγό αναπτύσσονται δυνάμεις, οι οποίες ασκούν ροπή στο δρομέα κατά την ίδια φορά, δηλαδή τη φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου.** Το ίδιο συμβαίνει και αν το τύλιγμα του στάτη έχει περισσότερους από δυο πόλους.

Οι αγωγοί και λ του σχήματος 8.3 μπορεί να είναι αγωγοί και από το τύλιγμα του δρομέα ενός κινητήρα με δακτυλίδια. Στην περίπτωση αυτή οι αγωγοί κλείνουν κύκλωμα όχι πια με τα στεφάνια βραχυκυκλώσεως, αλλά με τις αντιστάσεις του εκκινητή (σχ. 8.2ζ). Συνεπώς όλα τα παραπάνω συμπεράσματα ισχύουν και για τους κινητήρες με δακτυλίδια των οποίων η αρχή της λειτουργίας είναι όμοια με την αρχή λειτουργίας των κινητήρων με βραχυκυκλωμένο δρομέα.

Οι δυνάμεις, που το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο ασκεί στο δρομέα, έχουν σαν αιτούμενο να ξεκινήσει ο ασύγχρονος κινητήρας και στη συνέχεια να επιταχυνθεί, μέχρι να φθάσει σε μια ταχύτητα π. **Η ταχύτητα αυτή είναι πάντοτε μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα n_s του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.** Γι' αυτό οι κινητήρες αυτοί ονομάζονται **ασύγχρονοι κινητήρες**.

Ο λόγος, για τον οποίο η ταχύτητα του ασύγχρονου κινητήρα δεν μπορεί να γίνει ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα, είναι σχεδόν φανερός. Αν ο δρομέας έφθανε την ταχύτητα n_s , τότε οι μαγνητικές γραμμές του περιστρεφόμενου πεδίου δεν θα έτεμναν αγωγούς του τυλίγματος του δρομέα. Συνεπώς δεν θα αναπτύσσονταν ούτε δυνάμεις ούτε ροπή στο δρομέα. Η ροπή όμως είναι απαραίτητη για να περιστρέφεται ο κινητήρας, έστω και αν εργάζεται χωρίς φορτίο γιατί πρέπει να υπερνικηθούν οι μηχανικές απώλειες του δρομέα.

8.4 Διολίσθηση (ή ολίσθηση).

Στη λειτουργία του κινητήρα η διαφορά $n_s - n$ – η εξαρτάται από το φορτίο που έχει στον άξονά του και αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου. Πάντως για το κανονικό φορτίο η διαφορά αυτή είναι μικρή. Ονομάζομε **διολίσθηση** ή **ολίσθηση στο λόγο της διαφοράς $n_s - n$** – η προς τη σύγχρονη ταχύτητα n_s :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Η διολίσθηση τη στιγμή της εκκινήσεως είναι ίση με 1 (ή 100%), γιατί τότε είναι $n = 0$. Στη λειτουργία του κινητήρα η διολίσθηση εξαρτάται από το φορτίο, γιατί από αυτό, όπως θα εξηγήσουμε, εξαρτάται η ταχύτητα περιστροφής π. Στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι περίπου ίση με μηδέν (0,5%). Στο κανονικό φορτίο, ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα, κυμαίνεται γύρω στο (5%), όπως προκύπτει και από τα στοιχεία του Πίνακα 8.4.1. Η διολίσθηση στο κανονικό φορτίο έχει μεγάλη σημασία στους ασύγχρονους κινητήρες και χαρακτηρίζει την ποιότητά τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.4.1.

Μέσες ταχύτητες ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων στο πλήρες φορτίο (στρ/min)

Αριθμός ζευγών πόλων	1	2	3	4	5	6
Συγχρονη ταχύτητα	3000	1500	1000	750	600	500
Ταχύτητα ασύγχρονου κινητηρά	2850	1425	950	710	570	474

Παράδειγμα.

Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας με τετραπολικό ($p = 2$) τύλιγμα, που τροφοδοτείται από δίκτυο συχνότητας 50 Hz, περιστρέφεται στο κανονικό του φορτίο με ταχύτητα 1440 στρ/min. Πόση είναι η διολίσθησή του:

Λύση.

Η σύγχρονη ταχύτητα του μαγ ητικού πεδίου είναι:

$$\eta_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ στρ/min}$$

Άρα η διολίσθηση θα είναι:

$$s = \frac{\eta_s - n}{\eta_s} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0,04 \quad \text{ή} \quad 4\%$$

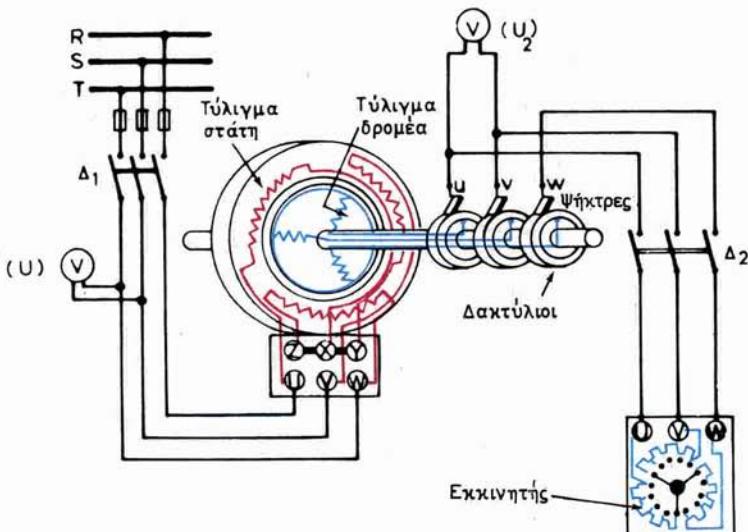
Αν γνωρίζομε τη διολίσθηση ενός κινητήρα σε ορισμένο φορτίο, είναι εύκολο να βρουμε την ταχύτητά του στο φορτίο αυτό από τη σχέση:

$$n = \eta_s (1 - s)$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνομε ότι οι ασύγχρονοι κινητήρες έχουν περίπου χαρακτηριστικά κινητήρων συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση. Δηλαδή η ταχύτητά τους μεταξύ μηδενικού και κανονικού φορτίου μεταβάλλεται πολύ λίγο. Συνεπώς είναι και αυτοί κινητήρες κατάλληλοι για κινήσεις με σταθερές περίπου ταχύτητες περιστροφής.

8.5 Τάση και ένταση του δρομέα.

Για να εξηγήσουμε τι συμβαίνει κατά τη λειτουργία στο δρομέα των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων θα χρησιμοποιήσουμε το σχήμα 8.5, το οποίο παριστάνει τη



Σχ. 8.5.

Συνδεσμολογία κινητήρα με δακτυλίδια.

συνδεσμολογία ενός κινητήρα με δακτυλίδια. Στο κύκλωμα, το οποίο συνδέει τις ψήκτρες με τον εκκινητή, έχουν παρεμβληθεί ο διακόπτης Δ_2 και το βολτόμετρο V . Τα όργανα αυτά δεν χρησιμοποιούνται συνήθως στις πραγματικές εγκαταστάσεις.

Όταν ο διακόπτης Δ_2 είναι ανοικτός και κλείσομε τον Δ_1 , ο κινητήρας δεν θα ξεκινήσει γιατί ένταση ρεύματος δεν διαρρέει το τύλιγμα του δρομέα. Το περιστρεφόμενο όμως μαγνητικό πεδίο, του τυλίγματος του στάτη, δημιουργεί από επαγωγή, όπως εξηγήσαμε στην παράγραφο 8.3, ηλεκτρεγερτική δύναμη στο τύλιγμα του δρομέα. Το μέγεθός της μας το δείχνει σαν τάση (U_2) το βολτόμετρο, που έχομε τοποθετήσει μεταξύ των ψηκτρών. Την U_2 την ονομάζομε **τάση του δρομέα** και αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικά στοιχεία του κινητήρα με δακτυλίδια και γι' αυτό τη γράφει συνήθως ο κατασκευαστής στην πινακίδα του κινητήρα.

Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε από τις ενδείξεις των βολτομέτρων, μεταξύ της τάσεως U του στάτη και της τάσεως U_2 του δρομέα ισχύει η σχέση:

$$U_2 = U \cdot \frac{w_2}{w_1}$$

όπου: w_1 είναι ο αριθμός αγωγών του τυλίγματος του στάτη και
 w_2 ο αριθμός αγωγών του τυλίγματος του δρομέα.

Δηλαδή ισχύει μια σχέση ανάλογη με αυτή που ισχύει στους μετασχηματιστές: Σημειώνομε ότι, όταν η σύνδεση των φάσεων του στάτη και του δρομέα δεν είναι η ίδια, τότε η παραπάνω σχέση ισχύει για τις φασικές τάσεις και αριθμούς αγωγών.

Η συχνότητα f_2 της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως του δρομέα, όταν ακόμα δεν έχει ξεκινήσει (όπως και την πρώτη στιγμή της εκκινήσεως) είναι ίση με τη συχνότητα f του δικτύου τροφοδοτήσεως. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αριθμός των πόλων του

τυλίγματος του δρομέα είναι ο ίδιος με τον αριθμό των πόλων του τυλίγματος του στάτη.

Αν κλείσομε το διακόπτη Δ_2 , ρεύμα θα περάσει από το τύλιγμα του δρομέα και από τις αντιστάσεις του εκκινητή και συνεπώς ο κινητήρας θα ξεκινήσει. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του δρομέα, τόσο ελαττώνεται η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται στο τύλιγμά του. Αυτό οφείλεται στο ότι ελαττώνεται με την αύξηση των στροφών η ταχύτητα, με την οποία οι μαγνητικές γραμμές του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου τέμνουν τους αγωγούς του δρομέα.

Στη λειτουργία του κινητήρα με ένα ορισμένο φορτίο, όταν ο δρομέας περιστρέφεται με διολίσθηση s , η ηλεκτρεγερτική δύναμη του τυλίγματος του δρομέα (πολική τάση) δίνεται από τη σχέση:

$$U_{2s} = s \cdot U_2$$

Όμοια η συχνότητα του ρεύματος του δρομέα είναι τότε:

$$f_2 = s \cdot f$$

Τέλος η αυτεπαγωγική αντίσταση (λόγω σκεδάσεως) κάθε φάσεως του δρομέα θα είναι:

$$X_{2s} = s \cdot X_2$$

όπου: X_2 η ίδια αντίσταση για συχνότητα f , δηλαδή με το δρομέα σε στάση.

Είναι εύκολο να υπολογίσομε τώρα την ένταση του ρεύματος στο τύλιγμα κάθε φάσεως του δρομέα. Για σύνδεση του τυλίγματος του δρομέα σε αστέρα, η φασική τάση (ηλεκτρεγερτική δύναμη) του θα είναι:

$$U_{\Phi_{2s}} = \frac{U_{2s}}{1,73}$$

$$\text{Άρα } I_2 = \frac{U_{2s}}{1,73 \cdot Z_s} = \frac{U_{2s}}{1,73 \cdot \sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} = \frac{s \cdot U_2}{1,73 \cdot \sqrt{R_2^2 + (s \cdot X_2)^2}}$$

$$\text{και } I_2 = \frac{U_2}{1,73 \cdot \sqrt{(R_2/s)^2 + X_2^2}}$$

όπου: R_2 είναι η συνολική ωμική αντίσταση κάθε φάσεως του τυλίγματος του δρομέα και του εκκινητή.

Αν οι αντιστάσεις του εκκινητή είναι βραχυκυκλωμένες ή αν ο κινητήρας έχει στο δρομέα τύλιγμα κλωβού, τότε το R_2 είναι η ωμική αντίσταση κάθε φάσεως μόνο του τυλίγματος του δρομέα.

Από τη σχέση, που δίνει την ένταση του δρομέα, βγάζομε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Για ορισμένη τιμή της R_2 η ένταση I_2 γίνεται μέγιστη τη στιγμή της εκκινήσεως, οπότε είναι $s = 1$. Στους κινητήρες με δακτυλίδια το μέγεθος της I_2 στην εκκίνηση είναι δυνατό να το ρυθμίσουμε με παρεμβολή κατάλληλων αντιστάσεων του εκκινητή. Στους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα όμως, όπου δεν υπάρχει εκκινητής

συνδεμένος στο δρομέα και η R_2 είναι συνήθως μικρή, η I_2 στην εκκίνηση φθάνει σε μεγάλες τιμές (μερικές εκατοντάδες αμπέρ). Ακόμη μεγαλύτερες τιμές παίρνει η ένταση μέσα στα στεφάνια βραχυκυκλώσεως.

Τόσο στους κινητήρες με τύλιγμα κλωβού, όσο και στους κινητήρες με δακτυλίδια και με βραχυκυκλωμένες τις αντιστάσεις του εκκινητή, η ένταση I_2 ελαττώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κινητήρα, δηλαδή όσο μειώνεται η διολίσθηση s , γίνεται δε σχεδόν μηδενική στη λειτουργία του χωρίς φορτίο ($s \approx 0$). Στο κανονικό (ονομαστικό) φορτίο του κινητήρα, οπότε αυτός έχει την ονομαστική του διολίσθηση, η ένταση I_2 έχει ορισμένη τιμή, η οποία ονομάζεται **ένταση του δρομέα** και στους κινητήρες με δακτυλίδια είναι γραμμένη στην πινακίδα του κατασκευαστή. Όταν το φορτίο αυξηθεί η ελαττώθει σε σχέση με το κανονικό, αυξάνεται επίσης ή ελαττώνεται αντίστοιχα και η I_2 . Αν είναι γνωστά τα R_2 (χωρίς αντιστάσεις εκκινητή) και X_2 καθώς και η διολίσθηση στο κανονικό φορτίο, τότε η ένταση του δρομέα υπολογίζεται από τον τύπο που δώσαμε παραπάνω, αλλιώς είναι δυνατό να υπολογισθεί κατά προσέγγιση από τη σχέση:

$$I_2 \approx \frac{650 \cdot N}{U_2} \text{ σε A}$$

όπου: N είναι η ονομαστική ισχύς σε kW που δίνει ο κινητήρας και U_2 η τάση σε V του δρομέα μεταξύ των δακτυλιδιών (με τις ψήκτρες ανυψωμένες).

Με την ένταση αυτή I_2 , που συνήθως είναι μεγαλύτερη από την ένταση που απορροφά ο στάτης από το δίκτυο, πρέπει να υπολογίζονται οι αγωγοί, οι οποίοι συνδέουν τις ψήκτρες με τον εκκινητή.

Παράδειγμα.

Ένας εξαπολικός τριφασικός κινητήρας με δακτυλίδια ισχύος 5 kW, έχει τάση του δρομέα 140 V και τροφοδοτείται από δίκτυο με συχνότητα 50 Hz. Αν το τύλιγμα του δρομέα είναι συνδεσμολογημένο σε αστέρα, ποια είναι η τάση που αναπτύσσεται σε κάθε φάση του, όταν ο κινητήρας λειτουργεί στο ονομαστικό του φορτίο με ταχύτητα 950 στρ/min; Ποια είναι τότε η ένταση και η συχνότητα του ρεύματος του δρομέα;

Λύση.

Για $r = 3$ και $f = 50$ Hz, είναι $n_s = 1000$ στρ/min.

Άρα η διολίσθηση στο ονομαστικό φορτίο θα είναι:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0,05$$

Η τάση κάθε φάσεως (ηλεκτρεγερτική δύναμη) του δρομέα θα είναι:

$$U_{\Phi_2 s} = \frac{U_2 s}{1,73} = \frac{s \cdot U_2}{1,73} = \frac{0,05 \times 140}{1,73} = 4,05 \text{ V}$$

Η συχνότητα του ρεύματος του δρομέα θα είναι:

$$f_2 = s \cdot f = 0,05 \times 50 = 2,5 \text{ Hz}$$

Τέλος η ένταση του ρεύματος του δρομέα θα είναι:

$$I_2 \approx \frac{650 \cdot N}{U_2} = \frac{650 \times 5}{140} = 23 \text{ A}$$

8.6 Ροπή των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων.

a) Σχέση ροπής και αποδιδόμενης ισχύος.

Όπως είναι γνωστό, η ροπή T , την οποία ένας οποιοσδήποτε κινητήρας (συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος) αναπτύσσει στον άξονά του, δίνεται από τη σχέση:

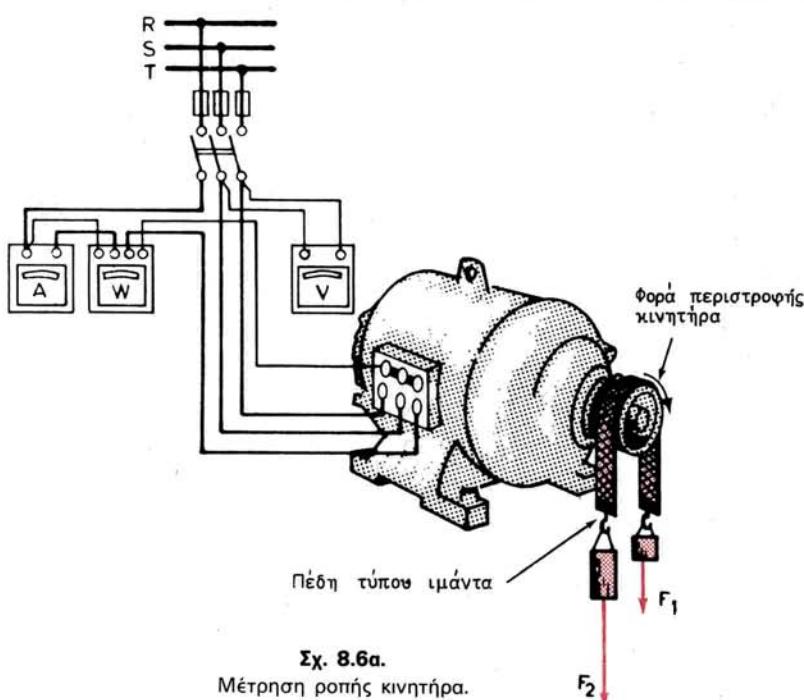
$$T = F \cdot r \quad \text{σε Nm}$$

όπου: F είναι η περιφερειακή δύναμη σε N και

r η απόσταση της δυνάμεως από τον άξονα σε m.

Π.χ. αν ο κινητήρας κινεί ένα μηχάνημα, μέσω τροχαλίας και ιμάντα, τότε F είναι η δύναμη που μεταβιβάζει ο ιμάντας και r είναι η ακτίνα της τροχαλίας

Για να μετρήσουμε τη ροπή που μπορεί να αναπτύξει ένας κινητήρας στον άξονά του, χρησιμοποιούμε μια πέδη. Πέδες υπάρχουν πολλών ειδών (μηχανικές, ηλεκτρομαγνητικές κτλ). Ο κινητήρας του σχήματος 8.6α φέρει επάνω στην τροχαλία



Σχ. 8.6α.
Μέτρηση ροπής κινητήρα.

του αξονά του μια **πέδη τύπου ιμάντα**. Στην πέδη αυτή η περιφερειακή δύναμη F μεταβιβάζεται με την τριβή στον ιμάντα. Έτσι, όταν ο κινητήρας περιστρέφεται, ο ιμάντας ισορροπεί με δυο διαφορετικά βάρη F_1 και F_2 . Τότε είναι:

$$F = F_2 - F_1$$

Η ακτίνα της τροχαλίας είναι η απόσταση της περιφερειακής δυνάμεως από τον αξονα. Άρα με τη διάταξη αυτή της πέδης είναι δυνατό να μετρήσουμε τη ροπή, την οποία ο κινητήρας αναπτύσσει στον αξονά του.

Αν ο κινητήρας περιστρέφεται με η στρ/с, τότε **η μηχανική ισχύς N που αποδίδει στον αξονά του** είναι:

$$N = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot T \quad \text{σε W}$$

Αν λύσουμε ως προς T έχουμε:

$$T = \frac{N}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad \text{σε Nm}$$

όπου: N είναι η ισχύς σε W που δίνει ο κινητήρας στον αξονά του και n η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα σε στρ/с.

Όταν η ισχύς που δίνει ο κινητήρας είναι η ονομαστική του ισχύς (με την ονομαστική ταχύτητα και τάση), τότε η ροπή που προκύπτει από την παραπάνω σχέση, ονομάζεται **ονομαστική ροπή του κινητήρα (T_{ov})**.

Η μέτρηση της μηχανικής ισχύος N με τη βοήθεια μιας πέδης μας δίνει ένα τρόπο προσδιορισμού του βαθμού αποδόσεως ενός κινητήρα, αρκεί ταυτόχρονα να μετρήσουμε και την ισχύ N_1 , που απορροφά από το δίκτυο. Αυτό γίνεται με ένα βαττόμετρο, όπως δείχνει, το σχήμα 8.6α. Είναι τότε ο βαθμός αποδόσεως:

$$\eta = \frac{N}{N_1}$$

β) Μεταβολή της ροπής και της εντάσεως του στάτη.

Στο διάγραμμα του σχήματος 8.6β φαίνεται πώς μεταβάλλεται η ροπή T ενός ορισμένου τριφασικού κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα, όταν μεταβάλλεται η ταχύτητά του. Σε αυτό το διάγραμμα η ταχύτητα την οποία έχει κάθε στιγμή ο κινητήρας, εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις % της σύγχρονης ταχύτητας n_s . Η ροπή εκφράζεται με το λόγο της προς την ονομαστική ροπή του κινητήρα (T/T_{ov}). Στο σχήμα φαίνεται επίσης με τον ίδιο τρόπο και η αντίστοιχη μεταβολή της εντάσεως I , την οποία ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο που τον τροφοδοτεί.

Όπως παρατηρούμε από την καμπύλη της εντάσεως στο σχήμα 8.6β, την πρώτη στιγμή της εκκινήσεως ($n=0$) ο κινητήρας απορροφά ένταση I_{ek} , η οποία είναι 5,5 φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική του ένταση ($I_{ek}/I_{ov}=5,5$). Σε ορισμένους κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα έχουμε $I_{ek}/I_{ov}=6$ ως 8. Το ίδιο περίπου συμβαίνει και στους κινητήρες με δακτυλίδια αν οι αντιστάσεις του εκκινητή είναι βραχυκυκλωμένες. Επειδή τα τυλίγματα του δρομέα έχουν μικρή αντί-

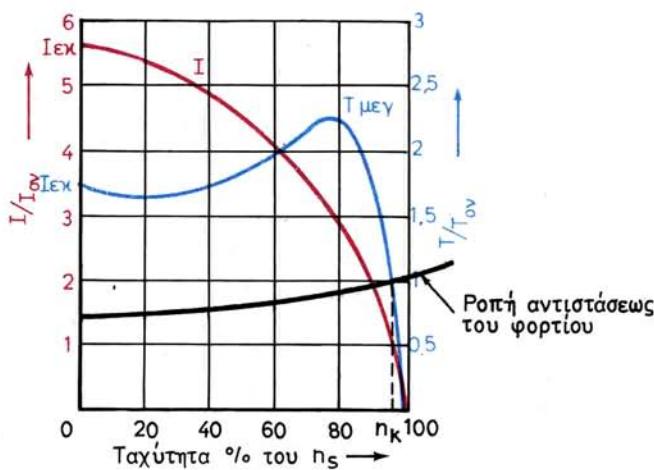
σταση αναπτύσσονται σε αυτά τη στιγμή της εκκινήσεως μεγάλες εντάσεις, όπως είδαμε στην παράγραφο 8.5. Αποτέλεσμα είναι ότι έχουμε σημαντικές εντάσεις εκκινήσεως και στο στάτη των κινητήρων αυτών.

Για τον περιορισμό των σημαντικών αυτών εντάσεων εκκινήσεως, οι οποίες αποτελούν μειονέκτημα των κινητήρων με βραχυκυκλωμένο δρομέα, παίρνομε διάφορα μέτρα, τα οποία θα εξετάσουμε στην παράγραφο 8.9 και με τα οποία περιορίζομε τη τάση τροφοδοτήσεως του κινητήρα κατά τη διάρκεια της εκκινήσεως. Στους κινητήρες με δακτυλίδια η παρεμβολή των αντιστάσεων του εκκινήτη στο τύλιγμα του δρομέα προκαλεί την ελάττωση του I_{ek} στο επιθυμητό μέγεθος, π.χ. είναι δυνατό να γίνει $I_{ek}/I_{ov} = 1$.

Από το ίδιο σχήμα 8.6β παρατηρούμε επίσης ότι η ροπή εκκινήσεως του κινητήρα αυτού είναι 1,7 φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή ($T_{ek}/T_{ov} = 1,7$). Όσο αυξάνονται οι στροφές του κινητήρα, ελαττώνεται η ένταση, που απορροφά από το δίκτυο, η ροπή του όμως αυξάνεται μέχρι μιας τιμής $T_{μεγ}$. Η ροπή αυτή είναι η μεγαλύτερη ροπή που είναι δυνατόν να αναπτύξει ο κινητήρας και δημιουργείται πάντοτε σε αριθμό στροφών μικρότερο από τον κανονικό του αριθμό στροφών n_k . Στον αριθμό στροφών n_k ο κινητήρας αναπτύσσει την ονομαστική ροπή ($T/T_{ov} = 1$), η οποία είναι σημαντικά μικρότερη από την $T_{μεγ}$ και απορροφά την ονομαστική του ένταση ($I/I_{ov} = 1$).

Το φορτίο (μηχάνημα που κινεί ο κινητήρας) παρουσιάζει μία «ροπή αντιστάσεως» η οποία είναι γενικά συνάρτηση των στροφών. Εφ' όσον η ροπή που ανταπτύσσει ο κινητήρας είναι μεγαλύτερη από τη ροπή αντιστάσεως ο κινητήρας και το φορτίο του επιταχύνονται μέχρις ότου γίνουν ίσα μεταξύ τους, οπότε οι στροφές γίνονται σταθερές, π.ν.

Η λειτουργία του κινητήρα στο τμήμα της καμπύλης μετά την $T_{μεγ}$ είναι ευσταθής λειτουργία. Δηλαδή, αν ο κινητήρας εργάζεται σε ένα σημείο του τρήματος αυτού της καμπύλης και για οποιοδήποτε λόγο αυξηθεί το φορτίο του, η ταχύτητα του κινητήρα θα ελαττωθεί. Τότε όμως θα αυξηθεί η ροπή που αναπτύσσει



Σχ. 8.6β.

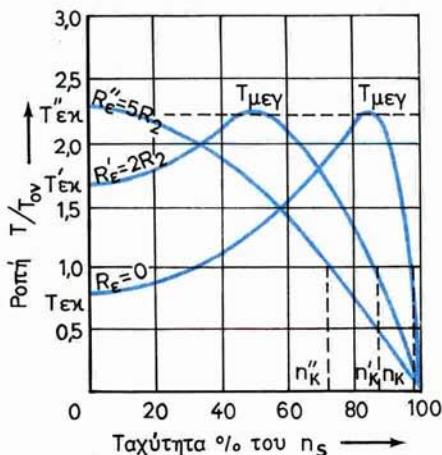
Μεταβολή της εντάσεως και της ροπής σε κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα.

και έτσι θα μπορέσει να αντιμετωπίσει την αύξηση του φορτίου. Αντίστοιχα θα αυξηθεί και η ένταση που απορροφά από το δίκτυο. **Ο κινητήρας με τον τρόπο αυτό προσαρμόζεται αυτόματα στις διακυμάνσεις του φορτίου.**

Όταν το φορτίο αυξηθεί πέρα από την τιμή της $T_{μεγ}$, τότε ο κινητήρας απότομα σταματά. Για το λόγο αυτό η ροπή $T_{μεγ}$ ονομάζεται και **ροπή ανατροπής**. Λειτουργία του κινητήρα στο τμήμα της καμπύλης προ της $T_{μεγ}$ δεν είναι δυνατή, παρά μόνο σαν μεταβατική κατάσταση στην εκκίνηση. Στο τμήμα αυτό **η λειτουργία είναι ασταθής, με συνέπεια να είναι αδύνατη η συνεχής λειτουργία σε αυτό**.

Η μορφή που έχει η καμπύλη της μεταβολής της ροπής ενός ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια, εξαρτάται από την ολική αντίσταση του τυλίγματος κάθε φάσης του δρομέα R_2 και τη συνδεμένη σε σειρά με αυτό εξωτερική αντίσταση R_e . Όπως προκύπτει και από το σχήμα 8.6γ, όσο αυξάνομε την αντίσταση αυτή ($R_2 + R_e$), συμβαίνουν τα εξής: α) μεγαλώνει (μέχρι ενός ορίου) η $T_{εκ}$, β) η μέγιστη ροπή $T_{μεγ}$, της οποίας το μέγεθος δεν εξαρτάται από την ολική αντίσταση του δρομέα, μετατοπίζεται σε μικρότερο αριθμό στροφών και γ) η διολίσθηση του κινητήρα για το κανονικό φορτίο αυξάνεται, δηλαδή μειώνεται η ταχύτητα n_k .

Όσα αναφέραμε στην παράγραφο αυτή για τη μεταβολή της ροπής και της εντάσεως υποθέτουν ότι η τάση του δικτύου που τροφοδοτεί τον κινητήρα παραμένει σταθερή. Αναφέρομε μόνο, χωρίς να το εξηγήσουμε περισσότερο, ότι όταν η τάση του δικτύου μεταβάλλεται, η ροπή του κινητήρα μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της τάσεως. Αυτό ισχύει βέβαια και για τη ροπή εκκινήσεως.



Σχ. 8.6γ.

Μεταβολή της ροπής σε κινητήρα 100 kW με δακτυλίδια για διάφορες τιμές της εξωτερικής αντιστάσεως.

8.7 Ισχύς ασύγχρονου κινητήρα.

Η ισχύς N_1 που απορροφά από το δίκτυο ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας, οπως είναι γνωστό δίνεται από τη σχέση:

$$N_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \text{συνφ} \quad \text{σε W}$$

Το N_1 , μπορεί να μετρηθεί με βαττόμετρο και τα U και I με βολτόμετρο και αμπερομετρο συνδεσμολογημένα όπως φαίνεται στο σχήμα 8.6α.

Όπως εξηγήσαμε στην παράγραφο 7.5, αν αγνοήσουμε τις ηλεκτρικές απώλειες στο τύλιγμα του στάτη του κινητήρα, η ισχύς N_1 , μέσω των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων μεταφέρεται στο δρομέα. Ο δρομέας χρησιμοποιεί την ισχύ αυτή για να κινησει το φορτίο (με ισχύ N), που έχει στον άξονά του και για να αντιμετωπίσει τις ηλεκτρικές απώλειες στο τύλιγμα του δρομέα ($N_{n,\delta}$), οι οποίες οφείλονται στο φαινόμενο τζουλ. Οι απώλειες σιδήρου και τριβών του δρομέα δεχόμαστε ότι είναι αμελητέες, δηλαδή δεχόμαστε ότι με σημαντική προσέγγιση είναι:

$$N_1 = N + N_{n,\delta}$$

Στην παράγραφο 7.5 είχαμε εξηγήσει επίσης ότι είναι:

$$N_1 = 2 \cdot \pi \cdot n_s \cdot T$$

όπου: T είναι η ροπή που ασκεί στο δρομέα το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, του στάτη. Με αρκετή προσέγγιση (αν αμελήσουμε τις απώλειες) μπορούμε να πούμε ότι η T είναι και η ροπή, με την οποία ο κινητήρας κινεί το φορτίο του και για την οποία όπως είδαμε (παράγρ. 8.6) ισχύει η σχέση:

$$N = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot T$$

Άρα:

$$N_{n,\delta} = N_1 - N = 2 \cdot \pi \cdot n_s \cdot T - 2 \cdot \pi \cdot n \cdot T = 2 \cdot \pi \cdot T \cdot (n_s - n)$$

Είναι όμως (παράγρ. 8.4):

$$n_s - n = s \cdot n_s$$

Συνεπώς:

$$N_{n,\delta} = 2 \cdot \pi \cdot T \cdot n_s \cdot s = N_1 \cdot s$$

Δηλαδή οι ηλεκτρικές απώλειες στο τύλιγμα του δρομέα είναι ανάλογες προς τη διολίσθηση και την ισχύ N_1 , που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο.

Ο βαθμός αποδόσεως του κινητήρα όπως είναι γνωστό δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{N}{N_1}$$

Με τις απλουστευτικές παραδοχές που κάναμε στα προηγούμενα έχομε με προσέγγιση ότι:

$$\eta = \frac{N}{N_1} = \frac{N_1 - N_{n,\delta}}{N_1} = \frac{N_1 - N_1 \cdot s}{N_1} = 1 - s$$

Δηλαδή ο βαθμός αποδόσεως ενός ασύγχρονου κινητήρα στην κανονική του λειτουργία είναι τόσο καλύτερος, όσο μικρότερη είναι η διολίσθησή του. Όπως θα δούμε, στους ασύγχρονους κινητήρες με δακτυλίδια είναι δύνατό να ελαττώσομε την ταχύτητα περιστροφής τους με τη βοήθεια ενός ρυθμιστή στροφών, ο οποίος συνδέεται όπως ο εκκινητής. Πρέπει όμως να έχομε υπόψη μας, ότι στην περίπτωση αυτή ελαττώνομε το βαθμό αποδόσεως του κινητήρα, γιατί η διολίσθησή του αυξάνεται.

Παράδειγμα.

Η ονομαστική ισχύς ενός διπολικού τριφασικού κινητήρα είναι 8 kW και η ταχύτητα περιστροφής 2880 στρ/min. Να υπολογισθεί με προεγγιση ο βαθμός αποδόσεώς του. Πόσος γίνεται ο βαθμός αποδόσεως αν ο κανονικός αριθμός στροφών του κινητήρα είναι $n = 2700$ στρ/min; (Να ληφθεί $f=50\text{Hz}$).

Λύση.

Για $n = 2880$ στρ/min είναι:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{3000 - 2880}{3000} = \frac{120}{3000} = 0,04$$

Άρα ο βαθμός αποδόσεως θα είναι:

$$\eta = 1 - s = 1 - 0,04 = 0,96$$

Για $n = 2700$ στρ/min είναι:

$$s = \frac{3000 - 2700}{3000} = \frac{300}{3000} = 0,1$$

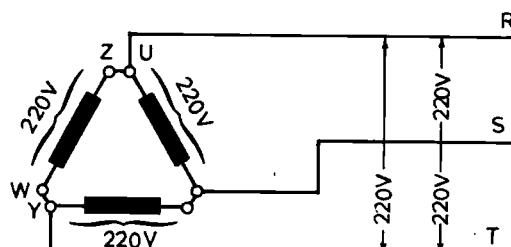
Ο βαθμός αποδόσεως είναι τώρα:

$$\eta = 1 - 0,1 = 0,9$$

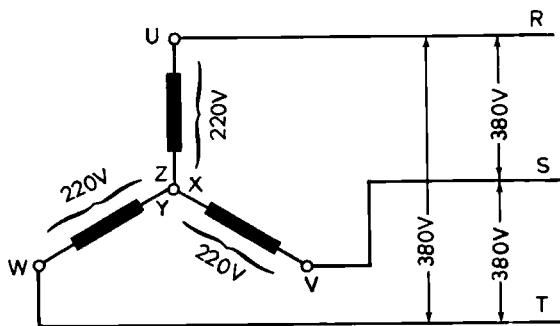
8.8 Τάση λειτουργίας ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων.

Τα τυλίγματα των τριών φάσεων του στάτη κάθε τριφασικού κινητήρα είναι υπολογισμένα από τον κατασκευαστή να εργάζονται με μία ορισμένη (φασική) τάση π.χ. 220 V. Η τάση του δικτύου, στο οποίο μπορεί ένας τέτοιος κινητήρας να λειτουργήσει κανονικά, εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο είναι συνδεσμολογημένες μεταξύ τους οι τρεις φάσεις του στάτη (σχ. 8.2β).

α) **Σύνδεση σε τρίγωνο.** Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 8.8α που παριστάνει τη συνδεση των φάσεων σε τρίγωνο, για να έχομε τάση 220 V στο τύλιγμα κάθε φάσεως, πρέπει η τάση του δικτύου (πολική τάση) που τροφοδοτεί τον κινητήρα να είναι 220 V.



Σχ. 8.8α.
Σύνδεση σε τρίγωνο.



Σχ. 8.8β.
Σύνδεση σε αστέρα.

β) Σύνδεση σε αστέρα. Αν στον ίδιο κινητήρα συνδεσμολογήσουμε τις φάσεις του τυλίγματος του στάτη σε αστέρα (σχ. 8.8β), για να επικρατεί πάλι τάση 220 V στο τύλιγμα κάθε φάσεως, όση δηλαδή έχει προβλέψει ο κατασκευαστής, θα πρέπει η τάση του δικτύου (πολική) να είναι 1,73 φορές μεγαλύτερη, δηλαδή 380 V (παράγρ. 5.6).

Στην πινακίδα ενός τέτοιου κινητήρα, η τάση είναι σημειωμένη ως εξής:

220/380 V ή

220/380 V Δ/Y ή

220 V Δ

Όλα αυτά σημαίνουν ότι ο κινητήρας μπορεί να εργασθεί κανονικά με τάση δικτύου 220 V με σύνδεση σε τρίγωνο (Δ) ή με τάση δικτύου 380 V με σύνδεση σε αστέρα (Y).

Για ένα κινητήρα όπου το τύλιγμα κάθε φάσεως είναι κατασκευασμένο για να εργάζεται με τάση 380 V, μπορούμε αντίστοιχα να συναντήσουμε τις ακόλουθες αναγραφές της τάσεως του κινητήρα στην πινακίδα του:

380/660 V ή

380/660 V Δ/Y ή

380 V Δ

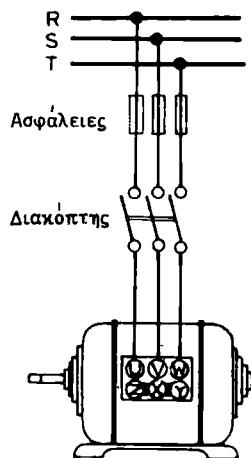
Σημείωση: είναι $1,73 \times 380 \approx 660$.

Από τα παραπάνω συμπεραίνομε ότι σε δίκτυο χαμηλής τάσεως που έχει τάση (πολική) 380 V, ο πρώτος από τους κινητήρες μπορεί να λειτουργήσει κανονικά σε σύνδεση αστέρα, ενώ ο δεύτερος μόνο σε σύνδεση τρίγωνο.

8.9 Εκκίνηση τριφασικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα.

a) Απευθείας εκκίνηση.

Η απευθείας εκκίνηση, δηλαδή με τη χρήση μόνο ενός απλού τριπολικού διακόπτη (σχ. 8.9α), είναι η απλούστερη μέθοδος για να βάλομε σε λειτουργία ένα τρι-



Σχ. 8.9α.
Απευθείας εκκίνηση.

φασικό κινητήρα με βραχυκύκλωμένο δρομέα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε ορισμένες περιπτώσεις στη βιομηχανία.

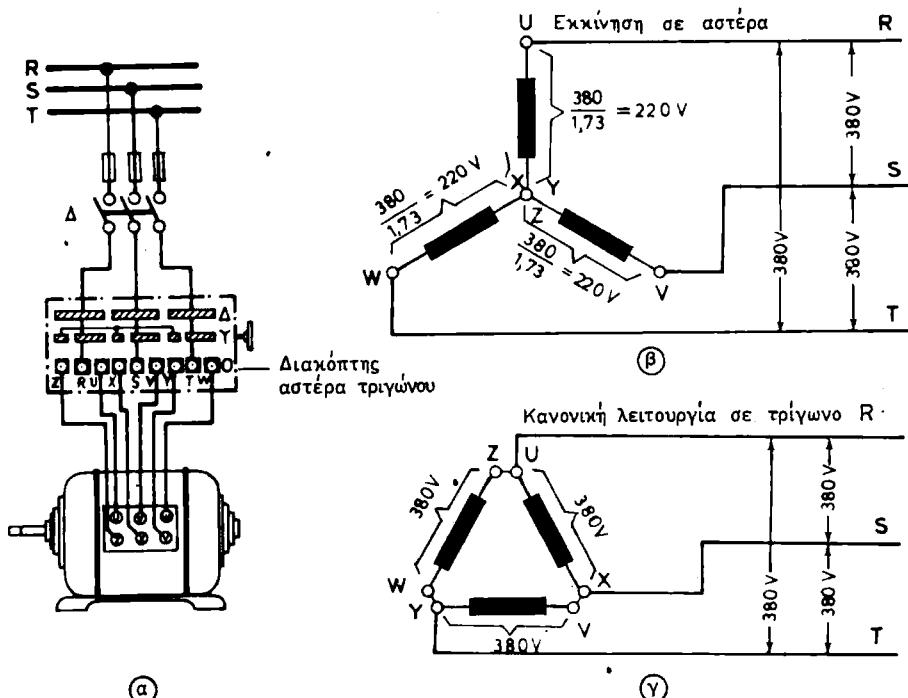
Ο λόγος για τον οποίο δεν έχει γενική εφαρμογή στους κινητήρες με βραχυκύκλωμένο δρομέα είναι ότι, όπως εξηγήσαμε στην παράγραφο 8.6(β), οι κινητήρες αυτοί έχουν μεγάλες εντάσεις εκκίνησεως. Οι εντάσεις αυτές προκαλούν στιγμιαίες πτώσεις τάσεως στα δίκτυα που τροφοδοτούν τους κινητήρες, οι οποίες ονομάζονται **βυθίσεις τάσεως**. Οι βυθίσεις τάσεως, όταν μάλιστα είναι τακτικές, είναι ενοχλητικές στους άλλους καταναλωτές (φωτισμού, τηλεοράσεως κλπ.) και μπορεί, όταν είναι αρκετά μεγάλες, να προκαλούν ανωμαλίες στη λειτουργία άλλων συσκευών που είναι ευαίσθητες στην τάση (πχ. ηλεκτρονικοί υπολογιστές και συσκευές, γενικότερα).

Εκτός από την απευθείας εκκίνηση, οι υπόλοιποι τρόποι εκκινήσεως των κινητήρων με βραχυκύκλωμένο δρομέα στηρίζονται, όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 8.6(β), στην τροφοδότηση του κινητήρα με μειωμένη τάση κατά την εκκίνηση.

β) Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα-τριγώνου.

Η εκκίνηση στην περίπτωση αυτή γίνεται με τη βοήθεια ενός κατάλληλου διακόπτη [σχ. 8.9β(α)], που ονομάζεται **διακόπτης αστέρα-τριγώνου**. Το τύλιγμα του στάτη, το οποίο πρέπει να είναι κατασκευασμένο για να εργάζεται κανονικά με σύνδεση σε τρίγωνο, στην εκκίνηση συνδεσμολογείται από το διακόπτη σε αστέρα.

Οταν ο δείκτης του στροφάλου του διακόπτη βρίσκεται στη θέση 0, δεν γίνεται τροφοδότηση του κινητήρα από το δίκτυο, ακόμα κι αν ο διακόπτης Δ είναι κλειστός. Ο κινητήρας είναι ακίνητος. Όταν περιστρέψωμε το στρόφαλο, ώστε ο δείκτης του να αντιστοιχεί στο σύμβολο Y, οι αντίστοιχοι μεταλλικοί τομείς του διακόπτη συνδεσμολογούν τις τρεις φάσεις του τυλίγματος του στάτη σε αστέρα, όπως



Σχ. 8.9β.

Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα - τριγώνου.

δείχνει το σχήμα 8.9β(β) και ταυτόχρονα το τύλιγμα τίθεται υπό τάση και συνεπώς ο κινητήρας ξεκινά.

Αφού ξεκινήσει ο κινητήρας και οι στροφές του φθάσουν σε κάποιο όριο ώστε να μην αυξάνονται περισσότερο, στρέφομε το στρόφαλο του διακόπτη αστέρα - τριγώνου στη θέση Δ . Οι φάσεις του τυλίγματος του στάτη συνδεσμολογούνται τώρα από τους τομείς του διακόπτη σε τρίγωνο, όπως δείχνει το σχήμα 8.9β(γ). Με τη συνδεσμολογία αυτή κάθε φάση του τυλίγματος τίθεται υπό την πολική τάση του δικτύου, για την οποία και έχει κατασκευασθεί. Συνεπώς ο κινητήρας μπορεί να εργασθεί με το κανονικό του φορτίο.

Αν η εκκίνηση του κινητήρα γινόταν χωρίς διακόπτη αστέρα-τριγώνου, αλλά με απευθείας ζεύξη των τριών φάσεών του σε τρίγωνο, η ένταση, που θα διέρρεε (στην εκκίνηση) το τύλιγμα κάθε φάσεως, θα δινόταν από τη σχέση:

$$I_\phi = \frac{U}{Z}$$

όπου: U είναι η πολική τάση του δικτύου σε V και Z είναι η σύνθετη αντίσταση σε Ω κάθε φάσεως του κινητήρα «εν στάσει».

Συνεπώς η ένταση γραμμης (στο δίκτυο) θα ήταν:

$$I_\Delta = \sqrt{3} \cdot I_\phi = \frac{\sqrt{3} \cdot U}{Z}$$

Τώρα που η εκκίνηση του κινητήρα γίνεται με σύνδεση των φάσεων σε αστέρα, σε κάθε φάση επικρατεί μειωμένη τάση:

$$U_\phi = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

Άρα η ένταση κάθε φάσεως, η οποία είναι τώρα και ένταση γραμμής, θα είναι:

$$I_Y = \frac{U_\phi}{Z} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z}$$

Συνεπώς είναι:

$$I_Y = \frac{I_\Delta}{3}$$

Δηλαδή η ένταση, την οποία ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο στην εκκίνηση με ζεύξη σε αστέρα, είναι τρεις φορές μικρότερη από την ένταση που απορροφά με απευθείας ζεύξη σε τρίγωνο. Κατά το ίδιο ποσοστό μειώνεται και η ροπή εκκίνησεως του κινητήρα (βλέπε και καμπύλες στο σχήμα 8.9γ), δεδομένου ότι αυτή είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσεως.

Για τη χρησιμοποίηση του διακόπτη αστέρα-τριγώνου πρέπει, όπως αναφέραμε, ο κινητήρας να είναι κατασκευασμένος για να εργάζεται κανονικά με ζεύξη των φάσεων του τυλίγματος του στάτη σε τρίγωνο, διαφορετικά η χρησιμοποίηση διακοπής αυτού του είδους δεν είναι δυνατή.

γ) Εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη.

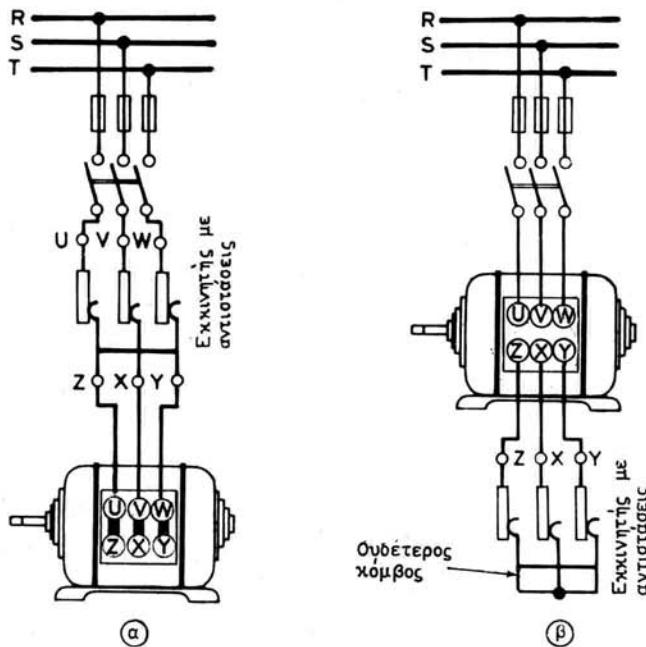
Στη μέθοδο αυτή της εκκινήσεως χρησιμοποιούμε εκκινητή που αποτελείται από τρεις αντιστάσεις, τις οποίες παρεμβάλλομε στο κύκλωμα που τροφοδοτεί το στάτη του κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα, όπως δείχνει το σχήμα 8.9ε (α).

Ο κινητήρας με τον τρόπο αυτό ξεκινά με ελαττωμένη τάση και συνεπώς και με ελαττωμένη ένταση. Προοδευτικά όσο αυξάνεται η ταχύτητά του, αφαιρούμε τις αντιστάσεις, ώστε στην κανονική λειτουργία του κινητήρα όλες οι αντιστάσεις του εκκινητή να είναι εκτός κυκλώματος.

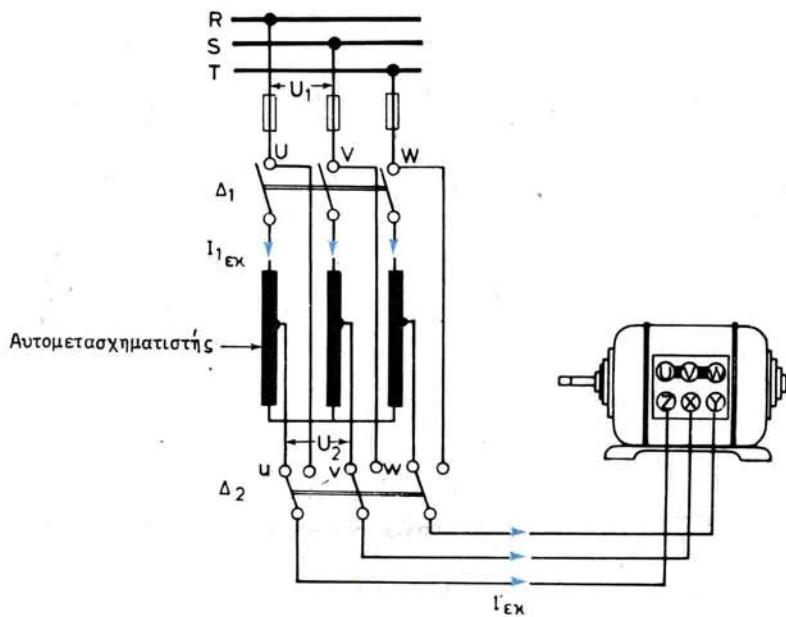
Αν ο κινητήρας είναι κατασκευασμένος να λειτουργεί κανονικά με ζεύξη των φάσεων του σε αστέρα, τότε η τοποθέτηση του εκκινητή γίνεται, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.9ε (β). Στην περίπτωση αυτή ο ουδέτερος κόμβος των τριών φάσεων του κινητήρα γίνεται στον εκκινητή.

δ) Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή.

Για την εκκίνηση μεγάλων κινητήρων με βραχυκυκλωμένο δρομέα χρησιμοποιούμε συνήθως τριφασικούς αυτομετασχηματίστες (παράγρ. 6.10) που συνδεσμολογούνται, όπως δείχνει το σχήμα 8.9στ. Στην εκκίνηση συνδέομε τον κινητήρα με τη βοήθεια του διακόπτη διπλής ενέργειας Δ_2 με τις λήψεις u, v, w του αυτομετασχηματιστή. Στη συνέχεια κλείνομε το διακόπτη Δ_1 , ο οποίος τροφοδοτεί τον αυτομετασχηματιστή. Έτσι ο κινητήρας ξεκινά με ελαττωμένη τάση, η οποία φθάνει μέχρι το $\frac{1}{3}$ της τάσεως του δικτύου (ανάλογα με την κατασκευή του αυτομετασχηματιστή).



Σχ. 8.9ε.
Εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη.



Σχ. 8.9στ.
Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή.

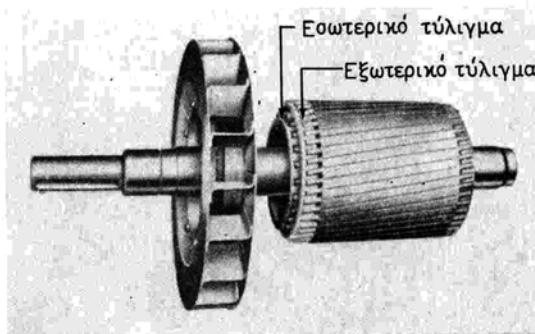
Μετά την εκκίνηση του κινητήρα μεταθέτομε τις επαφές του διακόπτη Δ_2 προς τα δεξιά, ώστε ο κινητήρας να βρεθεί στην πλήρη τάση του δικτύου για την κανονική του λειτουργία. Τέλος ανοίγομε το διακόπτη Δ_1 για να μην είναι υπό τάση ο αυτομετασχηματιστής.

Αν με τη χρήση του αυτομετασχηματιστή η τάση που εφαρμόζεται στον κινητήρα είναι π.χ. το $\frac{1}{2}$ της τάσεως του δικτύου, τότε και το ρεύμα I_{EK} , που απορροφά ο κινητήρας στην εκκίνηση, ελαττώνεται στο $\frac{1}{2}$ του ρεύματος I'_{EK} , που θα απορροφούσε στην απευθείας εκκίνηση. Το πρωτεύον όμως ρεύμα $I_{1 \text{ EK}}$ (σχ. 8.9στ) που ο αυτομετασχηματιστής απορροφά από το δίκτυο, ελαττώνεται στο $\frac{1}{4}$. Δηλαδή το ρεύμα αυτό έναντι του I'_{EK} ελαττώνεται με το τετράγωνο της **σχέσεως μεταφοράς** του αυτομετασχηματιστή. Όμοια ελαττώνεται και η ροπή εκκινήσεως του κινητήρα.

8.10 Κινητήρες διπλού κλωβού.

Ο κινητήρας με τύλιγμα κλωβού είναι πολύ απλός στην κατασκευή του, έχει μικρό κόστος και καλό βαθμό αποδόσεως. Έχει όμως το μειονέκτημα ότι το ρεύμα της απευθείας εκκινήσεως, είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το ονομαστικό του ρεύμα. Αυτό επιβάλλει, εκτός από την περίπτωση των μικρών κινητήρων, τη χρησιμοποίηση των μέσων εκκινήσεως, που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Αποτέλεσμα όνως της χρησιμοποίησεως των μέσων αυτών τα οποία όπως είδαμε ελαττώνουν στην εκκίνηση την τάση που εφαρμόζεται, είναι να ελαττώνεται και η ροπή εκκινήσεως του κινητήρα. Συνεπώς οι κινητήρες αυτοί μπορούν να ξεκινούν ή χωρίς φορτίο ή με πολύ ελαττωμένο φορτίο.

Το μειονέκτημα αυτό αντιμετωπίστηκε με την κατασκευή κινητήρων με θραχυκυκλωμένο δρομέα που έχουν διπλό τύλιγμα κλωβού (παράγρ. 8.2, σχ. 8.2γ) ή τύλιγμα με βαθειές αύλακες (σχ. 8.2δ). Στην περίπτωση του διπλού τυλίγματος κλωβού το εξωτερικό τύλιγμα (σχ. 8.10α) έχει ράθδους μικρής διατομής και έχει συνεπώς μεγάλη ωμική αντίσταση. Επίσης, επειδή το τύλιγμα αυτό βρίσκεται κοντά στην περιφέρεια, η αυτεπαγωγική του αντίσταση λόγω σκεδάσεως είναι μικρή. Το εσωτερικό τύλιγμα κλωβού αποτελείται από λιγότερες ράθδους μεγάλης διατομής από χαλκό. Έχει συνεπώς μικρή ωμική και μεγάλη αυτεπαγωγική αντίσταση.



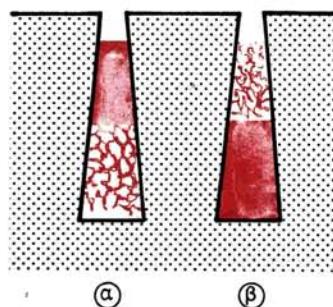
Σχ. 8.10α.
Δρομέας κινητήρα διπλού κλωβού.

8.11 Κινητήρες με βαθιά αυλάκια.

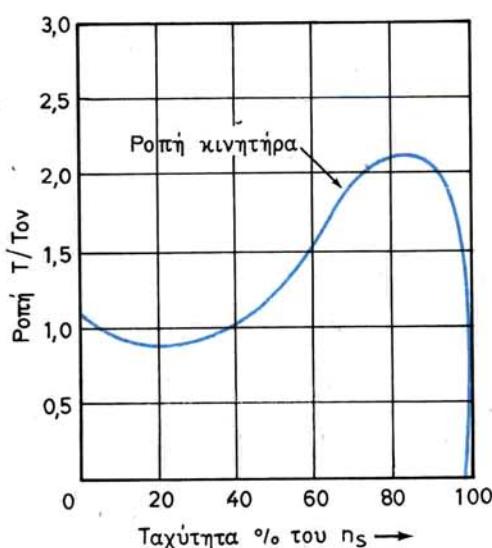
Ο κινητήρας διπλού κλωβού εκτοπίζεται σε ορισμένες περιπτώσεις από τον κινητήρα με βαθιά αυλάκια (παράγρ. 8.2, σχ. 8.2γ), ο οποίος είναι πιο απλός στην κατασκευή και έχει περίπου τα χαρακτηριστικά του πρώτου.

Η αυτεπαγωγή των ράβδων μεταβάλλεται, όπως και στο διπλό κλωβό, με το βάθος της οδοντώσεως. Στην εκκίνηση, η σύνθετη αντίσταση είναι μεγαλύτερη για τα μέρη των ράβδων που βρίσκονται στο βάθος. Συνεπώς τα ρεύματα που δημιουργούνται από επαγωγή κυκλοφορούν κυρίως στο μέρος των ράβδων του τυλίγματος που είναι προς την περιφέρεια [(σχ. 8.11α (α))]. Έτσι αναπτύσσεται ικανοποιητική ροπή εκκινήσεως, με σχετικά μικρά ρεύματα εκκινήσεως (σχ. 8.11β).

Στην κανονική λειτουργία, όταν η ταχύτητα αυξηθεί, ελαττώνεται η συχνότητα



Σχ. 8.11α.
Διανομή του ρεύματος σε κινητήρες
με βαθιά αυλάκια.



Σχ. 8.11β.
Ροπή κινητήρα με βαθιά αυλάκια
και απ' ευθείας εκκίνηση.

του ρεύματος που δημιουργείται από επαγωγή στο τύλιγμα του δρομέα. Η σύνθετη αντίσταση είναι τώρα μικρότερη στο μέρος των ράβδων, που βρίσκονται προς το εσωτερικό του δρομέα. Άρα ρεύμα θα κυκλοφορεί κυρίως στο μέρος αυτό των ράβδων [(σχ. 8.11α (β))]. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται καλός βαθμός αποδόσεως στην κανονική λειτουργία του κινητήρα.

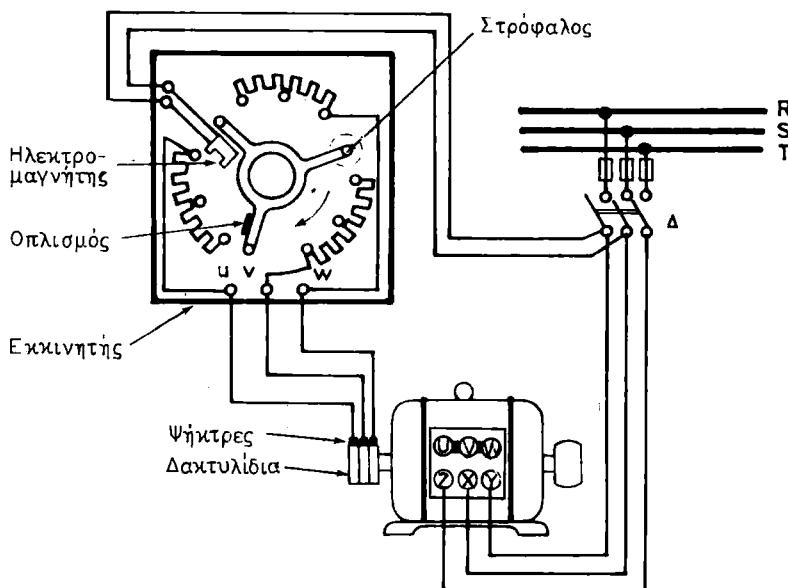
Παρατηρούμε δηλαδή ότι στους κινητήρες αυτούς γίνεται **μετατόπιση** του ρεύματος μέσα στις ράβδους του τυλίγματος κλωβού. Αυτός είναι ο λόγος που, όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 8.2, οι δρομείς αυτοί ονομάζονται **δρομείς μετατόπισεως ρεύματος**.

Οι κινητήρες με βαθιά αυλάκια χρησιμοποιούνται σήμερα σε σημαντική έκταση και μάλιστα με απευθείας εκκίνηση για ισχύ μέχρι μερικές εκατοντάδες κιλοβάττ.

8.12 Εκκίνηση κινητήρων με δακτυλίδια.

Στους κινητήρες με δακτυλίδια για να ελαττώσουμε την ένταση εκκίνησεως που απορροφούν από το δίκτυο, όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 8.6, συνδέομε ένατριφασικό εκκινητή σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα με τη βοήθεια των δακτυλιδίων και των ψηκτρών που εφάπτονται σε αυτά (σχ. 8.12α).

Ο εκκινητής του σχήματος 8.12α παριστάνεται στη θέση ηρεμίας. Για την εκκίνηση του κινητήρα, αφού κλείσουμε το διακόπτη Δ , στρέφομε το στρόφαλο του εκκινητή ώστε οι τρεις βραχίονές του να έλθουν στις πρώτες επαφές. Ολόκληρες οι αντιστάσεις του εκκινητή είναι τότε συνδεμένες σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα. Μετά την εκκίνηση του κινητήρα στρέφομε σιγά-σιγά το στρόφαλο στις δεύτερες επαφές κλπ. μέχρι τις τελευταίες, οπότε όλες οι αντιστάσεις του εκκινητή θα είναι εκτός κυκλώματος. Τώρα ο στρόφαλος του εκκινητή βραχυκυκλώνει τα τρία δακτυλίδια.



Σχ. 8.12α.

Συνδεσμολογία τριφασικού εκκινητή αντιστάσεων με ασύγχρονο κινητήρα με δακτυλίδια.

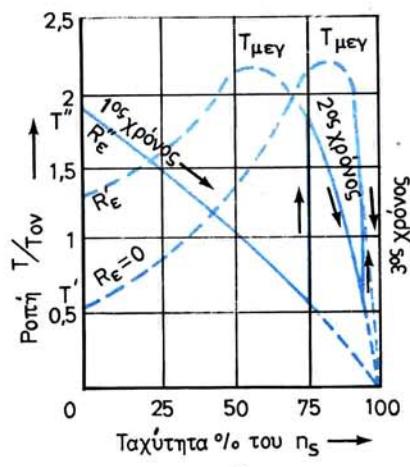
Αν ο κινητήρας έχει σύστημα ανυψώσεως των ψηκτρών, όπως αυτό του σχήματος 8.2η, τότε, αφού βραχικυκλώσομε με αυτό τα δακτυλίδια (παράγρ. 8.2), αφήνομε το στρόφαλο του εκκινητή, ο οποίος με ένα ελατήριο επαναφοράς που έχει επανέρχεται στη θέση ηρεμίας, ενώ ο κινητήρας εργάζεται κανονικά.

Αν ο κινητήρας δεν έχει σύστημα ανυψώσεως των ψηκτρών, ο στρόφαλος του εκκινητή κρατιέται στην τελευταία επαφή με τη βοήθεια ενός **ηλεκτρομαγνήτη** που έχει και του οπλισμού του (σχ. 8.12a). Αν για οποιοδήποτε λόγο ελαττωθεί η τάση του δικτύου, ο ηλεκτρομαγνήτης ελευθερώνει τον οπλισμό του και το ελατήριο επαναφέρει το στρόφαλο στη θέση ηρεμίας. Το ίδιο συμβαίνει και αν ανοίξουμε το διακόπτη Δ. Έτσι δεν υπάρχει κίνδυνος να ξεκινήσει ο κινητήρας με τις αντιστάσεις του εκκινητή βραχικυκλώμενες.

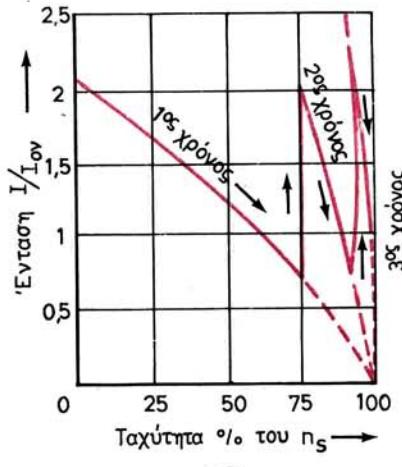
Ο εκκινητής του σχήματος 8.12a έχει τρεις επαφές για κάθε αντίσταση, δηλαδή η εκκίνηση γίνεται σε τρεις χρόνους. Σε κάθε επαφή του στροφάλου, δηλαδή σε κάθε χρόνο, είναι συνδεμένη διαφορετική αντίσταση σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα. Όπως είδαμε όμως στην παράγραφο 8.6, για κάθε τιμή της εξωτερικής αντιστάσεως R_e έχομε και διαφορετική καμπύλη μεταβολής της ροπής, όταν μεταβάλλεται ο αριθμός στροφών του κινητήρα (σχ. 8.6γ). Άρα στη διάρκεια της εκκινήσεως η ροπή του κινητήρα θα μεταβάλλεται, όπως δείχνει το σχήμα 8.12β(a). Κατά τον τελευταίο χρόνο, όταν όλη η αντίσταση του εκκινητή θα είναι εκτός ζυκλώματος, οπότε έχομε την κανονική λειτουργία του κινητήρα, η ροπή θα μεταβάλλεται στην καμπύλη $R_e = 0$ των σχημάτων 8.6γ και 8.12β (a).

Στο σχήμα 8.12β (β) παριστάνεται η αντίστοιχη μεταβολή της εντάσεως, που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο, σε όλη τη διάρκεια της εκκινήσεως μέχρι και την κανονική λειτουργία (3ος χρόνος).

Παρατηρούμε ότι στη διάρκεια της εκκινήσεως η ροπή του κινητήρα κυμαίνεται μεταξύ δυο ορίων T' και T'' (σχ. 8.12β(a)). Τα όρια αυτά ρυθμίζονται με κατάλληλη εκλογή των αντιστάσεων και του αριθμού των χρόνων του εκκινητή. Πάντως πρέπει να σημειώσουμε ότι όσο το άνω όριο T'' είναι μεγαλύτερο και πλησιάζει το $T_{μεγ}$,



(a)



(b)

Σχ. 8.12β.

Μεταβολή της ροπής και της εντάσεως του στάτη κατά την εκκίνηση κινητήρα με δακτυλίδια.

τόσο και η ένταση εκκινήσεως θα είναι μεγαλύτερη. Μόνο σε περιπτώσεις, που χρειάζεται να έχομε πολύ μεγάλη ροπή εκκινήσεως, η ολική αντίσταση του εκκινητή εκλέγεται έτσι ώστε το T'' να είναι ίσο με το $T_{μεγ}$. Για κινητήρα π.χ. για τον οποίο ισχύουν οι καμπύλες του σχήματος 8.6γ, θα πρέπει να ληφθεί ολική αντίσταση του εκκινητή $R''_e = 5 R_e$.

Η ένταση εκκινήσεως είναι δυνατό να γίνει όσο θέλομε μικρή με κατάλληλη εκλογή της ολικής αντιστάσεως του εκκινητή. Στην περίπτωση αυτή όμως ελαττώνεται και η ροπή εκκινήσεως T'' .

Παρά το γεγονός ότι με τη χρήση του εκκινητή στους κινητήρες με δακτυλίδια βελτιώνονται σημαντικά οι συνθήκες εκκινήσεως, με αύξηση της ροπής και μείωση του ρεύματος, η χρήση των κινητήρων αυτών είναι σχετικά περιορισμένη. Το κόστος τους είναι μεγαλύτερο από τους κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα και χρειάζονται πιο συχνή συντήρηση επειδή έχουν τα δακτυλίδια, τις ψήκτρες κλπ. Χρησιμοποιούνται για ισχύ μέχρι μερικές χιλιάδες κιλοβάττ.

8.13 Ρύθμιση της ταχύτητας στους ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες.

Όπως είδαμε στην παράγραφο 8.4, η ταχύτητα περιστροφής ενός ασύγχρονου κινητήρα δίνεται από τη σχέση:

$$n = n_s (1 - s) \quad \text{σε στρ/s}$$

όπου: n_s είναι η σύγχρονη ταχύτητα σε στρ/s και s η διολίσθηση του κινητήρα.

Είναι όμως:

$$n_s = \frac{f}{p} \quad \text{σε στρ/s}$$

όπου: f είναι η συχνότητα του δικτύου τροφοδοτήσεως σε Hz και p ο αριθμός ζευγών πόλων του τυλίγματος του στάπι.

Άρα:

$$n = \frac{f}{p} (1 - s) \quad \text{σε στρ/s}$$

Από τη σχέση αυτή συμπεραίνομε ότι για να μεταβάλλομε την ταχύτητα περιστροφής σε ένα ασύγχρονο κινητήρα, πρέπει να μεταβάλλομε ένα από τα μεγέθη s , p , f .

a) Ρύθμιση της ταχύτητας με μεταβολή της διολισθήσεως.

Η μέθοδος αυτή είναι δυνατό να εφαρμοσθεί στους κινητήρες με δακτυλίδια. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται ένας **ρυθμιστής στροφών**, ο οποίος συνδέεται ακριβώς όπως ο εκκινητής (σχ. 8.12α). Η μόνη διαφορά είναι, ότι οι αντιστάσεις του ρυθμιστή στροφών είναι υπολογισμένες, ώστε να μπορούν να παραμένουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα στο κύκλωμα, χωρίς κίνδυνο να καταστραφούν από τη θερμότητα που παράγεται. Οι αντιστάσεις του εκκινητή αντέχουν μόνο στη θερμότητα, η οποία παράγεται στο σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα που διαρκεί η εκκίνηση.

Αν θέλομε να ελαττώσουμε την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, εισάγομε σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα αντιστάσεις του ρυθμιστή στροφών. Όσο μεγαλύτερες είναι οι αντιστάσεις, τόσο μικρότερη είναι η ταχύτητα του κινητήρα για ορισμένο φορτίο. Αυτό εξηγείται εύκολα με τη βοήθεια των καμπυλών του σχήματος 8.6γ. Για φορτίο π.χ. ίσο με το T_{ov} ($T/T_{ov} = 1$) και για μηδενική αντίσταση του ρυθμιστή στροφών ($R_e = 0$) έχουμε ταχύτητα του κινητήρα n_k . Η ταχύτητα του κινητήρα με το ίδιο φορτίο ελαττώνεται σε n'_k ή n''_k αν οι αντιστάσεις του ρυθμιστή είναι $R'_e = 2 R_2$ ή $R''_e = 5 R_2$.

Η μέθοδος αυτή ρυθμίσεως των στροφών του ασύγχρονου κινητήρα είναι αντιοκονομική, γιατί ελαττώνεται σημαντικά ο βαθμός αποδόσεως του κινητήρα. Αυτό γίνεται γιατί έχουμε απώλειες ενέργειας με μορφή θερμότητας, που εμφανίζεται στις αντιστάσεις του ρυθμιστή στροφών.

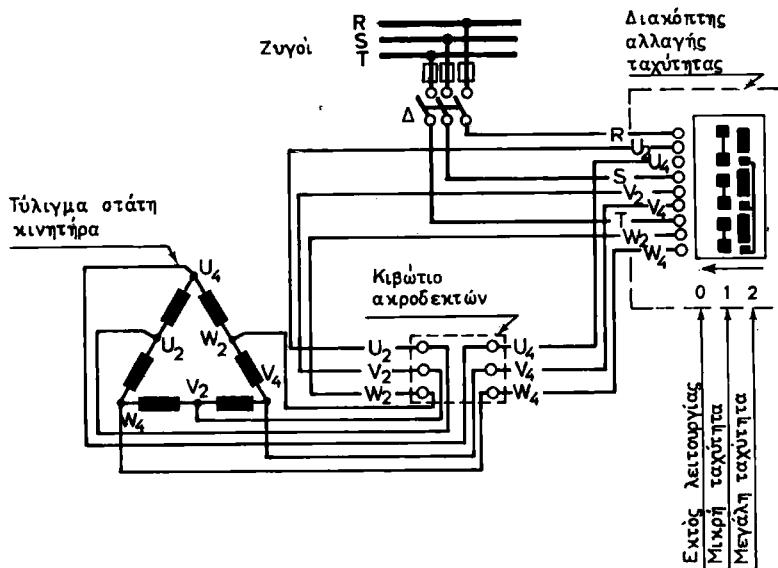
Πρέπει τέλος να σημειώσουμε ότι στην περίπτωση χρησιμοποιήσεως ρυθμιστή στροφών, μεταβολή του φορτίου του κινητήρα συνεπάγεται και μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του. Επίσης, ότι αύξηση της ταχύτητας του κινητήρα πέρα από τη σύγχρονη ταχύτητα δεν είναι δυνατή με τη μέθοδο αυτή.

β) Μεταβολή του αριθμού ζευγών πόλων του τυλίγματος.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στην περίπτωση κινητήρων με βραχυκυκλωμένο δρομέα και με απευθείας εκκίνηση.

Η μέθοδος στηρίζεται στην αλλαγή της συνδεσμολογίας των τυλιγμάτων του στάτη ώστε να αλλάζει ο αριθμός των πόλων του όλου τυλιγματος. Με τη μέθοδο αυτή μπορούμε να πετύχουμε κινητήρες που έχουν 2 ή 3 ή και 4 ταχύτητες.

Όταν η αλλαγή ταχύτητας πρέπει να γίνεται τακτικά κατά τη λειτουργία του κινητήρα, τότε χρησιμοποιείται ένας ειδικός **διακόπτης αλλαγής ταχύτητας**, του οποίου τη συνδεσμολογία δείχνει το σχήμα 8.13α.



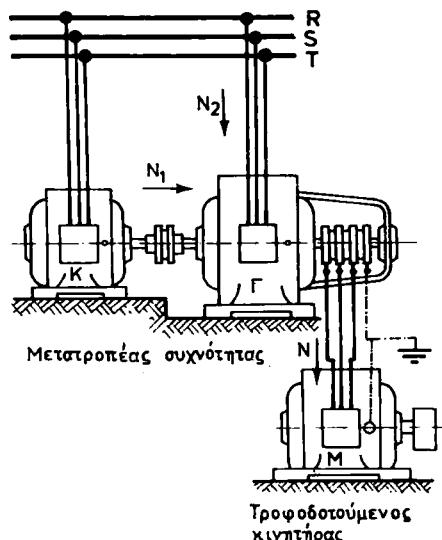
Σχ. 8.13α.

Συνδεσμολογία διακόπτη αλλαγής ταχύτητας σε κινητήρα δύο ταχυτήτων.

γ) Αλλαγή της συχνότητας του ρεύματος τροφοδοτήσεως.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως όταν θέλουμε να έχομε κινητήρες που να περιστρέφονται με ταχύτητες πάνω από 3000 στρ./min.

Όπως είναι γνωστό, με ρεύμα συχνότητας 50 Hz και διπολικό κινητήρα έχομε σύγχρονη ταχύτητα 3000 στρ./min και πραγματική ταχύτητα του κινητήρα λίγο μικρότερη (κατά τη διολίσθηση). Για την κίνηση όμως ορισμένων μηχανημάτων χρειάζονται ταχύτητες μεγαλύτερες. Στις περιπτώσεις αυτές τροφοδοτούμε τους κινητήρες με ρεύμα που έχει συχνότητα μεγαλύτερη από 50 Hz, το οποίο παίρνουμε συνήθως από ένα **ασύγχρονο μετατροπέα συχνότητας**. Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται (σχ. 8.136) από ένα κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δραμέστα K , ο οποίος κινεί το δρομέα ενός κινητήρα με δακτυλίδια Γ που χρησιμοποιείται σαν γεννήτρια. Τα τυλίγματα του στάτη και των δυο μηχανών τροφοδοτούνται από το δίκτυο ηλεκτροδοτήσεως R , S , T (380 V, 50 Hz).



Σχ. 8.13β.
Μετατροπέας συχνότητας.

δ) Κλιμακωτή ζεύξη.

Μία άλλη μέθοδος για τη ρύθμιση της ταχύτητας των ασύγχρονων κινητήρων, η οποία είναι συνδυασμός των μεθόδων που περιγράψαμε προηγούμενα, είναι η ονομαζόμενη **κλιμακωτή ζεύξη** δυο ή περισσοτέρων κινητήρων. Εφαρμογή της μεθόδου αυτής με δυο ασύγχρονους κινητήρες δείχνει το σχήμα 8.136. Οι δυο μηχανές έχουν τους ίδιους αξονές τους συζευγμένους μηχανικά.

8.14 Αλλαγή της φοράς περιστροφής.

Η φορά περιστροφής ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, όπως εξηγήσαμε στην παράγραφο 8.3, είναι η ίδια με τη φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου

του στάτη. Για να αλλάξομε τη φορά περιστροφής του κινητήρα, πρέπει να αλλάξομε τη φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου. Αυτό γίνεται (παράγρ. 7.2) με αντιμετάθεση των συνδέσεων με τους ακροδέκτες σε δυο από τους τρεις αγωγούς τροφοδοτήσεως του κινητήρα.

8.15 Απώλειες, βαθμός αποδόσεως και συντελεστής ισχύος.

α) Απώλειες.

Οι απώλειες ενός κινητήρα κατά τη λειτουργία του διακρίνονται σε **απώλειες σταθερές**, δηλαδή ανεξάρτητες από το φορτίο του κινητήρα και σε **απώλειες μεταβλητές**, δηλαδή που μεταβάλλονται με το φορτίο.

Σταθερές απώλειες είναι οι μαγνητικές απώλειες $N_{μαγγ}$ (από υστέρηση και δινορρεύματα) και οι μηχανικές απώλειες $N_{μηχ}$ (λόγω τριβών και αερισμού). Οι απώλειες αυτές είναι σταθερές, αν παραδεχθούμε ότι η τάση τροφοδοτήσεως του κινητήρα είναι σταθερή και η ταχύτητα περιστροφής του επίσης περίπου σταθερή. Οι παραδοχές αυτές ισχύουν πράγματι στην πράξη.

Απώλειες μεταβλητές είναι οι ηλεκτρικές απώλειες του στάτη $N_{η.σ}$, που οφείλονται στο φαινόμενο τζουλ και οι αντίστοιχες απώλειες του δρομέα $N_{η.δ}$.

Είναι εύκολο να αποδειχθεί, ότι οποιαδήποτε και αν είναι η συνδεσμολογία (τρίγωνο ή αστέρα) των τριών φάσεων του στάτη, αν μετρήσουμε την ωμική αντίσταση R_1 , του τυλίγματος μεταξύ δύο ακροδεκτών και την ένταση γραμμής I που απορροφά στη λειτουργία ο κινητήρας, οι ηλεκτρικές απώλειες του στάτη θα είναι:

$$N_{η.σ} = \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot I^2$$

Οι ηλεκτρικές απώλειες του δρομέα αποδεικνύεται ότι είναι:

$$N_{η.δ} = s \cdot (N_1 - N_{η.σ}) = s \cdot \left(N_1 - \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot I^2 \right)$$

Οι σταθερές απώλειες του κινητήρα είναι δυνατό να προσδιορισθούν με το πείραμα λειτουργίας χωρίς φορτίο, κατά το οποίο μετράμε την ισχύ N_0 που απορροφά ο κινητήρας και την ένταση γραμμής I_0 . Είναι:

$$N_{μαγγ} + N_{μηχ} = N_0 - \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot I_0^2$$

β) Βαθμός αποδόσεως.

Μετά τον προσδιορισμό των απωλειών, ο βαθμός αποδόσεως ενός κινητήρα υπολογίζεται από τη γνωστή σχέση (παράγρ. 8.7):

$$\eta = \frac{N}{N_1} = \frac{N_1 - N_{απ}}{N_1} = \frac{N_1 - (N_{η.σ} + N_{η.δ} + N_{μαγγ} + N_{μηχ})}{N_1}$$

Επίσης, ο βαθμός αποδόσεως ενός κινητήρα μπορεί να προσδιορισθεί και με τη μέθοδο που περιγράψαμε στην παράγραφο 8.6(a), με μέτρηση δηλαδή των N_1 και N .

Παράδειγμα.

Ένας ασύγχρονος τριφασικός τετραπολικός κινητήρας τάσεως 220 V Δ, 50 Hz περιστρέφεται με ταχύτητα $n = 1450$ στρ/min και απορροφά ένταση ρεύματος γραμμής 15A με συντελεστή ισχύος συνφ=0,82. Να υπολογισθεί ο βαθμός αποδόσεως του υπό φορτίο, με βάση τα αποτελέσματα των ακολούθων μετρήσεων: Ισχύς χωρίς φορτίο $N_0 = 430$ W, αντίστοιχη ένταση $I_0 = 2$ A, αντίσταση του τυλίγματος του στάτη μεταξύ ακροδεκτών $R_1 = 0,8 \Omega$.

Λύση.

Η ισχύς που απορροφά ο κινητήρας κατά τη λειτουργία με φορτίο είναι:

$$N_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \text{συνφ} = 1,73 \times 220 \times 15 \times 0,82 = 4700 \text{ W}$$

Οι ηλεκτρικές απώλειες του στάτη στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι:

$$\frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot I_0^2 = 1,5 \times 0,8 \times 2^2 = 5 \text{ W}$$

Η διολίσθηση στη λειτουργία με φορτίο είναι:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0,033$$

Συνεπώς έχομε:

$$N_{μαγν} + N_{μηχ} = N_0 - \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot I_0^2 = 430 - 5 = 425 \text{ W}$$

$$N_{η.\sigma} = \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot I^2 = 1,5 \times 0,8 \times 15^2 = 270 \text{ W}$$

$$N_{η.\delta} = s \cdot (N_1 - \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot I^2) = 0,033 (4700 - 270) = 146 \text{ W}$$

$$\text{Συνολικές απώλειες } N_{απ} = \overline{841 \text{ W}}$$

Τέλος ο βαθμός αποδόσεως θα είναι:

$$\eta = \frac{N_1 - N_{απ}}{N_1} = \frac{4700 - 841}{4700} = 0,82 \quad \text{ή} \quad 82\%$$

γ) Συντελεστής ισχύος.

Συντελεστής ισχύος ενός κινητήρα που λειτουργεί με ορισμένο φορτίο είναι ο λόγος της πραγματικής ισχύος που απορροφά από το δίκτυο προς τη φαινόμενη ισχύ:

$$\text{συνφ} = \frac{N_1}{N_{1s}}$$

Για τη μέτρηση του συνφ αρκούν τα όργανα του σχήματος 8.6α. Με το βαττόμετρο μετράμε την ισχύ N_1 (είναι το τριπλάσιο της ενδείξεως) και με το βολτόμετρο και αμπερόμετρο τα U και I . Είναι τότε:

$$\sigma_{\text{υνφ}} = \frac{N_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}$$

8.18 Χρήσεις των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων.

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των δυο βασικών τύπων ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων καθορίζουν και τις χρήσεις για τις οποίες είναι κατάλληλος κάθε τύπος. Έτσι έχομε:

α) Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Ο κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα είναι ο πιο απλός στην κατασκευή και ο πιο φθηνός τριφασικός κινητήρας. Επίσης, απαιτεί ελάχιστη φροντίδα για συντήρηση, αφού δεν έχει ούτε συλλέκτη ούτε δακτυλίδια και συνεπώς ούτε ψήκτρες και ψηκτροθήκες. Για τους λόγους αυτούς, είναι μια από τις πιο πολύ χρησιμοποιούμενες ηλεκτρικές μηχανές. Χρησιμοποιείται παντού όπου ειδικοί λόγοι, όπως μεγάλη ροπή εκκινήσεως ή ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής κ.τ.λ. δεν επιβάλλουν τη χρησιμοποίηση άλλου τύπου κινητήρα.

Ο κινητήρας με απλό τύλιγμα κλωβού στο δρομέα χρησιμοποιείται στη μεγάλη ομάδα μηχανημάτων της βιομηχανίας, που αποτελούν οι ανεμιστήρες, αντλίες, συμπιεστές, μεταφορικές ταινίες κ.τ.λ. Η χρησιμοποίησή του βέβαια ενδείκνυται στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν μεγάλα φορτία αδράνειας και ο κινητήρας μπορεί να επιταχύνεται γρήγορα στην εκκίνηση.

Αν υπάρχει περιορισμός στο ρεύμα εκκινήσεως, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας ασύγχρονος κινητήρας με βαθιά αυλάκια στο δρομέα, ή ακόμα να χρησιμοποιηθεί κινητήρας με απλό τύλιγμα κλωβού που να ξεκινά με μειωμένη τάση, με μια από τις διατάξεις που αναφέραμε στην παράγραφο 8.9. Αν κανένας από τους δύο αυτούς τρόπους δεν δίνει ικανοποιητική ροπή εκκινήσεως, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας κινητήρας με διπλό τύλιγμα κλωβού. Ο κινητήρας αυτός με τη μεγάλη ροπή και το μικρό ρεύμα εκκινήσεως χρησιμοποιείται είτε με διάταξη για ελαπτώμένη τάση στην εκκίνηση είτε χωρίς.

β) Κινητήρας με δακτυλίδια.

Ο κινητήρας με δακτυλίδια είναι κατάλληλος για χρησιμοποίηση:

- σε μηχανήματα που έχουν μεγάλες τριβές στην εκκίνηση και συνεπώς χρειάζονται μεγάλη ροπή,
- σε περιπτώσεις όπου πρέπει να επιταχυνθούν βαριά φορτία, τα οποία έχουν σφονδύλους ή μεγάλη αδράνεια,
- όταν πρέπει να υπερνικηθεί η αντίθλιψη που δημιουργούν υγρά και αέρια σε αντλίες και συμπιεστές.

Στις παραπάνω περιπτώσεις δεν είναι κατάλληλος ο κινητήρας διπλού κλωβού, γιατί ο κινητήρας αυτός θα υπερθερμαίνοταν κατά το σημαντικό χρόνο που απαι-

τείται για να επιταχυνθούν τα φορτία αυτά μέχρι να αποκτήσουν την κανονική τους ταχύτητα.

Άλλο πεδίο εφαρμογών του κινητήρα με δακτυλίδια είναι οι περιπτώσεις που θέλουμε να έχομε ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής στη λειτουργία. Αυτό δεν είναι δυνατό με τους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα, ενώ στους κινητήρες με δακτυλίδια πραγματοποιείται εύκολα με αντιστάσεις στο δρομέα, όπως εξηγήσαμε στην παράγραφο 8.13. Αναφέραμε όμως εκεί ότι η μέθοδος αυτή είναι αντιοκονομική, γιατί ο βαθμός αποδόσεως του κινητήρα είναι τότε μικρός. Εφαρμογές αυτού έχομε σε γερανούς, ανυψωτές, ανελκυστήρες κ.τ.λ., όπου η λειτουργία δεν είναι συνεχής και ο βαθμός αποδόσεως δεν έχει μεγάλη σημασία.

Όπου χρειάζεται πολύ ομαλή εκκίνηση, χωρίς απότομα ξεκινήματα, χρησιμοποιούνται επίσης κινητήρες με δακτυλίδια. Έτσι ένα βαρύ φορτίο μπορεί να ξεκινά όσο θέλουμε σιγά και να επιταχύνεται ομαλά και ομοιόμορφα μέχρι την κανονική του ταχύτητα. Είναι απλώς θέμα εκλογής των κατάλληλων αντιστάσεων και του συστήματος ελέγχου του εκκινητή.

Τέλος, η χρησιμοποίηση του κινητήρα με δακτυλίδια επιβάλλεται μερικές φορές από την ανάγκη περιορισμού του ρεύματος εκκινήσεως, όταν αυτό το απαιτούν οι κανονισμοί. Π.χ. ένας κινητήρας με δακτυλίδια, για να αναπτύξει ροπή εκκινήσεως 1,5 φορές τη ροπή του κανονικού του φορτίου, με κατάλληλο εκκινητή απορροφά 1,5 φορές την ονομαστική του ένταση. Ένας κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα, για την ίδια ροπή θα ήθελε περίπου 6 φορές την ονομαστική του ένταση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ

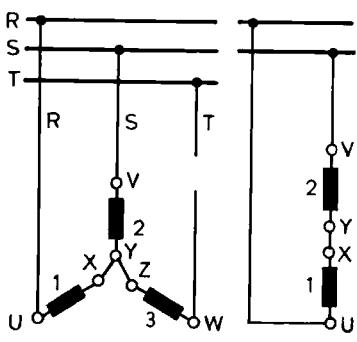
ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

9.1 Γενικά.

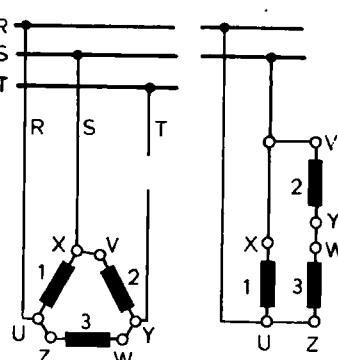
Αν σε ένα ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα, ο οποίος εργάζεται με μικρό φορτίο ή χωρίς φορτίο, διακοπεί ένας από τους τρεις τροφοδοτικούς αγωγούς, παρατηρούμε ότι ο κινητήρας εξακολουθεί να περιστρέφεται. Αν όμως σταματήσουμε τον κινητήρα και θελήσουμε πάλι να τον θέσουμε σε κίνηση, παρατηρούμε ότι δεν είναι δυνατό πια να ξεκινήσει μόνος του. Ο κινητήρας ξεκινά πάλι, αν με το χέρι ή με άλλο μέσο του δώσουμε περιστροφική ώθηση προς τη μια ή την άλλη κατεύθυνση. Παρατηρούμε επίσης, ότι τώρα ο κινητήρας στη λειτουργία του δεν μπορεί να αποδώσει όλη την ονομαστική του ισχύ, ούτε την αντίστοιχη ροπή.

Στο σχήμα 9.1α, το οποίο παριστάνει τις τρεις φάσεις του στάτη συνδεσμολογημένες σε αστέρα, έχει διακοπεί ο τροφοδοτικός αγωγός T. Άρα η φάση 3 είναι εκτός κυκλώματος. Οι άλλες δυο είναι τώρα σε σειρά, σαν μονοφασικό τύλιγμα. Στο σχήμα 9.1β, όπου οι τρεις φάσεις του στάτη είναι συνδεσμολογημένες σε τρίγωνο, μετά τη διακοπή του αγωγού T η φάση 3 δεν είναι εκτός κυκλώματος. Εδώ οι φάσεις 2 και 3 είναι σε σειρά και η φάση 1 βρίσκεται συνδεμένη παράλληλα προς αυτές. Τα τυλίγματα των τριών φάσεων αποτελούν πάλι όλα μαζί ένα μονοφασικό τύλιγμα.

Από όσα αναφέραμε στα προηγούμενα, βγαίνει το συμπέρασμα, ότι **ασύγχρονος κινητήρας με μονοφασικό τύλιγμα δεν μπορεί να ξεκινήσει μόνος του**. Αυτό οφείλεται στο ότι **το μονοφασικό τύλιγμα, δταν τροφοδοτείται με μονοφασικό ρεύμα**.



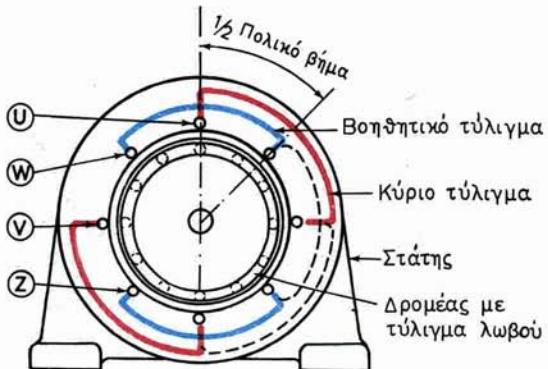
Σχ. 9.1α.



Σχ. 9.1β.

μα, δεν δημιουργεί μόνο του περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο, που δημιουργείται στην περίπτωση αυτή, είναι εναλλασσόμενο, δηλαδή πάλλεται με σταθερό προσανατολισμό. Όταν όμως με κάποιον άλλο τρόπο θέσομε σε κίνηση το μονοφασικό κινητήρα, τότε αυτός συνεχίζει να περιστρέφεται. Αυτό οφείλεται στο ότι δημιουργείται τώρα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με την επίδραση και του ρεύματος που κυκλοφορεί μέσα στους αγωγούς του δρομέα ή ακριβέστερα με την επίδραση και του μαγνητικού πεδίου, που δημιουργεί το ρεύμα αυτό.

Για να μπορούν λοιπόν οι μονοφασικοί κινητήρες να ξεκινούν μόνοι τους, πρέπει με κάποιο τρόπο να δημιουργήσουμε στη διάρκεια της εκκίνησεως περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια ενός δεύτερου τυλίγματος, το οποίο τοποθετείται στο στάτη του κινητήρα και ονομάζεται **βοηθητικό τύλιγμα ή βοηθητική φάση** για να το διακρίνουμε από το **κύριο τύλιγμα** του κινητήρα. Το βοηθητικό αυτό τύλιγμα είναι μετατοπισμένο κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες ($\frac{1}{2}$ πολικό βήμα) ως προς το κύριο τύλιγμα, όπως εξηγήσαμε στην παράγραφο 7.3 (σχ. 7.3ζ) και όπως φαίνεται παραστατικά στο σχήμα 9.1γ. Τα δυο τυλίγματα συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα και τροφοδοτούνται από το ίδιο μονοφασικό δίκτυο.

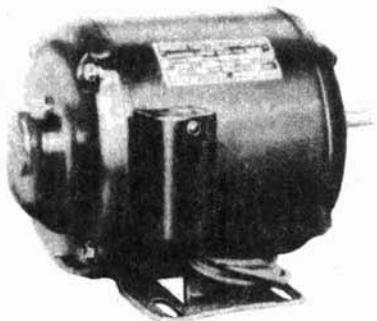


Σχ. 9.1γ.
Μονοφασικός κινητήρας με βοηθητικό τύλιγμα.

Για τη δημιουργία περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στην εκκίνηση δεν αρκεί το βοηθητικό τύλιγμα να είναι μετατοπισμένο, όπως είπαμε, σχετικά με το κύριο τύλιγμα, αλλά πρέπει και το ρεύμα που το διαρρέει να έχει **φασική απόκλιση**, ως προς το ρεύμα που διαρρέει το κύριο τύλιγμα. Αυτό το πετυχαίνουμε κυρίως με δύο τρόπους και αντίστοιχα έχουμε τους **μονοφασικούς κινητήρες αντιστάσεως** και τους **μονοφασικούς κινητήρες με πυκνωτή**.

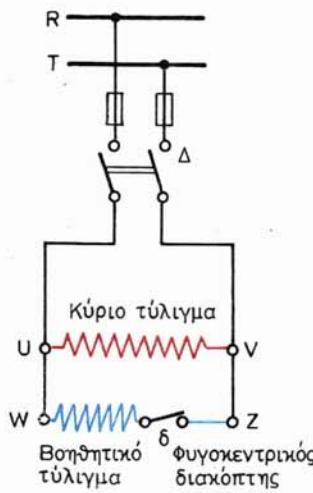
9.2 Μονοφασικοί κινητήρες αντιστάσεως.

Στους κινητήρες αυτούς (σχ. 9.2α), που είναι βασικά μικροί κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα απευθείας εκκίνησεως, το βοηθητικό τύλιγμα έχει μεγάλη αντίσταση. Αποτελείται δηλαδή από πολλές σπείρες λεπτού σύρματος και είναι συνδεσμολογημένο όπως φαίνεται στο σχήμα 9.2β. Σε ορισμένους κινητήρες σε σειρά με το βοηθητικό τύλιγμα υπάρχει και μια αωμική αντίσταση.



Σχ. 9.2α.

Μονοφασικός κινητήρας αντιστάσεως.



Σχ. 9.2β.

Ο διακόπτης δ που συνδέεται σε σειρά με το βοηθητικό τύλιγμα είναι ένας **φυγοκεντρικός διακόπτης** στερεωμένος στον άξονα του δρομέα. Με τη βοήθεια του διακόπτη αυτού το βοηθητικό τύλιγμα τίθεται εκτός κυκλώματος μετά την εκκίνηση, όταν δηλαδή ο κινητήρας αποκτήσει περίπου τα 80% της κανονικής ταχύτητας περιστροφής, οπότε εργάζεται πια μόνο με το κύριο τύλιγμα.

Για την αλλαγή της φοράς περιστροφής στο μονοφασικό κινητήρα μέ βοηθητικό τύλιγμα, πρέπει να αντιμεταθέσουμε τις συνδέσεις των δύο άκρων του βοηθητικού τυλίγματος με το κύριο τύλιγμα.

Οι μονοφασικοί κινητήρες αντιστάσεως έχουν μεγάλο πεδίο εφαρμογής ως κινητήρες μικρής ισχύος (μέχρι $1/2$ HP) για την κίνηση ανεμιστήρων, μηχανών γραφείου, συσκευών μουσικής, εργαλείων στιλβώσεως και λειάνσεως κτλ.

9.3 Μονοφασικοί κινητήρες με πυκνωτή.

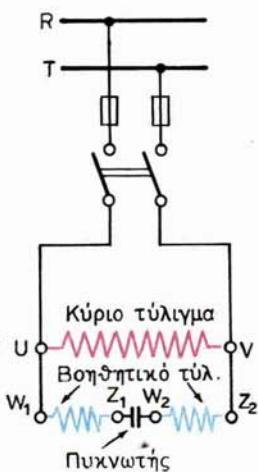
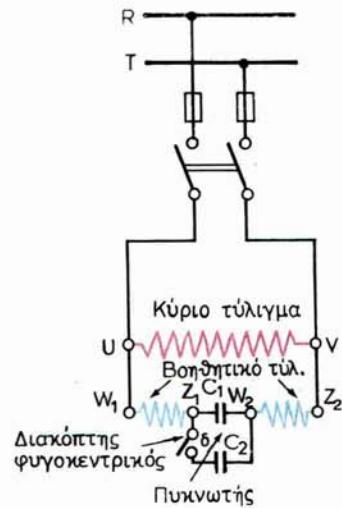
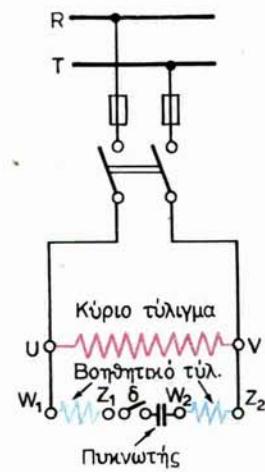
Είναι και αυτοί κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα και έχουν σε σειρά με το βοηθητικό τύλιγμα συνδεμένο ένα πυκνωτή (σχ. 9.3α). Ο πυκνωτής αυτός συντελεί ώστε το ρεύμα μέσα στο βοηθητικό τύλιγμα να προηγείται της τάσεως (χωρητική φόρτιση), ενώ το ρεύμα στο κύριο τύλιγμα ακολουθεί την τάση (επαγωγική φόρτιση). Έτσι τα δυο ρεύματα παρουσιάζουν μεταξύ τους σημαντική φασική απόκλιση, ώστε να δημιουργείται περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Οι μονοφασικοί κινητήρες με πυκνωτή χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερες ισχείς (μέχρι 1,5 kW) από ό,τι οι κινητήρες αντιστάσεως.

Στους κινητήρες με πυκνωτή η ροπή εκκινήσεως, για ορισμένη τάση τροδοφοτησεως, εξαρτάται από τη χωρητικότητα του πυκνωτή. Όταν αυξάνεται και η ροπή εκκινήσεως. Όταν απαιτείται ροπή εκκινήσεως 50% ως 70% της ονομαστικής ροπής, ο πυκνωτής και το βοηθητικό τύλιγμα μπορούν να παραμένουν συνδεμένα και στην κανονική λειτουργία του κινητήρα (σχ. 9.3β). Στις περιπτώσεις αυτές ο συντελεστής ισχύος του κινητήρα είναι περίπου ίσος με 1.

Όταν απαιτείται μεγάλη ροπή εκκινήσεως, π.χ. 2 ή $2\frac{1}{2}$ φορές μεγαλύτερη από



Σχ. 9.3α.
Μονοφασικός κινητήρας με πυκνωτή.

**Σχ. 9.3β.****Σχ. 9.3γ.****Σχ. 9.3δ.**

την ονομαστική ροπή, χρησιμοποιούνται δυο πυκνωτές (σχ. 9.3γ). Ο ένας είναι **πυκνωτής λειτουργίας** (C_1), δηλαδή παραμένει στο κύκλωμα κατά τη λειτουργία του κινητήρα συνδεμένος σε σειρά με το βοηθητικό κύκλωμα για να βελτιώνει το συντελεστή ισχύος του κινητήρα. Ο άλλος είναι **πυκνωτής εκκίνησεως** (C_2), δηλαδή τίθεται εκτός κυκλώματος μετά την εκκίνηση από το φυγοκεντρικό διακόπτη δ.

Τέλος υπάρχουν μονοφασικοί κινητήρες, στους οποίους τόσο το βοηθητικό τύλιγμα όσο και ο πυκνωτής που είναι σε σειρά με αυτό βγαίνουν εκτός κυκλώματος μετά την εκκίνηση του κινητήρα (σχ. 9.3δ).

Ως πυκνωτές εκκινήσεως είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και **ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές**. Πρέπει όμως να έχομε υπόψη μας, ότι αν για οποιοδήποτε λόγο δεν ανοίξει μετά την εκκίνηση ο φυγοκεντρικός διακόπτης, ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής θα καταστραφεί κατά τη λειτουργία του κινητήρα. Γι' αυτό είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούμε **πυκνωτές χάρτου**, είτε πρόκειται για πυκνωτές λειτουργίας είτε για πυκνωτές εκκινήσεως.

Η αλλαγή της φοράς περιστροφής σε κινητήρα με πυκνωτή γίνεται, όπως και στους κινητήρες αντιστάσεως, με αντιμετάθεση των δυο άκρων του βοηθητικού τυλίγματος στη σύνδεσή τους με το κύριο τύλιγμα.

9.4 Μονοφασικοί κινητήρες με βραχυκυκλωμένες σπείρες στο στάτη.

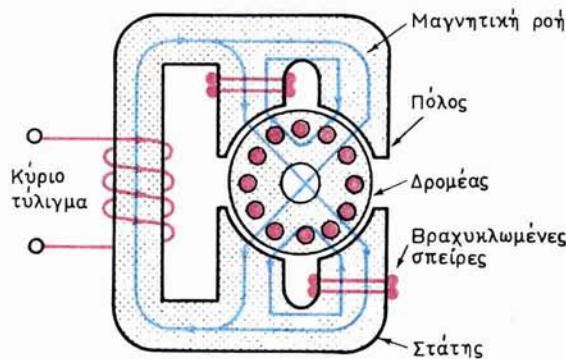
Οι κινητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται για πολύ μικρή ισχύ (π.χ. 30 W, σχ. 9.4α) και έχουν στάτη από μαγνητικά ελάσματα που σχηματίζουν πόλους. Οι πόλοι αυτοί διχάζονται σε δυο σκέλη, όπως δείχνει το σχήμα 9.4β. Στο ένα σκέλος έχουν τοποθετηθεί 2 έως 3 βραχυκυκλωμένες σπείρες από χονδρό σύρμα. Το κύριο τύλιγμα του στάτη αποτελείται είτε από ένα κυλινδρικό πηνίο σε κάθε πόλο είτε, στους διπολικούς κινητήρες, από ένα μόνο πηνίο, όπως το δείχνει το σχήμα 9.4β. Ο δρομέας φέρει τύλιγμα κλωβού.

Ένα ποσοστό της μαγνητικής ροής που δημιουργεί το κύριο τύλιγμα, περνά μέσα από τις βραχυκυκλωμένες σπείρες και δημιουργεί από επαγωγή μέσα σε αυτές εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο έχει σημαντική φασική απόκλιση ως προς το ρεύμα του κύριου τυλίγματος. Άρα δημιουργείται από αυτό δεύτερη εναλλασσόμενη μαγνητική ροή, η οποία έχει φασική απόκλιση ως προς τη μαγνητική ροή του κύριου τυλίγματος και είναι μετατοπισμένη ως προς αυτή. Έτσι δημιουργείται περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο θέτει σε κίνηση τον κινητήρα.

Οι κινητήρες αυτοί έχουν μικρό βαθμό αποδόσεως και χρησιμοποιούνται σε πολλές μικρές συσκευές, όπου ο βαθμός αποδόσεως δεν έχει σοβαρή σημασία, όπως οικιακές ηλεκτρικές συσκευές (π.χ. ανεμιστήρες, στεγνωτήρες μαλλιών κτλ.), όταν δεν απαιτούν μεγάλη ροπή εκκινήσεως. Είναι κινητήρες φθηνοί και δεν παρουσιάσουν τακτικά βλάβες.



Σχ. 9.4α.
Κινητήρας με βραχυκυκλωμένες σπείρες.



Σχ. 9.4β.

Η αλλαγή της φοράς περιστροφής στους κινητήρες με βραχυκυκλωμένες σπείρες δεν είναι γενικά τόσο εύκολη όσο στους άλλους μονοφασικούς κινητήρες που εξετάσαμε ήδη προηγουμένως. Σ' αυτούς χρειάζεται να αποσυναρμολογηθεί ο κινητήρας και να στραφεί μόνο ο στάτης κατά 180° , ώστε εκεί που ήταν το ένα άκρο του να πάει το άλλο, και να ξανασυναρμολογηθεί.

9.5 Ισχύς μονοφασικού κινητήρα.

Η ισχύς που δίνει στον άξονά του ο μονοφασικός κινητήρας είναι:

$$N = U \cdot I \cdot \eta \cdot \text{συνφ} \quad \text{σε W}$$

όπου: U είναι η τάση σε V του δικτύου τροφοδοτήσεως,

I η ένταση σε A , που απορροφά ο κινητήρας,

η ο βαθμός αποδόσεως και

συνφ ο συντελεστής ισχύος του κινητήρα.

Όπως και στους τριφασικούς κινητήρες, τα η και συνφ εξαρτώνται από το φορτίο του κινητήρα.

Από την παραπάνω σχέση προκύπτουν οι ακόλουθες:

$$I = \frac{N}{U \cdot \eta \cdot \text{συνφ}}$$

$$\text{συνφ} = \frac{N}{U \cdot I \cdot \eta}$$

$$\eta = \frac{N}{U \cdot I \cdot \text{συνφ}}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ

ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

10.1 Γενικά.

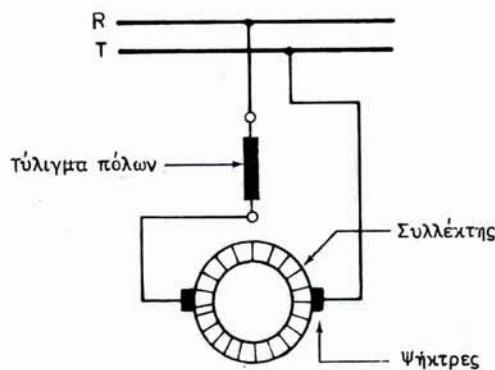
Τόσο οι σύγχρονοι όσο και οι ασύγχρονοι κινητήρες, τους οποίους εξετάσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, αν και έχουν πολύ καλά χαρακτηριστικά λειτουργίας, δεν είναι βασικά κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας. Το μειονέκτημα αυτό, το οποίο σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις αποτελεί λόγο αποκλεισμού των κινητήρων αυτών, καλύπτουν οι **κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος με συλλέκτη**. Οι κινητήρες αυτοί, εκτός από το ότι επιτρέπουν λεπτομερή ρύθμιση της ταχύτητας περιετροφής σε μεγάλα όρια, έχουν επίσης ικανοποιητική ροπή εκκινήσεως, ψηλό συντελεστή ισχύος και καλό βαθμό αποδόσεως.

Οι κινητήρες με συλλέκτη διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: Στους μονοφασικούς και στους τριφασικούς. Σε κάθε κατηγορία υπάρχουν πολλοί τύποι. Στο βιβλίο αυτό θα εξετάσουμε τους πιο συνηθισμένους. Συγκεκριμένα από τους μονοφασικούς κινητήρες με συλλέκτη θα εξετάσουμε: α) Τους **κινητήρες σειράς**, β) Τους **κινητήρες Γιουνιβέρσαλ**, που είναι μια παραλλαγή των κινητήρων σειράς και γ) τους **κινητήρες αντιδράσεως**. Από τους τριφασικούς κινητήρες με συλλέκτη θα εξετάσουμε: α) Τους **κινητήρες σειράς υψηλής και χαμηλής τάσεως**, β) τους **κινητήρες διακλαδώσεως με τροφοδότηση από το στάτη** και γ) τους **κινητήρες διακλαδώσεως με τροφοδότηση από το δρομέα**.

10.2 Μονοφασικοί κινητήρες σειράς.

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς (εδάφιο 4.5.3) το ίδιο ρεύμα περνά από το τύλιγμα των μαγνητικών πόλων και από το επαγωγικό τύμπανο με τη βοήθεια των ψηκτρών. Άρα, όταν σε ένα κινητήρα με διέγερση σειράς αλλαζόμε τη φορά του ρεύματος που τον τροφοδοτεί, η φορά περιστροφής του δεν αλλάζει, γιατί ταυτόχρονα αλλάζει και η φορά του μαγνητικού πεδίου και η φορά του ρεύματος μέσα στους αγωγούς του τυμπάνου (εδάφιο 2.2.2).

Από τα παραπάνω θα μπορούσε κανείς να συμπεράνει, ότι ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς είναι δυνατό να εργασθεί και όταν τροφοδοτείται με μονοφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα (σχ. 10.2a). Αυτό πραγματικά συμβαίνει, με τη παρατήρηση όμως ότι η λειτουργία του κινητήρα είναι κακή. Το εναλλασσόμενο ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας είναι μικρότερο από ό,τι το αντίστοιχο συνεχές ρεύμα με την ίδια τάση, η ροπή που αναπτύσσεται είναι μικρότερη, δημιουργούνται σπινθηρισμοί στο συλλέκτη και ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός αποδόσεως του κινητήρα δεν είναι καθόλου ικανοποιητικοί. Επίσης ο κινητήρας



Σχ. 10.2α.
Συνδεσμολογία μονοφασικού κινητήρα σειράς.

θερμαίνεται πάρα πολύ και ιδιαίτερα στους μαγνητικούς του πόλους.

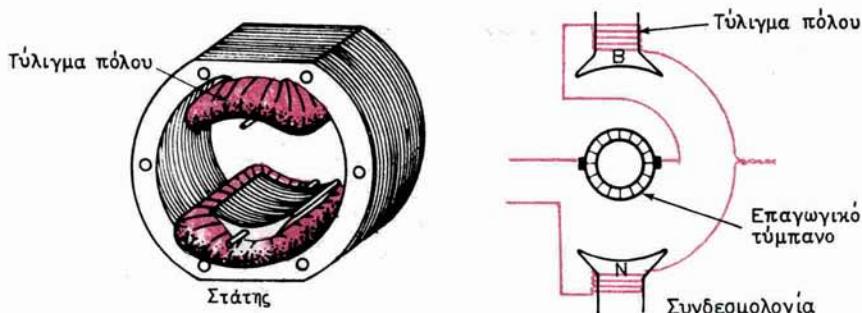
Όμως, με διαφορετική κατασκευαστική διαμόρφωση επιτυγχάνονται αρκετά καλά χαρακτηριστικά και κατά τη λειτουργία του κινητήρα με εναλλασσόμενο ρεύμα.

10.3 Κινητήρες Γιουνιβέρσαλ (Universal).

Οι κινητήρες αυτοί είναι μικροί μονοφασικοί κινητήρες σειράς (ισχύος μέχρι 500 W) με μαγνητικούς πόλους που προεξέχουν, όπως φαίνεται στο αριστερό μέρος του σχήματος 10.3α, και κατασκευάζονται για ταχύτητες λειτουργίας 3000 ως 8000 στρ./min.

Ο δρομέας των κινητήρων Γιουνιβέρσαλ είναι κατασκευασμένος όπως ο συνηθισμένος δρομέας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος με συλλέκτη. Στο δεξιό μέρος του σχήματος 10.3α φαίνεται η συνδεσμολογία κινητήρα αυτού του είδους.

Οι κινητήρες Γιουνιβέρσαλ έχουν ισχυρή ροπή εκκινήσεως. Η ταχύτητα περιστροφής τους εξαρτάται από το φορτίο, όπως σε όλους τους κινητήρες σειράς. Όταν αφαιρέσουμε τελείως το φορτίο, η ταχύτητα αυξάνεται πάρα πολύ και υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του κινητήρα. Για τη ρύθμιση των στροφών χρησιμο-



Σχ. 10.3α.

ποιούνται αντιστάσεις ή αυτομετασχηματιστές.

Οι μικροί κινητήρες Γιουνιβέρσαλ μπορούν να λειτουργήσουν τόσο με εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 25 ως 60 Hz, όσο και με συνεχές ρεύμα. Στη λειτουργία με συνεχές ρεύμα η ταχύτητα περιστροφής είναι 15% μεγαλύτερη. Στη λειτουργία με εναλλασσόμενο ρεύμα έχουν συντελεστή ισχύος μεταξύ 0,5 και 0,8.

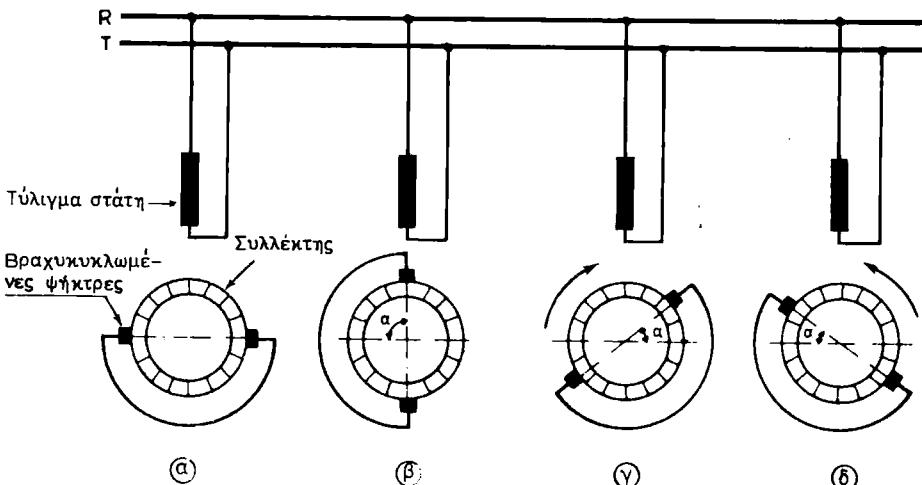
Οι κινητήρες Γιουνιβέρσαλ χρησιμοποιούνται πολύ σε μικρά εργαλεία, π.χ. σε ηλεκτρικά τρυπάνια, σε δισκοπρίονα, σε ανεμιστήρες, καθώς και σε οικιακές ηλεκτρικές συσκευές, όπως πλυντήρια, ψυγεία, ραπτομηχανές μηχανές προβολής κτλ.

10.4 Κινητήρες αντιδράσεως.

Οι κινητήρες αυτοί έχουν στάτη με μονοφασικό τύλιγμα εναλλασσόμενο ρεύματος και δρομέα με τύλιγμα συνεχούς ρεύματος, τα άκρα των ομάδων του οποίου συνδέονται στο συλλέκτη. Το τύλιγμα του στάτη συνδέεται στο δίκτυο τροφοδοτήσεως και παράγει εναλλασσόμενο (μη περιστρεφόμενο) μαγνητικό πεδίο. Το τύλιγμα του δρομέα δεν συνδέεται ηλεκτρικά ούτε με το τύλιγμα του στάτη ούτε με το δίκτυο ηλεκτροδοτήσεως.

Υπάρχουν αρκετοί τύποι κινητήρων αντιδράσεως. Σε ένα από αυτούς οι ψηκτρες, οι οποίες εφάπτονται στο συλλέκτη, είναι μεταξύ τους βραχυκυκλωμένες ανά δυο και είναι όλες στερεωμένες επάνω σε μηχανισμό, ο οποίος μας επιτρέπει με τη βοήθεια ενός χειροστρόφαλου να τις μεταθέτομε. Δηλαδή μπορούμε να μεταβάλλομε τη θέση τους επάνω στο συλλέκτη, αν στρέψουμε το μηχανισμό κατά τη μία ή την άλλη φορά.

Στο σχήμα 10.4a το διπολικό τύλιγμα του στάτη παριστάνεται με ένα πηνίο, του οποίου ο άξονας συμπίπτει με τον άξονα του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου ήπου δημιουργείται από το τύλιγμα. Όταν ο άξονας των δυο βραχυκυκλωμένων μεταξύ τους ψηκτρών συμπίπτει με την ουδέτερη ζώνη, όπως δείχνει το σχήμα στην



Σχ. 10.4a.
Κινητήρας αντιδράσεως.

περίπτωση (α) ή όταν συμπίπτει με τον άξονα του μαγνητικού πεδίου [περίπτωση (β) στο σχήμα], τότε δεν αναπτύσσεται ροπή στο δρομέα και ο κινητήρας δεν ξεκινά.

Όταν ο άξονας των ψηκτρών σχηματίζει με την ουδέτερη ζώνη γωνία α μεταξύ 0° και 90° , τότε ο κινητήρας ξεκινά και περιστρέφεται κατά τη μία ή την άλλη φορά [περίπτωση (γ) ή (δ) του σχήματος 10.4a].

Η ταχύτητα και η ροπή αυτού του κινητήρα αντιδράσεως εξαρτάται από τη γωνία μεταθέσεως των ψηκτρών του α. Όσο αυξάνομε (μέχρις ενός ορίου) τη γωνία α με το μηχανισμό που αναφέραμε, τόσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Συνεπώς ο κινητήρας αντιδράσεως έχει εύκολο τρόπο ρυθμίσεως της ταχύτητάς του. Επίσης εύκολη είναι στους κινητήρες αυτούς η αλλαγή της φοράς περιστροφής, η οποία πραγματοποιείται με τον ίδιο μηχανισμό, με περιστροφή του κειροστρόφαλου κατά την αντίθετη φορά.

Ο κινητήρας αντιδράσεως, για ορισμένη θέση των ψηκτρών, έχει χαρακτηριστικα λειτουργίας όπως αυτά του κινητήρα σειράς. Δηλαδή η ταχύτητα μεταβάλλεται σε μεγάλα όρια, όταν μεταβάλλεται το φορτίο. Επίσης στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι ενδεχόμενο να καταστραφεί ο κινητήρας από υπερβολική ταχύτητα περιστροφής. Στο κανονικό φορτίο είναι δυνατό να πετύχομε ρύθμιση στροφών, με τον τρόπο που αναφέραμε, μεταξύ 60% και 130% του ονομαστικού αριθμού στροφών.

10.5 Τριφασικοί κινητήρες σειράς.

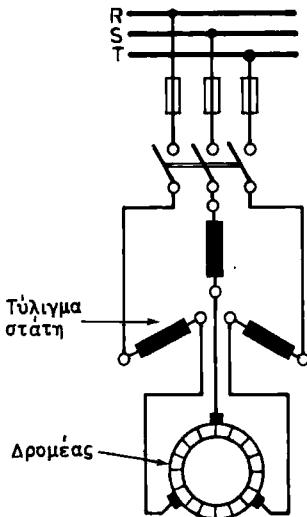
Οι κινητήρες αυτοί, που ανήκουν στην κατηγορία των τριφασικών κινητήρων με συλλέκτη, έχουν στάτη όμοιο ακριβώς με το στάτη ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα. Ο δρομέας τους όμως έχει τύλιγμα συνεχούς ρεύματος με τα άκρα των ομάδων συνδεμένα στους τομείς του συλλέκτη. Ο αριθμός των πόλων του τυλίγματος του στάτη είναι ο ίδιος με τον αριθμό των πόλων του τυλίγματος του δρομέα.

Επάνω στο συλλέκτη εφάπτονται τρεις ψήκτρες σε σημεία που ισαπέχουν μεταξύ τους, δηλαδή σε αποστάσεις 120° . Οι ψήκτρες αυτές είναι στερεωμένες σε ένα μηχανισμό που επιτρέπει τη μετάθεσή τους, όπως γίνεται και σε ορισμένους κινητήρες αντιδράσεως.

Τα άκρα του τυλίγματος κάθε φάσεως του στάτη συνδέονται με το δίκτυο και με μια από τις ψήκτρες, όπως δείχνει το σχήμα 10.5a. Δηλαδή έχομε σύνδεση σε σειρά των τριών φάσεων του στάτη με τις τρεις φάσεις του δρομέα, δεδομένου ότι το τύλιγμα του δρομέα μπορεί να θεωρηθεί σαν τριφασικό τύλιγμα συνδεσμολογημένο σε τρίγωνο.

Η αρχή λειτουργίας των κινητήρων αυτών είναι η εξής: 'Όταν ο στάτης τροφοδοτείται από το δίκτυο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο περιστρεφόμενο (παράγρ. 7.2) με σύγχρονη ταχύτητα $n_s = f/p$. Το τύλιγμα του δρομέα συνδεσμολογημένο, όπως αναφέραμε, σε σειρά με το τύλιγμα του στάτη, τροφοδοτείται και αυτό με τριφασικό ρεύμα της ίδιας συχνότητας f . Συνεπώς δημιουργεί με όμοιο τρόπο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα επίσης $n_s = f/p$, δεδομένου ότι το τύλιγμα αυτό έχει τον ίδιο αριθμό ζευγών πόλων p με το τύλιγμα του στάτη.'

'Όποια και αν είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, το τύλιγμα του συμπεριφέρεται πάντοτε από την άποψη του μαγνητικού πεδίου, σαν να ήταν ακίνητο



Σχ. 10.5α.

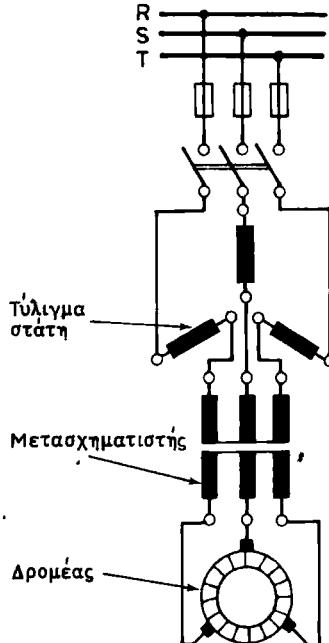
Τριφασικός κινητήρας σειράς χαμηλής τάσεως. Τριφασικός κινητήρας σειράς υψηλής τάσεως.

στο χώρο, και το μαγνητικό πεδίο που παράγει περιστρέφεται πάντοτε με τη σύγχρονη ταχύτητα n_s . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διανομή του ρεύματος μέσα στους αγωγούς του τυλίγματος του δρομέα γίνεται με το συλλέκτη από τις ακίνητες (μη περιστρεφόμενες) ψήκτρες.

Άρα τα περιστρεφόμενα μαγνητικά πεδία του στάτη και του δρομέα έχουν την ίδια γωνιακή ταχύτητα και όταν είναι «σε φάση» στο χώρο, δηλαδή το ένα ακριβώς απέναντι στο άλλο, δεν ασκείται καμιά ροπή στο δρομέα. Αν όμως με το μηχανισμό μεταθέσομε τις ψήκτρες κατά μία ορισμένη γωνία, δημιουργείται αντίστοιχη φασική απόκλιση στο χώρο μεταξύ των δύο μαγνητικών πεδίων, τα οποία με τη μεταξύ τους αντίδραση ασκούν ροπή στο δρομέα με **φορά αντίθετη της μεταθέσεως των ψηκτρών**. Αν η ανθιστάμενη ροπή του φορτίου είναι μικρότερη από τη ροπή αυτή ο κινητήρας θα ξεκινήσει.

Επειδή στη λειτουργία του ο κινητήρας περιστρέφεται με φορά που συμπίπτει με τη φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων, γί' αυτό η μετάθεση των ψηκτρών γίνεται πάντοτε κατά φορά αντίθετη από τη φορά περιστροφής του κινητήρα. Αν θέλομε να αλλάξουμε τη φορά περιστροφής του κινητήρα, όπως και στους ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες, αντιμεταθέτομε δύο από τους τροφοδοτικούς αγωγούς για να αλλάζει η φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων, και κάνομε μετάθεση στις ψήκτρες αντίθετη από ότι ήταν προηγούμενα.

Η μέγιστη ροπή του κινητήρα πετυχαίνεται, όταν η μετάθεση των ψηκτρών είναι ίση περίπου με 90 ηλεκτρικές μοίρες. Αυτό είναι και το όριο, μέχρι το οποίο είναι επιτρεπτή η μετάθεση των ψηκτρών.



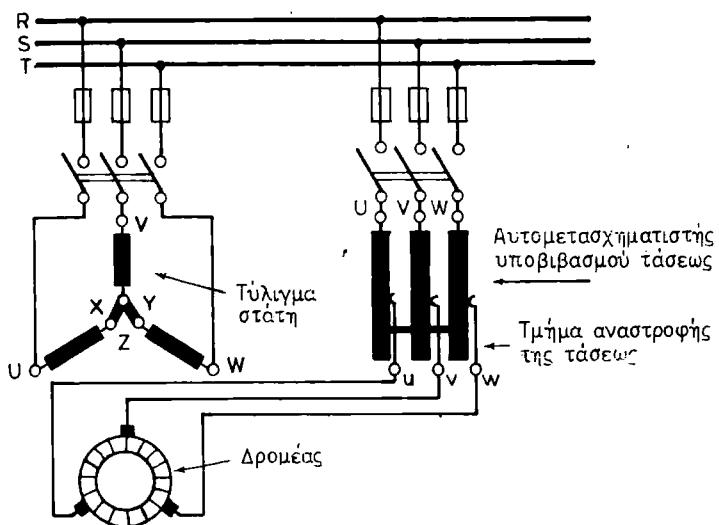
Σχ. 10.5β.

10.6 Τριφασικοί κινητήρες διακλαδώσεως, με τροφοδότηση από το στάτη.

Οι τριφασικοί κινητήρες διακλαδώσεως, που είναι και αυτοί κινητήρες με συλλέκτη, ονομάσθηκαν έτσι γιατί έχουν χαρακτηριστικά όπως των κινητήρων συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση (διακλάδωση). Ταυτόχρονα έχουν τη δυνατότητα ρυθμίσεως της ταχύτητας σε μεγάλα όρια.

Στους τριφασικούς κινητήρες, με τροφοδότηση από το στάτη, το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτείται απευθείας από το δίκτυο. Το τύλιγμα του δρομέα τροφοδοτείται ειπίσης από το δίκτυο με την παρεμβολή ενός μετασχηματιστή ή αυτομετασχηματιστή για τον υποβιβασμό της τάσεως, όπως δείχνει το σχήμα 10.6.

Η αρχή της λειτουργίας των κινητήρων αυτών είναι η ίδια με τους τριφασικούς κινητήρες σειράς.

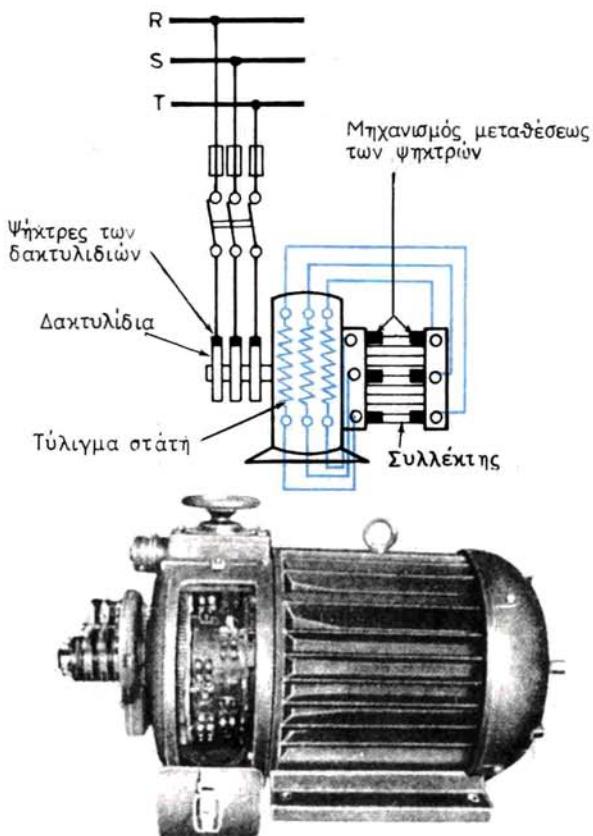


Σχ. 10.6.

Τριφασικός κινητήρας διακλαδώσεως με τροφοδότηση από το στάτη.

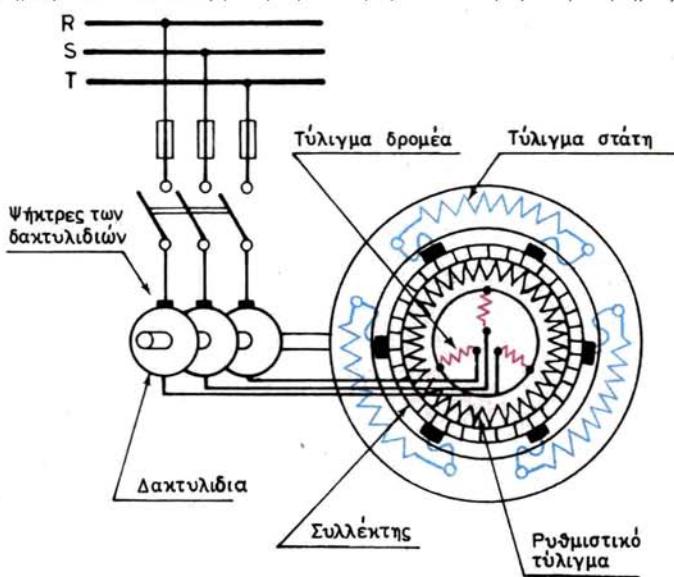
10.7 Τριφασικοί κινητήρες διακλαδώσεως με τροφοδότηση από το δρομέα.

Η γενική διάταξη των κινητήρων αυτών, που ονομάζονται και **κινητήρες Schrage**, από το όνομα του εφευρέτη τους, φαίνεται στο σχήμα 10.7a. Όπως παρατηρούμε, αντίθετα από ότι συμβαίνει με όλους του υπόλοιπους κινητήρες, εδώ η τροφοδότηση από το δίκτυο γίνεται στο δρομέα του κινητήρα μέσω τριών δακτυλίδιών. Στα δακτυλίδια αυτά είναι συνδεμένα τα τρία άκρα τριφασικού τυλίγματος που είναι τοποθετημένο στις οδοντώσεις του δρομέα. Μέσα στις οδοντώσεις αυτές υπάρχει τοποθετημένο και δεύτερο τύλιγμα, το **ρυθμιστικό τύλιγμα**, το οποίο συνδέεται με τους τομείς του συλλέκτη, όπως το τύλιγμα του επαγγελματικού τυμπάνου σε ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Το σχήμα 10.7b δίνει το διάγραμμα της συνδεσμολογίας των τυλιγμάτων σε ένα κινητήρα διακλαδώσεως με τροφοδότηση από το δρομέα.



Σχ. 10.7α.

Τριφασικός κινητήρας διακλαδώσεως με τροφοδότηση από το δρομέα (κινητήρας Schrage).



Σχ. 10.7β.

Τυλίγματα κινητήρα διακλαδώσεως με τροφοδότηση από το δρομέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΔΕΚΑΤΟ

ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ – ΑΝΟΡΘΩΤΕΣ

11.1 Γενικά.

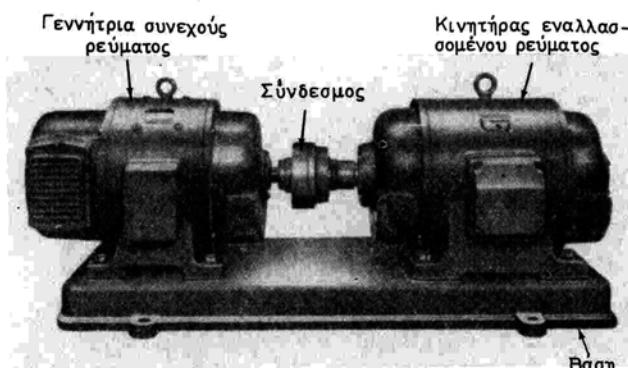
Η πρόοδος στην τεχνολογία που συνδέεται με την ηλεκτρική ενέργεια, όπως αναφέραμε, οδήγησε στην αποκλειστική χρησιμοποίηση του εναλλασσόμενου ρεύματος στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις, στις οποίες για ορισμένες χρήσεις είναι απαραίτητο να έχουμε ηλεκτρική ενέργεια με μορφή συνεχούς ρεύματος. Στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να μετατρέπομε το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές.

Παλιότερα η μετατροπή αυτή γινόταν με τη βοήθεια **ζευγών κινητήρα - γεννήτριας, στρεφομένων μετατροπέων ή μετατροπέων με μηχανικές επαφές**. Η επινόηση όμως των **ανορθωτών υδραργύρου** και στη συνέχεια **των ξηρών ανορθωτών**, με τη χρησιμοποίηση **των ημιαγωγών από υποξείδιο του χαλκού** ή από **σελίνιο** και τινιν ακόμη νεώτερων από **γερμάνιο** ή **πυρίτιο**, οδήγησε σιγά-σιγά στην εγκατάλειψη, εκτός από πολύ λίγες περιπτώσεις, των ζευγών και των μετατροπέων.

Στα επόμενα θα δώσουμε, πολύ σύντομα, την περιγραφή των ζευγών κινητήρα-γεννήτριας και των στρεφομένων μετατροπέων. Στη συνέχεια θα μας απασχολήσουν οι **ανορθωτές** με ημιαγωγούς που κυρίως χρησιμοποιούνται σήμερα.

11.2 Ζεύγος κινητήρα-γεννήτριας.

Το ζεύγος κινητήρα-γεννήτριας αποτελείται από ένα κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος, ο οποίος είναι μηχανικά συνδεμένος με μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (σχ. 11.2), την οποία και κινεί. Δηλαδή εδώ η ηλεκτρική ενέργεια του εναλλασ-



Σχ. 11.2.
Ζεύγος κινητήρα-γεννήτριας.

σόδιενου ρεύματος μετατρέπεται από τον κινητήρα σε μηχανική, για να μετατραπεί στη συνέχεια από τη γεννήτρια σε ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος.

Αν η ισχύς του συνεχούς ρεύματος που χρειαζόμαστε είναι μικρή, ο κινητήρας είναι συνήθως μια ασύγχρονη μηχανή, η οποία, αν υπάρχουν απότομες μεταβολές του φορτίου συνεχούς ρεύματος, εφοδιάζεται και με σφόνδυλο. Αν η ισχύς είναι μεγαλη, χρησιμοποιούμε συνήθως σύγχρονο κινητήρα, ο οποίος έχει μεγαλύτερο βαθμό αποδόσεως και επιτρέπει τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος όλης της εγκαταστάσεως, όπως εξηγήσαμε στην παράγραφο 7.8.

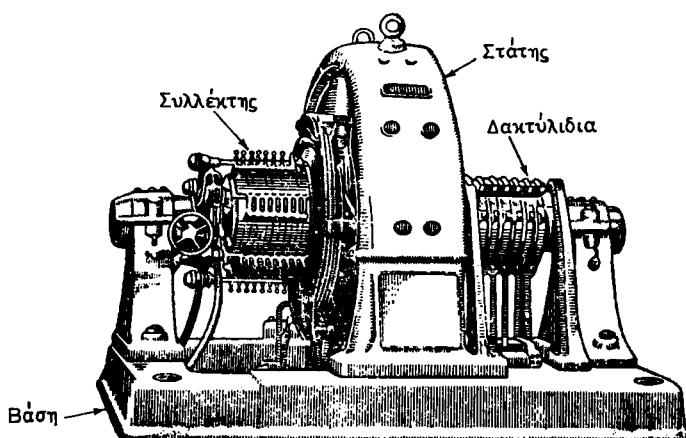
Γο κυριο μειονέκτημα του ζεύγους κινητήρα-γεννήτριας είναι ο χαμηλός ολικός βαθμός αποδόσεώς του, ο οποίος είναι γινόμενο του βαθμού αποδόσεως η_k του κινητήρα επί το βαθμό αποδόσεως η_f της γεννήτριας. Π.χ. αν $\eta_k = \eta_f = 0,90$ είναι:

$$\eta = \eta_k \cdot \eta_f = 0,90 \times 0,90 = 0,81 \quad \text{ή} \quad 81\%$$

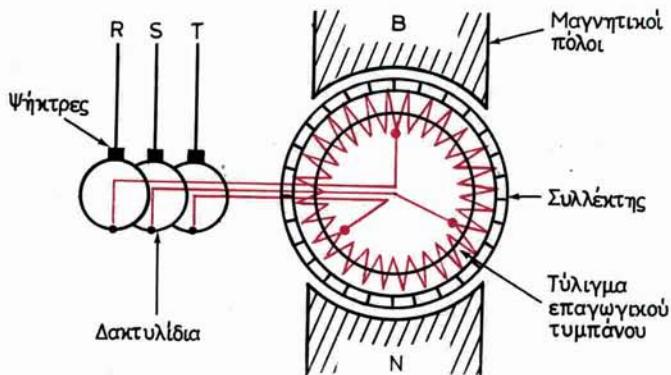
11.3 Στρεφόμενος μετατροπέας.

Ο στρεφόμενος μετατροπέας, ο οποίος ονομάζεται και **μεταλλάκτης** (commutatrice), είναι ηλεκτρική μηχανή που μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα απευθείας σε συνεχές, δηλαδή χωρίς τη μεσολάβηση της μηχανικής ενέργειας, αλλά και το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Για το λόγο αυτό έχει καλύτερο βαθμό αποδόσεως από το ζεύγος κινητήρα-γεννήτριας της ίδιας ισχύος.

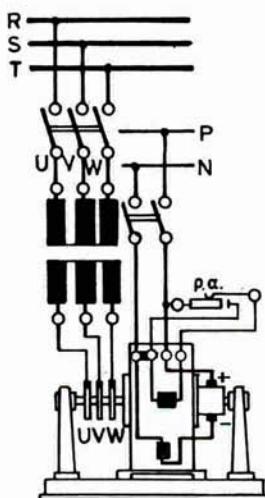
Ο στρεφόμενος μετατροπέας είναι βασικά μηχανή συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση, η οποία όμως στην πλευρά του επαγγειού τυμπάνου, που δεν βρίσκεται ο συλλέκτης, φέρει στον άξονα δακτυλίδια για τη σύνδεση με το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος (σχ. 11.3α). Ο αριθμός των δακτυλίδιών εξαρτάται από τον αριθμό των φάσεων του εναλλασσόμενου ρεύματος, το οποίο πρόκειται να μετατραπεί σε συνεχές. Για μονοφασικό ρεύμα χρειάζονται δυο δακτυλίδια, για τριφασικό τρία και για εξαφασικό έξι. Το σχήμα 11.3β δείχνει διαγραμματικά τη



Σχ. 11.3α.
Στρεφόμενος μετατροπέας.



Σχ. 11.3β.
Τύλιγμα τριφασικού στρεφόμενου μετατροπέα.



Σχ. 11.3γ.
Συνδεσμολογία τριφασικού στρεφόμενου μετατροπέα.

σύνδεση των δακτυλιδίων τριφασικού μετατροπέα με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου, η οποία πραγματοποιείται σε τρία ισαπέχοντα σημεία. Όταν ο μετατροπέας δεν είναι διπολικός όπως στο σχήμα, τότε η σύνδεση γίνεται σε σημεία που απέχουν μεταξύ τους κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες.

Κατά τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές, ο στρεφόμενος μετατροπέας παίρνει το εναλλασσόμενο ρεύμα από τα δακτυλίδια και δίνει το συνεχές ρεύμα από το συλλέκτη. Ο μετατροπέας λειτουργεί τότε σαν σύγχρονος κινητήρας για την πλευρά του εναλλασσόμενου ρεύματος και σαν γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, για την πλευρά του συνεχούς ρεύματος. Στο σχήμα 11.3γ φαίνεται η συνδεσμολογία ενός τριφασικού στρεφόμενου μετατροπέα. Η εκκίνηση του στρεφομενου μετατροπέα στις περιπτώσεις αυτές γίνεται με ένα από τους γνωστούς τρόπους εκκινήσεως των σύγχρονων κινητήρων (παράγρ. 7.6).

Οι στρεφόμενοι μετατροπείς χρησιμοποιούνται επίσης για τη μετατροπή συνέχους ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Στην περίπτωση αυτή ο μετατροπέας λειτουργεί σαν κινητήρας με παράλληλη διέγερση για την πλευρά του συνεχούς ρεύματος και σαν εναλλακτήρας για την πλευρά του εναλλασσόμενου ρεύματος. Συνεπώς πρέπει να γίνει συγχρονισμός πριν από τη σύνδεση στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος, αν πρόκειται να εργασθεί παράλληλα με άλλες μηχανές.

11.4 Ανορθωτικά στοιχεία - Ηλεκτρική βαλβίδα.

Για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συγνεχές χρησιμοποιούμε σήμερα σχέδιόν αποκλειστικά τους ανορθωτές, που είναι και αυτοί ηλεκτρικές μηχανές χωρίς όμως περιστρεφόμενα μέρη. Στους ανορθωτές βασικό μέρος αποτελούν τα ονομαζόμενα **ανορθωτικά στοιχεία**, τα οποία έχουν τη χαρακτηριστική ιδιότητα **να μη παρουσιάζουν την ίδια αντίσταση στη διέλευση του ρεύματος κατά την μια φορά και κατά την αντίθετη**. Δηλαδή παρουσιάζουν ιδιότητες **ηλεκτρικής βαλβίδας**, όπως λέμε.

Το σχήμα 11.4 δίνει τη συμβολική παράσταση ηλεκτρικής βαλβίδας. Κατά τη φορά από την **άνοδο A** προς την **κάθοδο K**, η αντίσταση R_{AK} είναι πολύ μικρή και μπορεί να ληφθεί ίση με το μηδέν. Άρα ρεύμα (i) μπορεί να περάσει κατά τη φορά αυτή, που λαμβάνεται και σαν θετική φορά των εντάσεων και των τάσεων. Κατά την αντίθετη φορά, δηλαδή από την κάθοδο προς την άνοδο, η αντίσταση R_{KA} είναι πολύ μεγάλη και μπορεί να ληφθεί άπειρη. Άρα ρεύμα δεν μπορεί να περάσει από την ηλεκτρική βαλβίδα κατά τη φορά αυτή. Δηλαδή, αν εφαρμοσθεί αρνητική τάση μεταξύ των ηλεκτραδίων της βαλβίδας, η ένταση θα είναι ίση με μηδέν.

Στην πράξη η αντίσταση R_{KA} ποτέ δεν είναι ίση με μηδέν. Συνεπώς κατά τη διέλευση του ρεύματος από τη βαλβίδα έχουμε κάποια πτώση τάσεως μέσα σ' αυτή



Σχ. 11.4.
Ηλεκτρική βαλβίδα.

η οποία εξαρτάται από το είδος της βαλβίδας. Επίσης η R_{KA} δεν είναι ποτέ άπειρη και σε ορισμένα είδη βαλβίδων υπάρχει πάντοτε στη λειτουργία μία αρνητική ένταση, η οποία βέβαια δεν είναι σημαντική όπως θα δούμε σε άλλη παράγραφο.

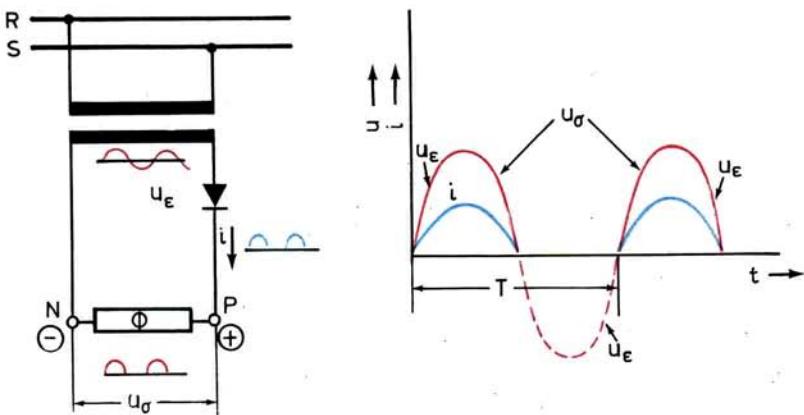
Στα επόμενα θα περιγράψουμε τις ηλεκτρικές βαλβίδες, που χρησιμοποιούνται στους ανορθωτές, αφού πρώτα δώσομε μία σύντομη περιγραφή των **ανορθωτικών διατάξεων**, δηλαδή των συνδεσμολογιών που χρησιμοποιούνται, ανεξάρτητα από το είδος των ηλεκτρικών βαλβίδων.

11.5 Ανορθωτικές διατάξεις μονοφασικές.

a) Ανόρθωση μισού κύματος.

Η απλούστερη μορφή ανορθωτικού κυκλώματος είναι αυτή που δείχνει το αριστερό μέρος του σχήματος 11.5a. Από το δευτερεύον μονοφασικό μετασχηματιστή τροφοδοτείται με ημιτονοειδή τάση u_x το κύκλωμα, το οποίο περιλαμβάνει τον καταναλωτή Φ και σε σειρά μ' αυτόν μία ηλεκτρική βαλβίδα. Το ρεύμα i στις

Θετικές ημιπεριόδους της τάσεως θα έχει και αυτό ημιτονοειδή μορφή και μάλιστα θα είναι σε φάση με την τάση, αν το φορτίο Φ είναι ωμική αντίσταση. Στη διάρκεια των αρνητικών ημιπεριόδων της τάσεως δεν θα κυκλοφορεί ρεύμα στο κύκλωμα. Άρα η μορφή που θα έχει το ρεύμα που περνά από το φορτίο είναι αυτή που φαίνεται στο δεξιό μέρος του σχήματος 11.5a. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται **ανορθωμένο ρεύμα**.



Σχ. 11.5a.

Μονοφασική ανόρθωση μισού κύματος.

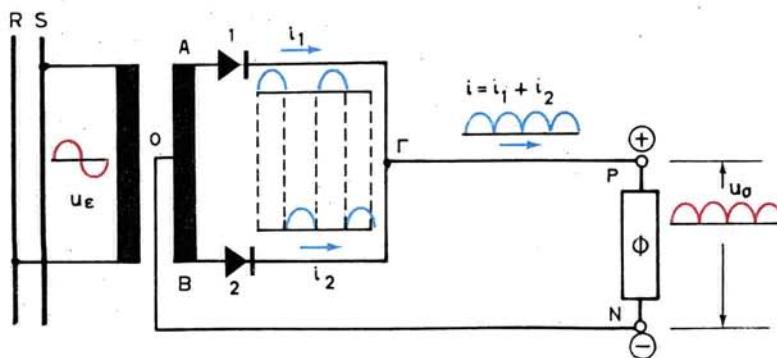
Συνεπώς μόνο από τις θετικές ημιπεριόδους της τάσεως θα αποτελείται και η τάση u_σ , που εφαρμόζεται στα άκρα του καταναλωτή Φ , όπως φαίνεται στο δεξιό μέρος του σχήματος, και που ονομάζεται και αυτή **ανορθωμένη τάση**. Η ηλεκτρική βαλβίδα θεωρείται εδώ για λόγους απλότητας ότι έχει $R_{AK} = 0$ και R_{KA} άπειρη.

Η ανόρθωση που περιγράψαμε ονομάζεται **ανόρθωση μισού κύματος**, γιατί, όπως είδαμε, χρησιμοποιούνται μόνο οι μισές (οι θετικές) ημιπερίοδοι του εναλλασσόμενου ρεύματος. Δηλαδή με την ανόρθωση μισού κύματος πετυχαίνομε, ώστε το ρεύμα, που διέρχεται μέσα από τον καταναλωτή, να έχει πάντοτε τήν ίδια φορά. Η ανορθωτική αυτή διάταξη χρησιμοποιείται για πολύ μικρές εντάσεις ρεύματος και όταν δεν μας ενδιαφέρει **η κυμάτωση** του ανορθωμένου ρεύματος.

β) Ανόρθωση πλήρους κύματος.

Στο σχήμα 11.5β φαίνεται μια άλλη διάταξη με δυο ηλεκτρικές βαλβίδες, με την οποία πετυχαίνομε **ανόρθωση πλήρους κύματος**. Εδώ ο μετασχηματιστής έχει στο δευτερεύον του τη μεσαία λήψη Ο, η οποία αποτελεί τον ένα πόλο τροφοδοτήσεως του καταναλωτή. Ο άλλος πόλος προέρχεται από το σημείο Γ όπου ενώνονται οι δύο κάθοδοι των ηλεκτρικών βαλβίδων.

Με τη διάταξη αυτή πετυχαίνομε, ώστε στη μία ημιπερίοδο της εναλλασσόμενης τάσεως του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή το ρεύμα i_1 να διέρχεται από την ηλεκτρική βαλβίδα 1 μέσω του κυκλώματος ΟΑΓΡΝΟ. Στην επόμενη ημιπερίοδο το ρεύμα i_2 διέρχεται από τη βαλβίδα 2 μέσω του κυκλώματος ΟΒΓΡΝΟ. Από τον καταναλωτή περνά το άθροισμα των ρευμάτων i_1 και i_2 , το οποίο παριστάνεται με μια καμπύλη, σαν αυτή που φαίνεται στο σχήμα 11.5β. Το ανορθωμένο ρεύμα



Σχ. 11.5β.

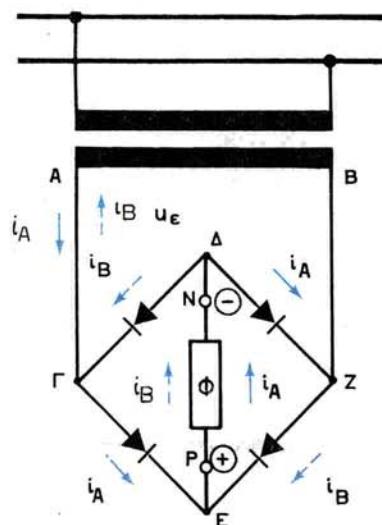
Μονοφασική ανόρθωση πλήρους κύματος.

είναι στην περίπτωση αυτή **κυματόρρευσμα**. Την ίδια μορφή έχει και η τάση u_σ που εφαρμόζεται στον καταναλωτή Φ .

Παρατηρούμε ότι σέ κάθε ημιπερίοδο γίνεται χρήση της τάσεως, που παράγει το μισό του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Δηλαδή δεν γίνεται πλήρης εκμετάλλευση του μετασχηματιστή και γι' αυτό το λόγο η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται μόνο για μικρές τάσεις.

γ) Διάταξη μονοφασικής γέφυρας.

Άλλη ανορθωτική διάταξη πλήρους ανορθώσεως, η οποία δεν έχει ανάγκη από μεσαία λήψη στὸ μετασχηματιστή τροφοδοτήσεως και η οποία αξιοποιεί πλήρως το μετασχηματιστή, είναι η ονομαζόμενή **διάταξη γέφυρας** (σχ. 11.5γ). Η διάταξη αυτή έχει τέσσερις ηλεκτρικές βαλβίδες, αντί για δυο που είχε η προηγούμενη διά-



Σχ. 11.5γ.

Ανορθωτική διάταξη μονοφασικής γέφυρας.

ταξη, με συνέπεια να έχομε αύξηση των απωλειών μέσα στον ανορθωτή. Σε κάθε βαλβίδα εφαρμόζεται το μισό της ολικής τάσεως.

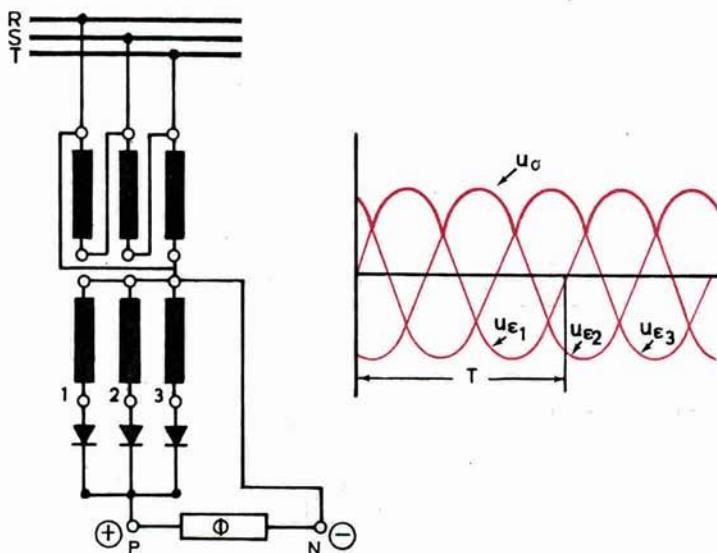
Το ρεύμα στη μια ημιπερίοδο της τάσεως (i_A) ακολουθεί το κύκλωμα ΑΓΕΡΝΔΖΒ και στην άλλη (i_B) το κύκλωμα ΒΖΕΡΝΔΓΑ. Το ρεύμα δηλαδή μέσα από τον καταναλωτή και κατά τις δυο ημιπεριόδους περνά με την ίδια φορά.

Σημειώνομε εδώ ότι ένας τρόπος για να πετύχουμε ρύθμιση της τάσεως του ανορθωμένου ρεύματος σε μια διάταξη ανορθώσεως, είναι να έχει ο μετασχηματιστής τροφοδοτήσεως λήψεις στο δευτερεύον του.

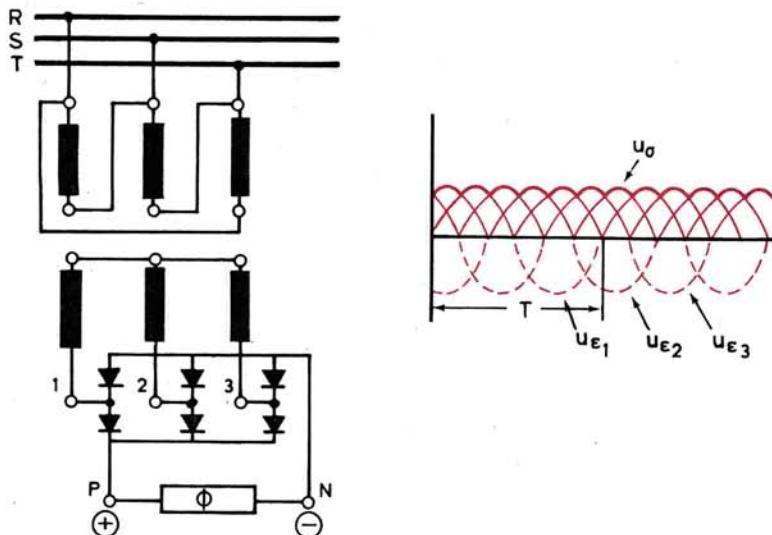
11.6 Ανορθωτικές διατάξεις τριφασικές.

Όταν χρειαζόμαστε μεγάλη ισχύ κάνουμε ανόρθωση τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος με μια διάταξη, όπως αυτή του σχήματος 11.6α. Με τη διάταξη αυτή, σε κάθε στιγμή, ρεύμα διέρχεται μόνο από τη βαλβίδα εκείνη, της οποίας η άνοδος είναι συνδεμένη με τη φάση, που έχει τη μεγαλύτερη θετική τάση. Δηλαδή η ανορθωμένη τάση u_σ μεταξύ των άκρων του καταναλωτή θα μεταβάλλεται, όπως δείχνει η καμπύλη στο δεξιό μέρος του σχήματος 11.6α. Παρατηρούμε, ότι η u_σ αποτελείται από τις κορυφές των θετικών ημιπεριόδων των τριών φασικών τάσεων u_{ϵ_1} , u_{ϵ_2} , u_{ϵ_3} του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή.

Εκτός από την απλή τριφασική ανόρθωση, υπάρχει και η **διάταξη ανορθώσεως τριφασικής γέφυρας** (σχ. 11.6β). Σ αυτή δεν χρειάζεται ουδέτερος κόμβος του μετασχηματιστή και γι' αυτό το δευτερεύον του μπορεί να είναι συνδεσμολογημένο σε αστέρα ή σε τρίγωνο. Με τη διάταξη της τριφασικής γέφυρας ανορθώνονται και οι δυο ημιπεριόδοι κάθε φάσεως του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Δηλαδή είναι αντίστοιχη με την ανόρθωση πλήρους κύματος των μονοφασικών διατάξεων.



Σχ. 11.6α.
Διάταξη απλής τριφασικής ανορθώσεως.



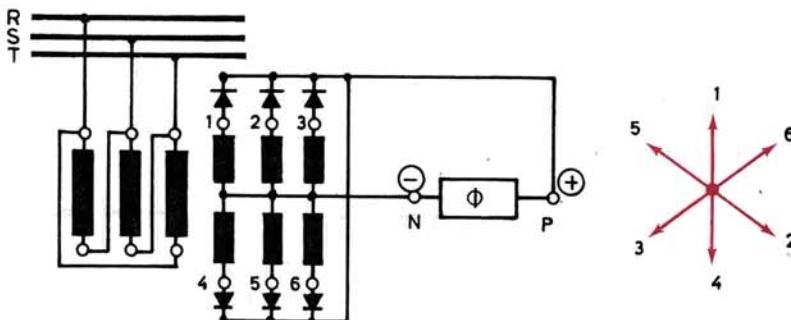
Σχ. 11.6β.

Διάταξη ανορθώσεως τριφασικής γέφυρας.

Ετσι ελαττώνεται σημαντικά η κυμάτωση στην ανορθωμένη τάση, όπως φαίνεται στο δεξιό μέρος του σχήματος 11.6β. Το ανορθωμένο ρεύμα είναι τώρα πολύ πιο ομαλό και συνεπώς πλησιάζει στο συνεχές ρεύμα, δηλαδή σε ρεύμα με σταθερή τάση.

Στην περίπτωση της απλής τριφασικής ανορθώσεως, ο αριθμός των κυμάτων σε μια περίοδο T είναι ίσος με τον αριθμό των φάσεων, δηλαδή με τρία. Στην περίπτωση της τριφασικής γέφυρας είναι ίσος με το διπλάσιο του αριθμού των φάσεων, δηλαδή με έξι.

Μια άλλη διάταξη που δίνει ανορθωμένο ρεύμα της ίδιας ακριβώς μορφής με τη διάταξη τριφασικής γέφυρας είναι η **εξαφασική ανορθωτική διάταξη** (σχ. 11.6γ), η οποία τροφοδοτείται από τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος. Το δευτερεύον του μετασχηματιστή έχει σε κάθε κορμό δυο τυλίγματα. Τα έξι αυτά τυλί-



Σχ. 11.6γ.

Διάταξη εξαφασικής ανορθώσεως.

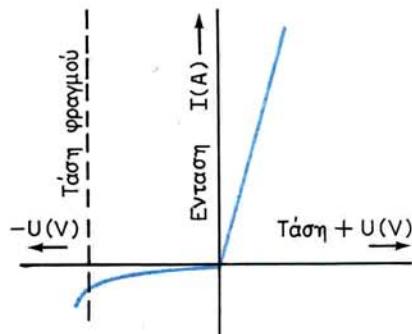
γιατί συνδεσμολογούνται μεταξύ τους σε δυο αντίστροφους αστέρες με κοινό κομβό, όπως δείχνει το σχήμα 11.6γ. Έτσι τα διανύσματα των φασικών τάσεων του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή έχουν μεταξύ τους φασική πόλιση 360 : 6 - 60 ηλεκτρικές μοίρες, όπως φαίνεται και στο δεξιό μέρος του ίδιου σχήματος.

11.7 Ανορθωτές με ημιαγωγούς.

Στους ανορθωτές αυτούς, οι οποίοι ονομάζονται και **ξηροί ανορθωτές**, χρησιμοποιούνται ανορθωτικά στοιχεία (ηλεκτρικές βαλβίδες) από ημιαγωγούς. Στοιχεία αυτού του είδους είναι τα στοιχεία υποξειδίου του χαλκού, σελήνιου, γερμανίου και πυριτίου. Οι ανορθωτές με στοιχεία υποξειδίου του χαλκού χρησιμοποιούνται σήμερα μόνο σαν ανορθωτές οργάνων μετρήσεως και δεν θα μας απασχολήσουν στο βιβλίο αυτό. Μέχρι πριν από λίγα χρόνια για τα ισχυρά ρεύματα χρησιμοποιούσαμε κυρίως ανορθωτές σεληνίου. Τώρα όμως, χάρη στις εξαιρετικές τους ιδιότητες, οι ανορθωτές γερμανίου και πυριτίου κερδίζουν συνεχώς έδαφος.

Το βασικό μέρος των ανορθωτικών στοιχείων είναι ένας δίσκος από ημιαγωγό υλικό, όπως σελήνιο, πυρίτιο ή γερμάνιο. Μεταξύ αυτού και ενός ηλεκτροδίου από μεταλλικό έλασμα παρεμβάλλεται μια λεπτή διαχωριστική στρώση, στην οποία στηρίζεται και η λειτουργία του στοιχείου σαν ηλεκτρικής βαλβίδας. Δηλαδή η στρώση αυτή αφήνει το ρεύμα να περνά προς τη μια μόνο φορά, ενώ το φράζει προς την αντίθετη και γι' αυτό ονομάζεται **στρώση φραγμού**.

Το σχήμα 11.7α δείχνει τη χαρακτηριστική καμπύλη μεταβολής του ρεύματος, όταν μεταβάλλεται η τάση που εφαρμόζεται σε ένα ανορθωτικό στοιχείο από ημιαγωγό. Όπως παρατηρούμε, και όταν η τάση είναι αρνητική, υπάρχει ένα μικρό αρνητικό ρεύμα, το οποίο είναι χωρίς σημασία, εφόσον η αρνητική τάση δεν υπερβαίνει ένα όριο. **Στο όριο αυτό, το οποίο ονομάζομε τάση φραγμού, γίνεται διάσπαση της στρώσεως φραγμού και το στοιχείο σταματά να συμπεριφέρεται σαν ηλεκτρική βαλβίδα.** Δηλαδή ρεύμα περνά πια και κατά την αρνητική φορά. Συνηθίζεται επίσης σαν τάση φραγμού να ονομάζεται και η ενδεικνυμένη τιμή της τάσεως εναλλασσόμενου ρεύματος, που' προκαλεί με τις αρνητικές ημιπεριόδους της τη διάσπαση της ηλεκτρικής βαλβίδας. Είναι αυτονότο ότι **η επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας μιας βαλβίδας είναι μικρότερη από την τάση φραγμού**.

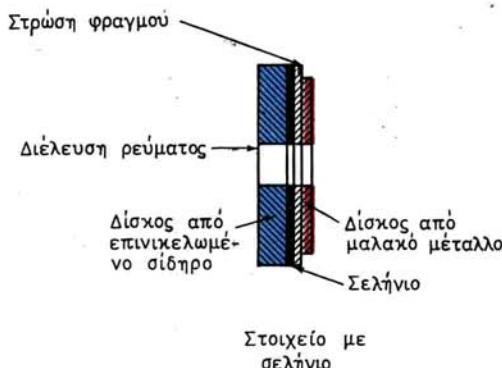


Σχ. 11.7α.

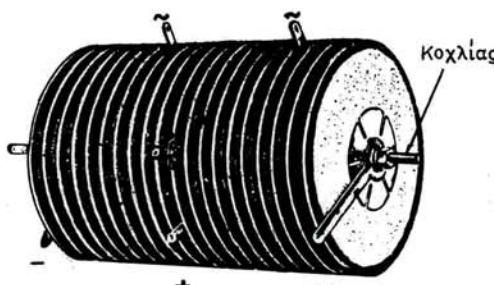
Χαρακτηριστική καμπύλη ανορθωτικών στοιχείων από ημιαγωγούς.

α) Ανορθωτές σεληνίου.

Στο σχήμα 11.7β φαίνεται πώς είναι συγκροτημένο ένα στοιχείο σεληνίου (selinium). Το ρεύμα περνά από το ηλεκτρόδιο επινικελωμένου σιδήρου προς το δίσκο μαλακού μετάλλου. Τα ανορθωτικά στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα ανάλογα με την τάση και ένταση του ρεύματος την οποία θέλουμε να μας δώσει ο ανορθωτής και με την ανορθωτική διάταξη που έχουμε διαλέξει (παράγρ. 11.5 και 11.6). Για να γίνουν οι συνδέσεις αυτές, όπως δείχνει το σχήμα 11.7γ, σχηματίζομε στήλες από ανορθωτικά στοιχεία, τα οποία στερεώνομε με μια βίδα που περνά από τις τρύπες που υπάρχουν στο κέντρο των στοιχείων.

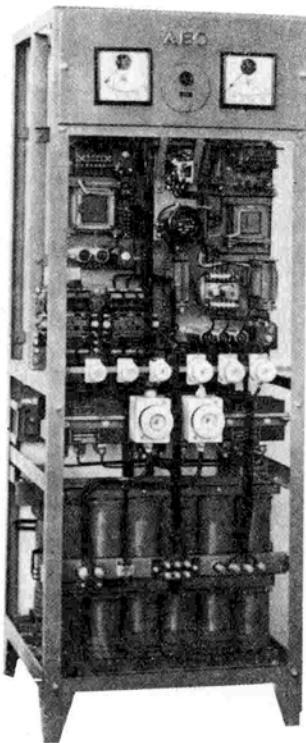


Σχ. 11.7β.
Ανορθωτικό στοιχείο σεληνίου.



Σχ. 11.7γ.
Ανορθωτής σεληνίου με δίσκους ψύξεως και λήψεις για διάταξη γέφυρας.

Όταν ο ανορθωτής είναι για μεγάλες εντάσεις, μεταξύ των στοιχείων παρεμβάλλονται μεγάλοι μεταλλικοί δίσκοι, οι οποίοι χρησιμεύουν για την ψύξη (σχ. 11.7γ). Η επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας (ενδεικνύμενη τιμή) στα στοιχεία σεληνίου είναι 20 ως 25 V. Η επιτρεπόμενη φόρτιση στα στοιχεία σεληνίου με φυσική ψύξη είναι περίπου 60 mA/cm². Αυτή τριπλασιάζεται αν έχουμε εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα ψύξεως με ανεμιστήρα. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι η θερμοκρασία των στοιχείων σεληνίου κατά τη λειτουργία του ανορθωτή δεν πρέπει να περνά τους 80° C. Ο βαθμός αποδόσεως των ανορθω-



Σχ. 11.7δ.

Ανορθωτική μονάδα σεληνίου 96V,120A για φόρτιση συσσωρευτών.

τών σεληνίου είναι 85 ως 90%. Οι ανορθωτές σεληνίου χρησιμοποιούνται είτε για μικρές εντάσεις και μεγάλες τάσεις (μέχρι 100 kV) είτε για χαμηλές τάσεις (μέχρι 250 V) και μεγάλες εντάσεις (σχ. 11.7δ).

β) Ανορθωτές γερμανίου και πυρίτιου.

Τα ανορθωτικά στοιχεία γερμανίου και πυρίτιου αποτελούνται από ένα λεπτό δίσκο από γερμάνιο (germanium) ή πυρίτιο (silicon) επάνω στον οποίο έχει τοποθετηθεί με τήξη ένα άλλο κατάλληλο υλικό (ίνδιο για το γερμάνιο, αλουμίνιο για το πυρίτιο). Στην ένωση των δύο υλικών σχηματίζεται από τη σύντηξή τους στρώση που αποτελείται και από τα δυο υλικά. Η στρώση αυτή, που είναι εδώ η στρώση φραγμού, έχει ιδιότητες ηλεκτρικής βαλβίδας. Η αντιστασή της κατά τη μία διεύθυνση είναι 5000 φορές μεγαλύτερη από την αντίθετη. Έτσι σ' αυτά τα ανορθωτικά στοιχεία το αρνητικό ρεύμα είναι πολύ μικρότερο από ό,τι είναι στα στοιχεία σεληνίου.

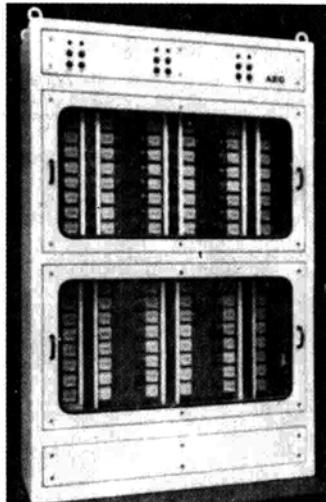
Η επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας (ενδεικνύμενη τιμή) στα ανορθωτικά στοιχεία γερμανίου είναι 160 V, ενώ στα στοιχεία πυρίτιου 380 V περίπου για κάθε στοιχείο. Η επιτρεπόμενη ένταση φορτίσεως στό γερμάνιο και πυρίτιο φθάνει σε 50 ως 150 A/cm², δηλαδή είναι μεγαλύτερη κατά 1000 φορές περίπου από τα στοιχεία σεληνίου. Στους ανορθωτές γερμανίου και πυρίτιου για τάσεις πάνω από 100 V ο βαθμός αποδόσεως περνά το 95%.

Αυτά τα ανορθωτικά στοιχεία (σχ. 11.7ε) μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε και



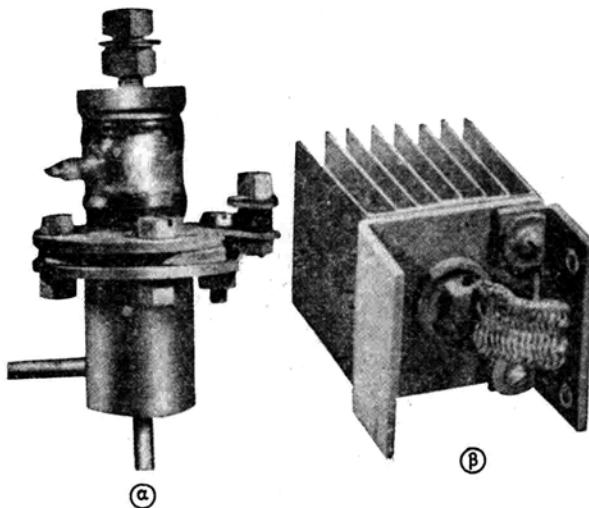
Σχ. 11.7ε.

Ανορθωτικό στοιχείο πυριτίου 100A.



Σχ. 11.7στ.

Ανορθωτική μονάδα πυριτίου (ψύξη με νερό).



Σχ. 11.7ζ.

Ανορθωτικά στοιχεία γερμανίου 150A. α) Ψύξη με νερό. β) Ψύξη με αέρα.

για μεγάλες ισχείς. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζουν είναι η μεγάλη ευαισθησία τους στη θερμότητα. Η οριακή θερμοκρασία στα στοιχεία γερμανίου είναι μόνο 65°C ενώ στους ανορθωτές πυριτίου είναι 140°C . Επίσης, λόγω των μικρών διαστάσεων των στοιχείων η θερμοχωρητικότητά τους είναι μικρή, με συνέπεια σε μια υπερφόρτιση η θερμοκρασία τους να ανεβαίνει γρήγορα. Για τους λόγους αυτούς, τα στοιχεία είναι εφοδιασμένα με ψυκτικά σώματα για να φύχονται με εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα ή φύχονται με κυκλοφορία νερού (σχ. 11.7ζ). Επίσης, οι αντίστοιχοι ανορθωτές είναι εφοδιασμένοι με αυτόματες διατάξεις για τη γρήγορη διακοπή της τροφοδοτήσεως σε περίπτωση ανυψώσεως της θερμοκρασίας.

Οι ανορθωτές με ανορθωτικά στοιχεία γερμανίου και πυριτίου χρησιμοποιούνται για εντάσεις από 1Α και κάτω μέχρι αρκετές χιλιάδες αμπέρ (σχ. 11.7στ).

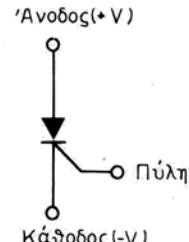
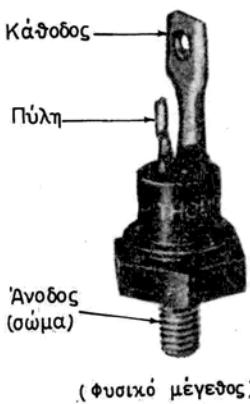
γ) Ανορθωτές με Θυρίστορ (thyristor).

Σήμερα χρησιμοποιούνται σε σημαντική έκταση και οι ανορθωτές με **Θυρίστορ**. Δηλαδή με **ελεγχόμενα ανορθωτικά στοιχεία πυριτίου**, που έχουν τη δυνατότητα να δίνουν ρυθμιζόμενη τάση του συνεχούς ρεύματος και να επιτρέπουν την εφαρμογή αυτοματισμών. Οι ανορθωτές αυτοί είναι αξιόπιστοι στη λειτουργία τους και έχουν υψηλό βαθμό αποδόσεως σε όλο το εύρος μεταβολής του φορτίου. Για όλους αυτούς τους λόγους έχουν σήμερα σε μεγάλο βαθμό υποκαταστήσει τα ζεύγη κινητήρα - γεννήτριας και τους ανορθωτές υδραργύρου στις μικρές και μέτριες ισχεις.

Το Θυρίστορ βασικά είναι ένα ανορθωτικό στοιχείο πυριτίου που έχει όμως περισσότερα στρώματα από ημιαγωγό υλικό, ώστε να σχηματίζονται τρεις στρώσεις φραγμού. Με την κατασκευή αυτή είναι δυνατή η τοποθέτηση στο ανορθωτικό στοιχείο, εκτός από την άνοδο και την κάθοδο και ενός τρίτου ηλεκτροδίου, που το ονομάζομε **πύλη** (σχ. 11.7η).

Οι τρεις στρώσεις φραγμού που έχει το Θυρίστορ δεν επιτρέπουν στο ηλεκτρικό ρεύμα να περάσει ούτε κατά τη μια φορά ούτε κατά την άλλη. Αν όμως η πύλη τροφοδοτηθεί με μια θετική προς την κάθοδο τάση (πόλωση), ο φραγμός αυτός σταματά. Τότε μπορεί να περάσει ρεύμα από την άνοδο προς την κάθοδο.

Με την παρουσία δηλαδή κατάλληλης πολώσεως στην πύλη, το Θυρίστορ συμπεριφέρεται σαν κοινή δίοδος. Όταν όμως αρχίσει να περνάει ρεύμα από την άνοδο προς την κάθοδο (κατάσταση αγωγιμότητας); η πύλη χάνει τον έλεγχο και το Θυρίστορ παραμένει σε αγωγιμότητα ακόμα και αν η τάση στην πύλη καταργηθεί. Έτσι, ένας βραχύχρονος και μόνο παλμός πύλης απαιτείται για την έναση ενός ορθά πολωμένου Θυρίστορ. Ο μόνος τρόπος για να διακόψει ένα Θυρίστορ που είναι σε αγωγιμότητα, είναι ο μηδενισμός του ρεύματος που το διαρρέει. Στα κυ-



(Συμβολική παράσταση)

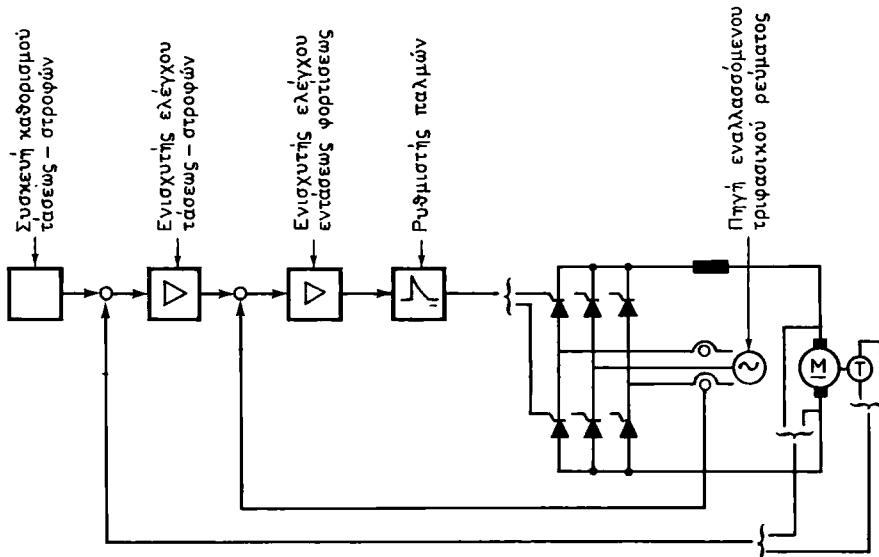
Σχ. 11.7η.
Θυρίστορ (15Α, 400V).

κλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος αυτό συμβαίνει αυτόματα, με την αναστροφή της τάσεως κάθε δεύτερη ημιπερίοδο.

Στην τάση της πύλης μπορούμε να δώσουμε τη μορφή παλμών που να έχουν την ίδια συχνότητα με το εναλλασσόμενο ρεύμα που ανορθώνομε. Η φασική απόκλιση μεταξύ των παλμών αυτών και του εναλλασσόμενου ρεύματος καθορίζει τη στιγμή μέσα σε κάθε ημιπερίοδο που θα αρχίζει να περνά ρεύμα από το ανορθωτικό στοιχείο. Όταν μεταβάλλομε αυτή τη φασική απόκλιση μεταβάλλεται η τάση του συνεχούς ρεύματος. Η ίδια μέθοδος για τη ρύθμιση της τάσεως του συνεχούς εφαρμόζεται και στις λυχνίες υδραργύρου με σχάρες και θα την εξηγήσουμε αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο (11.10). Η πτώση τάσεως μέσα στο ανορθωτικό στοιχείο φθάνει τα 1,5 ως 1,9 V για το κύριο ρεύμα. Δηλαδή είναι πολύ μικρή.

Τα τελευταία χρόνια η εξάπλωση της χρήσεως των θυρίστορ είναι θεαματική. Όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 4.6, μια από τις εφαρμογές τους είναι στην τροφοδότηση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος και τον αυτόματο έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής. Στο σχήμα 11.7ε δείχνει μια τέτοια διάταξη. Σ' αυτήν η ανόρθωση του εναλλασσόμενου τριφασικού ρεύματος γίνεται με μια τριφασική γέφυρα από θυρίστορ που τροφοδοτεί το επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα συνεχούς ρεύματος M.

Για τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα χρησιμοποιείται ένα όργανο μετρήσεως της ταχύτητας T, που είναι μια πολύ μικρή γεννήτρια της οποίας η τάση είναι ακριβώς ανάλογη της ταχύτητας. Οι ενδείξεις του οργάνου αυτού, μαζί με τις ενδείξεις για την τάση του επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα και την ένταση φορτίσεως, μεταβιβάζονται, όπως δείχνει το σχήμα 11.7θ, σε ενισχυτές ελέγχου, οι οποίοι επηρεάζουν το ρυθμιστή παλμών. Αυτός με τη σειρά του ρυθμίζει τη φασική απόκλιση των παλμών που τροφοδοτούν με τάση τις πύλες των θυρίστορ. Απο-



Σχ. 11.7θ.
Αυτόματος έλεγχος της ταχύτητας κινητήρα.

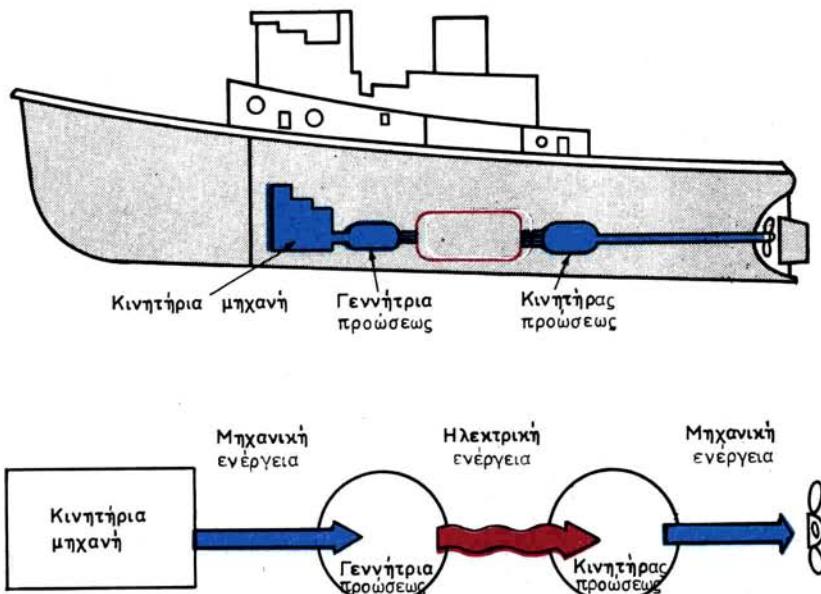
τέλεσμα αυτής της ρυθμίσεως είναι να αιξάνεται ή να ελαττώνεται η τάση συνεχούς ρεύματος που εφαρμόζεται στο επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα Μ. Έτσι διορθώνεται αυτόματα οποιαδήποτε μεταβολή στις στροφές του κινητήρα, η οποία θα προέκυπτε από μεταβολή του φορτίου, της τάσεως του δικτύου ή της εντάσεως διεγέρσεως και ο κινητήρας έχει απόλυτα σταθερή ταχύτητα. Επίσης η διάταξη επιτρέπει να καθορίσομε και μάλιστα σε πολύ μεγάλα ώρια, τον αριθμό στροφών στο λειπό με τον οποίο θέλομε να εργάζεται ο κινητήρας.

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΡΟΩΣΗ

1.1 Γενικά.

Σημαντική ηλεκτροτεχνική εφαρμογή στα πλοία αποτελούν τα συστήματα ηλεκτρικής προώσεως. Τέτοια πρόωση χρησιμοποιείται σε αρκετούς τύπους πλοίων όλων των κατηγοριών.

Στο σχήμα 1.1α φαίνεται τυπική διάταξη συστήματος ηλεκτρικής προώσεως και το παραστατικό διάγραμμα λειτουργίας της. Στο σύστημα αυτό η κινητήρια μηχανή (ντήζελ ή ατμοστρόβιλος) παρέχει τη μηχανική ενέργεια στην ηλεκτρική γεννήτρια που προσαρμόζεται στον αξονά της, η οποία γεννήτρια την μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. Με αυτή την ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτείται ο κινητήρας προωσεως, ο οποίος τη μετατρέπει σε μηχανική ενέργεια και περιστρέφει την έλικα που προσαρμόζεται στον αξονά του.



Σχ. 1.1α.
Αρχή λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής προώσεως.

Η γεννήτρια και ο κινητήρας του συστήματος είναι περισσότερο γνωστά ως **γεννήτρια προώσεως** και ως **κινητήρας προώσεως**.

Με το σύστημα της ηλεκτρικής προώσεως εξασφαλίζονται:

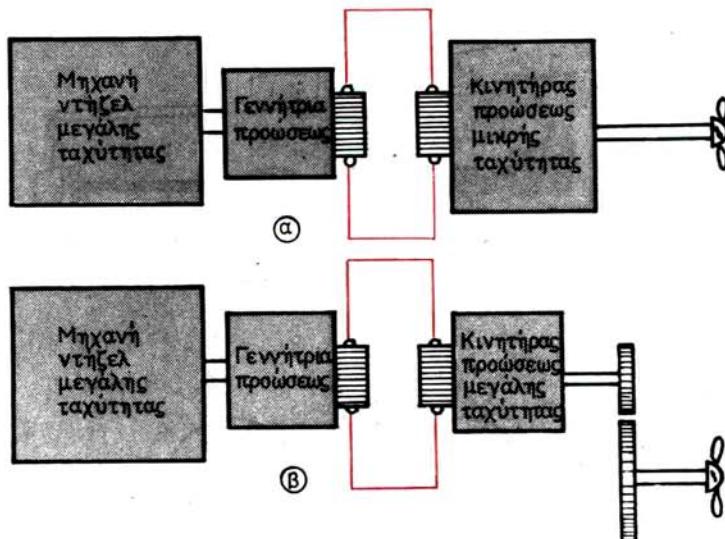
- Ο υποβιβασμός της ταχύτητας περιστροφής (στροφών) μεταξύ της κινητήριας μηχανής και της έλικας.
- Η δυνατότητα κρατήσεως της έλικας και η δυνατότητα αναστροφής περιστροφής της από τη φορά του **πρόσω** στη φορά του **ανάποδα** και αντίστροφα, χωρίς να κρατείται και να αναστρέφεται η φορά περιστροφής της κινητήριας μηχανής.

Ο υποβιβασμός της ταχύτητας περιστροφής μεταξύ κινητήριας μηχανής και έλικας είναι απαραίτητος για τον εξής λόγο:

Οι κινητήριες μηχανές που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως πολύστροφες πετρελαιομηχανές εσωτερικής καύσεως (ντήζελ), επειδή έχουν όγκο και βάρος κατά πολύ μικρότερα από πετρελαιομηχανές με την ίδια ισχύ, αλλά μικρότερο αριθμό στροφών. Εξάλλου, η έλικα έχει μεγαλύτερη προωστική απόδοση, όταν είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί με μικρότερο αριθμό στροφών και μεγαλύτερο θήμα. Έτσι, με τον παραπάνω υποβιβασμό των ταχυτήτων περιστροφής εξασφαλίζεται ταυτόχρονα η καλύτερη απόδοση, με την οποία μπορούν να λειτουργήσουν τόσο η κινητήρια μηχανή όσο και η έλικα.

Ο υποβιβασμός της ταχύτητας περιστροφής στα συστήματα ηλεκτρικής προώσεως επιτυγχάνεται:

- Με τη χρησιμοποίηση ηλεκτρικού κινητήρα προώσεως μικρής περιστροφής ταχύτητας και με απευθείας προσαρμογή της έλικας στον άξονά του, όπως στο σχήμα 1.16(a).
- Με τη χρησιμοποίηση ηλεκτρικού κινητήρα προώσεως μεγάλης περιστροφικής ταχύτητας και μετάδοση της περιστροφικής κινήσεώς του στην



Σχ. 1.16.
Τρόποι μειώσεως των στροφών.

έλικα με μειωτήρες τροχούς (γρανάζια), όπως στο σχήμα 1.16(6).

Ένα άλλο πλεονέκτημα των συστημάτων ηλεκτρικής προώσεως, σε σύγκριση τους με τα αυτοτελή μηχανικά, είναι ότι δεν διαθέτουν πολύπλοκα μηχανικά συστήματα, επειδή κατά την κράτηση και την αναστροφή της περιστροφής της έλικας δεν απαιτείται κράτηση και αναστροφή της περιστροφής της κινητήριας μηχανής.

Ανάλογα με το ρεύμα τροφοδοτήσεως των συστημάτων ηλεκτρικής προώσεως διακρίνομε την ηλεκτρική πρόωση με συνεχές ρεύμα και την ηλεκτρική πρόωση με εναλλασσόμενο ρεύμα.

1.2 Πρόωση με συνεχές ρεύμα.

Οι κινητήρες προώσεως (κινητήρες περιστροφής της έλικας) των συστημάτων ηλεκτρικής προώσεως, με συνεχές ρεύμα, τροφοδοτούνται με τάση υψηλότερη από εκείνη των συνήθων δικτύων Σ.Ρ. (110 ή 220 V). Στις περισσότερες περιπτώσεις η τάση αυτή, η οποία παράγεται από τη γεννήτρια προώσεως των συστημάτων, είναι 500 V.

1.2.1 Ρύθμιση της ταχύτητας και αναστροφή της φοράς περιστροφής.

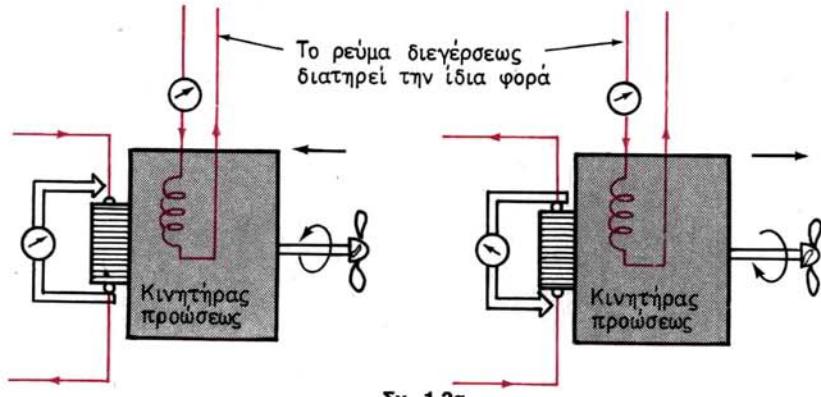
Στα συστήματα ηλεκτρικής προώσεως με συνεχές ρεύμα, ως κινητήρας προώσεως χρησιμοποιείται ηλεκτρικός κινητήρας ξένης διεγέρσεως, επειδή στον τύπο αυτό είναι δυνατή η μεταβολή τόσο της τάσεως τροφοδοτήσεως της διεγέρσεώς του, όσο και της τάσεως τροφοδοτήσεως του επαγωγίμου του, χωρίς η μεταβολή της μιας τάσεως να επηρεάζει την τιμή της άλλης. Ο ανεξάρτητος αυτός τρόπος μεταβολής των δυο τάσεων εξασφαλίζει μεγαλύτερα όρια μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα και κατά συνέπεια της έλικας, επειδή, όπως γνωρίζουμε η ταχύτητα περιστροφής κινητήρα Σ.Ρ. είναι:

- Αντίστροφως ανάλογη προς τη μαγνητική ροή που δημιουργούν οι πόλοι της διεγέρσεώς του και
- Ανάλογη της τάσεως τροφοδοτήσεως του επαγωγίμου του (ρότορά του).

Έτσι, αυξάνοντας την τάση τροφοδοτήσεως της διεγέρσεως του κινητήρα, αυξάνεται το ρεύμα που τη διαρρέει, οπότε αυξάνεται η μαγνητική ροή των πόλων της διεγέρσεώς του και ελαττώνεται η ταχύτητα περιστροφής του. Αντίθετα, με την αύξηση της τάσεως τροφοδοτήσεως του επαγωγίμου του κινητήρα, αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του.

Εξάλλου, στον κινητήρα ξένης διεγέρσεως, η αντιστροφή της πολικότητας της τάσεως τροφοδοτήσεως της διεγέρσεώς του δεν επηρεάζει την πολικότητα της τάσεως τροφοδοτήσεως του επαγωγίμου του και αντίστροφα. Έτσι είναι εύκολη η αναστροφή της φοράς περιστροφής του κινητήρα και της έλικας από τη φορά κινήσεως **πρόσω** στη φορά κινήσεως **ανάποδα** και αντίστροφα. Στην πράξη, η αναστροφή της φοράς περιστροφής γίνεται με αντιστροφή της πολικότητας της τάσεως τροφοδοτήσεως του επαγωγίμου, ενώ διατηρείται σταθερή η πολικότητα της τάσεως τροφοδοτήσεως της διεγέρσεως, οπότε και η φορά του ρεύματος που τη διαρρέει διατηρείται σταθερή (σχ. 1.2a).

Καθώς ο κινητήρας προώσεως τροφοδοτείται από τη γεννήτρια προώσεως



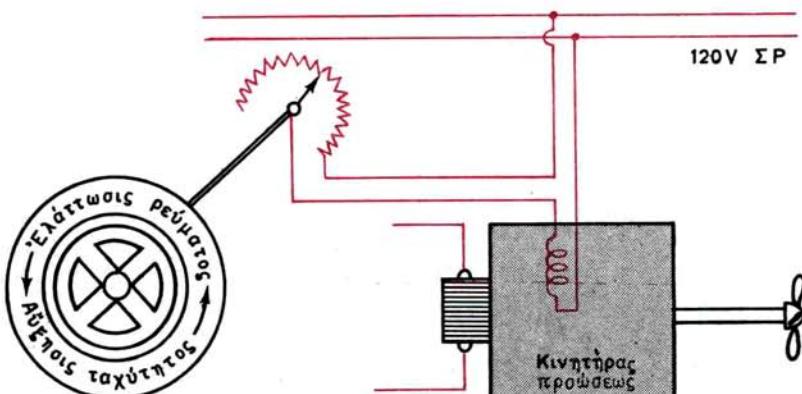
Σχ. 1.2α.

Αναστροφή της φοράς περιστροφής του κινητήρα προώσεως με αναστροφή της φοράς του ρεύματος του επαγωγήμου.

του συστήματος, για τη μεταβολή της τάσεως τροφοδοτήσεώς του μεταβάλλεται η τάση που παράγει η γεννήτρια με μεταβολή του ρεύματος διεγέρσεως της ή με μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της, που προκύπτει από αυξομείωση του καυσίμου (πετρελαίου) της κινητήριας μηχανής. Σύμφωνα με τα παραπάνω, για το χειρισμό του κινητήρα προώσεως απαιτούνται δύο χειριστήρια:

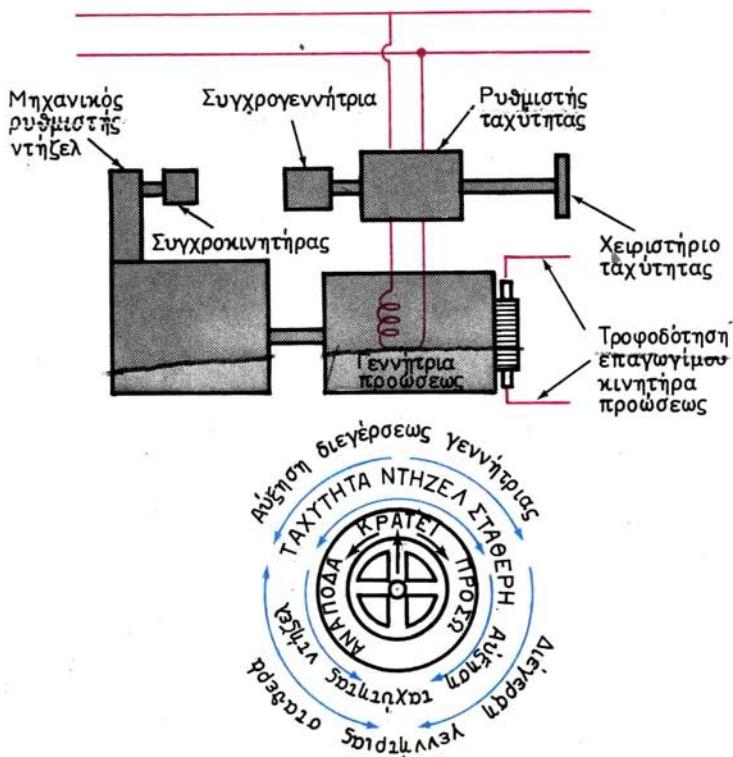
- Το χειριστήριο για τη ρύθμιση του ρεύματος της διεγέρσεως του κινητήρα (σχ. 1.2θ).
- Το χειριστήριο για τη ρύθμιση της τάσεως τροφοδοτήσεως του επαγωγήμου του κινητήρα (σχ. 1.2γ).

Με το τελευταίο ρυθμίζεται άμεσα η τάση που παράγει η γεννήτρια προώσεως του συστήματος, με την οποία τροφοδοτείται το επαγώγιμο του κινητήρα προώσεως, που είναι γνωστό και ως **χειριστήριο ταχύτητας**, επειδή με αυτό επιτυγχάνονται μεγάλες μεταβολές της ταχύτητας του κινητήρα και κατά



Σχ. 1.2θ.

Απλουστευμένη διάταξη ρυθμιστή διεγέρσεως κινητήρα.



Σχ. 1.2γ.
Τυπική διάταξη του χειριστήριου ταχύτητας.

συνέπεια της έλικας. Με το ίδιο χειριστήριο επιτυγχάνεται και η αντιστροφή της πολικότητας της τάσεως αυτής, που έχει ως αποτέλεσμα την αναστροφή της φοράς περιστροφής.

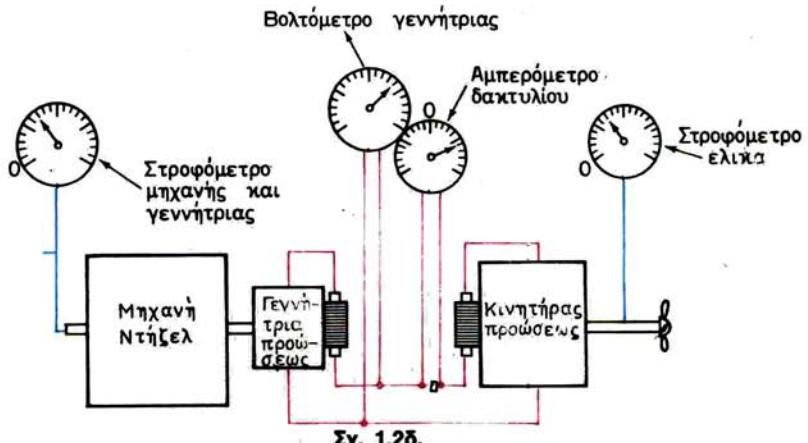
Η μεταβολή της τάσεως που παράγει η γεννήτρια και τροφοδοτείται το επαγώγιμο του κινητήρα προώσεως, με μεταβολή του ρεύματος διεγέρσεως και μεταβολή των στροφών της κινητήριας μηχανής, στην πράξη γίνεται με ένα χειριστήριο (σχ. 1.2γ). Όταν το χειριστήριο αυτό θρίσκεται στη θέση μέσο, που αναφέρεται ως **κράτει**, η κινητήρια μηχανή (ντήζελ) λειτουργεί με μικρό αριθμό στροφών και η διέγερση της γεννήτριας προώσεως δεν διαρρέεται από ρεύμα και δεν παράγει τάση. Έτσι δεν τροφοδοτείται το επαγώγιμο του κινητήρα προώσεως, αυτός δεν περιστρέφεται, οπότε δεν περιστρέφεται και η έλικα. Όταν το χειριστήριο στρέφεται δεξιά, προς την κατεύθυνση **πρόσω**, αρχικά παρέχει μικρό ρεύμα στη διέγερση της γεννήτριας, οπότε αυτή πάραγει χαμηλή τάση με ορισμένη πολικότητα. Η τάση αυτή παρέχεται στον κινητήρα και αυτός αρχίζει να στρέφει με μικρή ταχύτητα την έλικα προς τη φορά του **πρόσω**. Ταυτόχρονα το χειριστήριο αυτό προκαλεί μικρή αύξηση καυσίμων (επενεργεί ως γκάζι) στην κινητήρια μηχανή, ώστε να μη προκαλείται αύξηση των στροφών της, αλλά να μπορεί να ανταποκριθεί στο φορτίο της έλικας και στις απώλειες της γεννήτριας και του κινητήρα προώσεως. Μεγαλύτερη

στροφή του χειριστηρίου προς την κατεύθυνση του πρόσω (μετακινεί το δρομέα του ροοστάτη διεγέρσεως) προκαλεί αύξηση του ρεύματος διεγέρσεως, που συνεπάγεται αύξηση της τάσεως που παράγει η γεννήτρια, με τελικό αποτέλεσμα την αύξηση των στροφών της έλικας προς τη φορά του πρόσω. Η συνέχιση της στροφής του χειριστηρίου προς την ίδια κατεύθυνση συνεχίζει να προκαλεί αύξηση του ρεύματος διεγέρσεως μέχρι ένα σημείο της διαδρομής του, στο οποίο και η συνεχώς αυξανόμενη ταχύτητα περιστροφής της έλικας υπό την επίδραση της διεγέρσεως (μαγνητικής ροής) λαμβάνει μέγιστη τιμή. Η στροφή του χειριστηρίου όμως πέρα από το σημείο αυτό προς την κατεύθυνση του πρόσω, προκαλεί σημαντική αύξηση καυσίμου στην κινητήρια μηχανή, οπότε αυξάνει η ταχύτητα περιστροφής της. Έτσι, αυξάνεται πάλι η τάση που παράγει η γεννήτρια προώσεως που έχει ως τελικό αποτέλεσμα την παραπέρα αύξηση της ταχύτητας περιστροφής της έλικας προς την κατεύθυνση του πρόσω.

Όταν το χειριστήριο αυτό στρέφεται από τη θέση **κράτει** προς την κατεύθυνση του **ανάποδα**, επενεργεί στη διέγερση και στην κινητήρια μηχανή κατά τον ίδιο παραπάνω τρόπο, με τη διαφορά ότι αναστρέφει τη φορά του ρεύματος στη διέγερση, οπότε αντιστρέφεται η πολικότητα της τάσεως που παράγει η γεννήτρια προώσεως. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε έναρξη περιστροφής της έλικας προς την κατεύθυνση του **ανάποδα** και αύξηση της ταχύτητας περιστροφής της, ανάλογα με το σημείο της διαδρομής του, στο οποίο θρίσκεται κάθε φορά το χειριστήριο.

Η επαναφορά του χειριστηρίου από τη διαδρομή του **πρόσω**, είτε από τη διαδρομή του **ανάποδα**, στη θέση **κράτει**, προκαλεί διακοπή του ρεύματος διεγέρσεως της γεννήτριας προώσεως και ελάττωση των στροφών της κινητήριας μηχανής σε χαμηλή τιμή. Έτσι, η γεννήτρια δεν παράγει τάση, δεν τροφοδοτείται ο κινητήρας προώσεως και σταματά η περιστροφή της έλικας, αλλά καθώς και η κινητήρια μηχανή λειτουργεί με πολύ μικρό αριθμό στροφών, περιορίζονται οι κίνδυνοι ζημιών και οι απώλειες ενέργειας, επειδή δεν λειτουργεί με μεγάλο αριθμό στροφών χωρίς φορτίο.

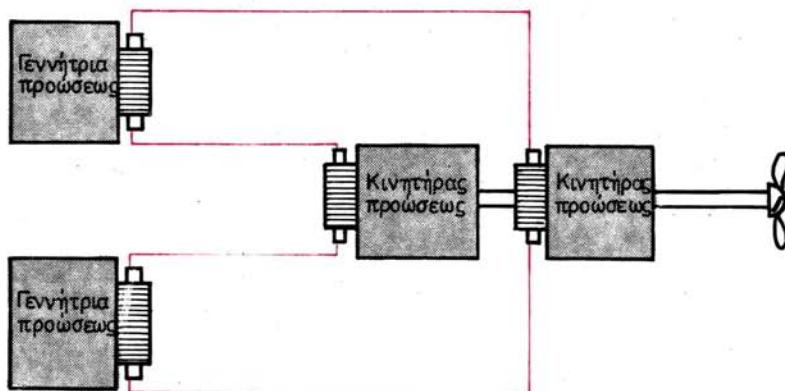
Στο σχήμα 1.2δ φαίνεται τυπική διάταξη συστήματος ηλεκτρικής προώσεως



Όργανα του πίνακα ηλεκτρικής προώσεως.

με μια γεννήτρια προώσεως και ένα κινητήρα προώσεως. Επίσης φαίνεται η συνδεσμολογία των απαραιτήτων οργάνων του πίνακα προώσεως, με τα οποία είναι δυνατός ο έλεγχος της καλής λειτουργίας του συστήματος. Σε κάθε όργανο υπάρχει ευδιάκριτη ένδειξη της μέγιστης τιμής που επιτρέπεται να πάρει το μέγεθος που μετρά το όργανο, της οποίας η υπέρβαση μπορεί να προκαλέσει μεγάλη ζημιά.

Στο σχήμα 1.2ε φαίνεται τυπική συνδεσμολογία δυο γεννητριών και δυο κινητήρων προώσεως και η μηχανική ζεύξη των τελευταίων με την έλικα, την οποία περιστρέφουν.



Σχ. 1.2ε.

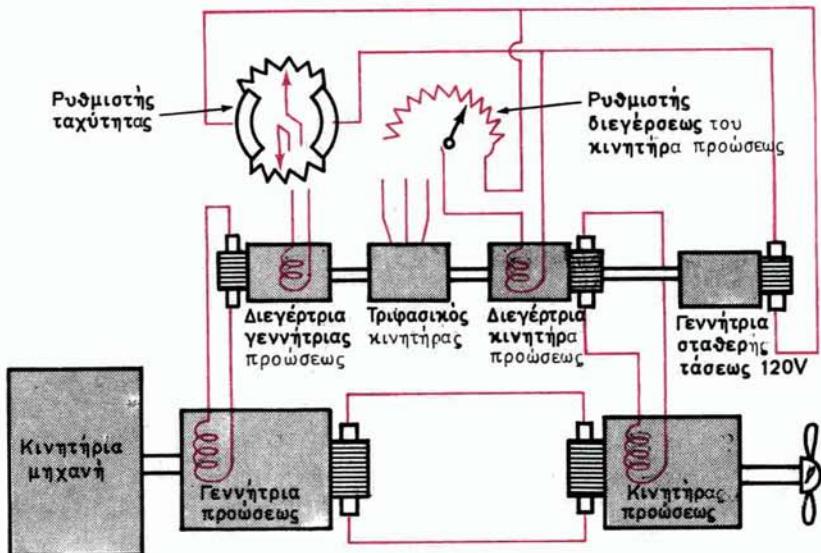
Συνδεσμολογία δυο γεννητριών και δυο κινητήρων για την κίνηση έλικας.

1.2.2 Ρύθμιση ταχύτητας και αναστροφή με ξεχωριστές διεγέρτριες γεννήτριας και κινητήρα.

Η γεννήτρια και ο κινητήρας των συστημάτων ηλεκτρικής προώσεως είναι μεγάλης ισχύος και για να λειτουργήσουν απαιτούν σημαντικό ρεύμα διεγέρσεως. Έτσι, οι ροοστάτες που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση των ρευμάτων των δυο διεγέρσεων (ρυθμιστές ταχύτητας) θα διαρρέονται από σημαντικό ρεύμα και θα προκαλούν σημαντικές απώλειες ενέργειας σε θερμότητα. Γι' αυτό, στις περισσότερες περιπτώσεις, τα συστήματα ηλεκτρικής προώσεως χρησιμοποιούν δυο ξεχωριστές διεγέρτριες γεννήτριες, για τη ξεχωριστή τροφοδότηση της διεγέρσεως της γεννήτριας και της διεγέρσεως του κινητήρα, όπως στη διάταξη του συστήματος που φαίνεται στο σχήμα 1.2στ.

Οι παραπάνω διεγέρτριες στρέφονται από τριφασικό κινητήρα Ε.Ρ., όταν το πλοίο έχει ηλεκτρική Ε.Ρ., ο οποίος στρέφει και την τρίτη γεννήτρια σταθερής τάσεως. Η τελευταία έχει μικρή ισχύ και παράγει το μικρό συνεχές ρεύμα που απαιτείται για την τροφοδότηση των διεγέρσεων των δυο διεγέρτριών. Όταν το πλοίο έχει ηλεκτρική παροχή Σ.Ρ., για την περιστροφή των δυο διεγέρτριών χρησιμοποιείται κινητήρας Σ.Ρ., ενώ η τρίτη γεννήτρια σταθερής τάσεως παραλείπεται και οι διεγέρσεις των δυο διεγέρτριών τροφοδοτούνται από τη γραμμή της ηλεκτρικής παροχής Σ.Ρ. του πλοίου.

Επειδή οι διεγέρτριες έχουν μικρή σχετικά ισχύ, είναι μικρό και το ρεύμα



Σχ. 1.2στ.
Διάταξη ηλεκτρικής προώσεως με δυο διεγέρτες.

διεγέρσεώς τους. Έτσι δεν προκαλούνται μεγάλες απώλειες ενέργειας σε θερμότητα στις αντιστάσεις ρυθμίσεως του ρεύματος διεγέρσεώς τους, που έμμεσα ρυθμίζουν την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα προώσεως και κατά συνέπεια της έλικας, ως εξής:

Οι δρομείς των δυο ρυθμιστικών αντιστάσεων της διεγέρσεως της διεγέρτριας της γεννήτριας προώσεως είναι ομοχειριζόμενοι και μετακινούνται με μοχλό που ονομάζεται ρυθμιστής (χειριστήριο) ταχύτητας (σχ. 1.2στ.). Όταν ο ένας δρομέας κινείται προς τη θετική γραμμή της τάσεως τροφοδοτήσεως της διεγέρσεως, ο άλλος κινείται προς την αρνητική και αντίστροφα. Έτσι, αν οι δυο δρομείς στραφούν με το χειριστήριο ταχύτητας στο μέσο της διαδρομής των ρυθμιστικών αντιστάσεων (θέση κράτει του χειριστηρίου), αυτοί βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό. Τότε συμβαίνουν τα εξής: Στη διέγερση της διεγέρτριας δεν κυκλοφορεί ρεύμα. Αυτή δεν παράγει τάση για να τροφοδοτήσει τη διέγερση της γεννήτριας προώσεως. Η γεννήτρια προώσεως δεν παράγει τάση για να τροφοδοτήσει τον κινητήρα προώσεως, ο οποίος δεν περιστρέφεται και η έλικα παραμένει κρατημένη. Για τον ίδιο λόγο η έλικα θα κρατηθεί, όταν οι δρομείς των δυο ρυθμιστικών αντιστάσεων επανέλθουν στο μέσο της διαδρομής τους από οποιεσδήποτε άλλες θέσεις, με την επαναφορά του χειριστηρίου στη θέση **κράτει**, είτε από την κατεύθυνση του **πρόσω** είτε από την κατεύθυνση του **ανάποδα**.

Η παραμικρή στροφή του χειριστηρίου προς την κατεύθυνση του **πρόσω** (π.χ. δεξιά) θα προκαλέσει μετακίνηση κατά μικρά διαστήματα των ρυθμιστικών αντιστάσεων του άνω δρομέα προς την αρνητική γραμμή και του κάτω δρομέα προς τη θετική γραμμή της παροχής. Έτσι, μεταξύ των δρομέων θα δημιουργηθεί μικρή διαφορά δυναμικού με ορισμένη πολικότητα, οπότε θα κυκλοφορήσει ένα μικρό ρεύμα στη διέγερση της διεγέρτριας προώσεως. Η διεγέρτρια θα

παρέχει μικρό ρεύμα στη διέγερση της γεννήτριας προώσεως κι αυτή θα παράγει χαμηλή τάση, με την οποία θα τροφοδοτείται ο κινητήρας προώσεως. Έτσι αυτός εκκινεί και περιστρέφεται με μικρή ταχύτητα, στρέφοντας με μικρή ταχύτητα την έλικα προς την κατεύθυνση του πρόσω. Μεγαλύτερη στροφή του χειριστηρίου προς την κατεύθυνση του πρόσω μετακινεί τους δρομείς κατά μεγαλύτερα διαστήματα και προς τις ίδιες φορές. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η διαφορά δυναμικού με την ίδια παραπάνω πολικότητα που δημιουργείται μεταξύ των δρομέων και αυξάνεται και το ρεύμα διεγέρσεως της διεγέρτριας. Η αύξηση αυτή προκαλεί αύξηση της τάσεως της διεγέρτριας, που συνεπάγεται αύξηση του ρεύματος διεγέρσεως της γεννήτριας προώσεως και αύξηση της τάσεως που παράγει η τελευταία. Καθώς τροφοδοτείται με την αυξημένη αυτή τάση ο κινητήρας προώσεως, αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του και περιστρέφει την έλικα με μεγαλύτερη ταχύτητα προς την κατεύθυνση του **πρόσω**.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η συνέχιση της στροφής του χειριστηρίου προς την κατεύθυνση του πρόσω μέχρι του ορίου του, ακολουθείται από συνεχή αύξηση της ταχύτητας περιστροφής της έλικας ως το μέγιστο αριθμό στροφών προς την κατεύθυνση του **πρόσω**.

Η παραμικρή στροφή του χειριστηρίου προς την κατεύθυνση του **ανάποδα** θα μετακινήσει τους δυο δρομείς κατά μικρά διαστήματα των ρυθμιστικών αντιστάσεων, αλλά προς αντίθετες κατευθύνσεις. Έτσι η μικρή διαφορά δυναμικού που θα δημιουργηθεί μεταξύ των δρομέων, θα έχει αντίθετη πολικότητα. Λόγω της αντίθετης αυτής πολικότητας στη διέγερση της διεγέρτριας θα κυκλοφορήσει ρεύμα αντίθετης φοράς, η οποία θα παρέχει αντίθετης φοράς ρεύμα στη διέγερση της γεννήτριας προώσεως. Η τελευταία θα παράγει αντίθετης πολικότητας χαμηλή τάση, με την οποία θα τροφοδοτείται ο κινητήρας προώσεως, οπότε θα αναστραφεί η φορά περιστροφής του και θα περιστρέψει την έλικα προς την κατεύθυνση του **ανάποδα**. Όπως και στην περίπτωση του **πρόσω**, η συνέχιση της στροφής του χειριστηρίου πίρος την κατεύθυνση του **ανάποδα**, ως το όριο του, προκαλεί αύξηση της διαφοράς δυναμικού που δημιουργείται μεταξύ των δρομέων των ρυθμιστικών αντιστάσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση της ταχύτητας περιστροφής της έλικας μέχρι τη μέγιστη τιμή της προς την κατεύθυνση του **ανάποδα**.

Το χειριστήριο με ζεύγος συγχρογεννήτριας-συγχροκινητήρα, μπορεί να επενεργεί και στη ρύθμιση του καυσίμου της κινητήριας μηχανής, ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση σταθερών των στροφών της μέχρι το σημείο της διαδρομής των ορίων των ρυθμιστικών αντιστάσεων και να αντιμετωπίζεται το αυξανόμενο μηχανικό φορτίο. Πέρα από το σημείο αυτό όμως προκαλεί σημαντική αύξηση του καυσίμου, οπότε αυξάνεται ο αριθμός των στροφών της κινητήριας μηχανής, πράγμα που προκαλεί αύξηση της τάσεως της γεννήτριας προώσεως και τελικά αύξηση των στροφών της έλικας.

Ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής της έλικας, πάνω και κάτω από αυτήν που έχει ρυθμισθεί με το παραπάνω χειριστήριο, τόσο προς την κατεύθυνση του **πρόσω** όσο και προς την κατεύθυνση του **ανάποδα**, γίνεται και με το ροοστάτη, ο οποίος χαρακτηρίζεται και ως ρυθμιστής διεγέρσεως του κινητήρα προώσεως. Ο ροοστάτης αυτός αυξομειώνει το ρεύμα διεγέρσεως της διεγέρτριας του κινητήρα προώσεως που προκαλεί αντίστοιχη αυξομείωση του

ρεύματος διεγέρσεως του κινητήρα προώσεως και αντίστοιχη μείωση και αύξηση της ταχύτητας περιστροφής της έλικας. Κατά την εκκίνηση του κινητήρα προώσεως (και της έλικας), ο ροοστάτης αυτός πρέπει να βγαίνει εκτός, ώστε η διέγερση του κινητήρα προώσεως να δημιουργεί ισχυρή μαγνητική ροή και αυτός να εκκινεί ομαλά με μεγάλη ροπή και να μπορεί να διατηρεί μικρή ταχύτητα περιστροφής.

1.3 Πρόωση με εναλλασσόμενο ρεύμα.

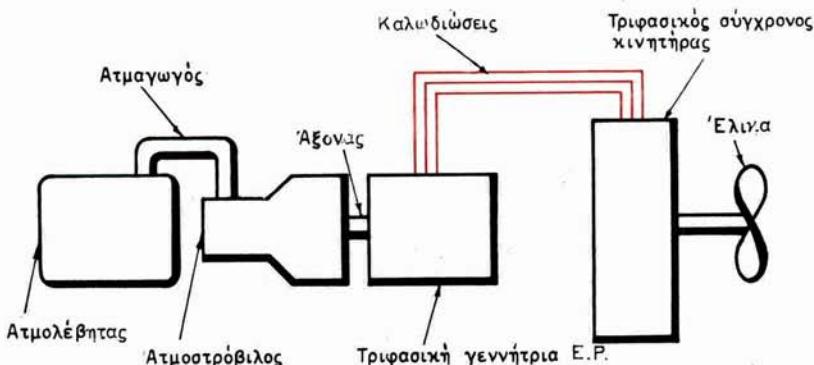
Η ηλεκτρική πρόωση με εναλλασσόμενο ρεύμα χρησιμοποιείται περισσότερο σε πλοία, στα οποία χρησιμοποιούνται ως κινητήριες μηχανές ατμοστρόβιλοι και είναι γνωστή και ως **στροβιλολεκτρική πρόωση**.

Στο σχήμα 1.3 φαίνεται διάταξη ηλεκτρικής προώσεως με Ε.Ρ., της οποίας η βασική λειτουργία έχει ως εξής:

Ο ατμός που παράγει ο λέβητας κινεί τον ατμοστρόβιλο, ο οποίος χρησιμοποιείται ως κινητήρια μηχανή της τριφασικής γεννήτριας Ε.Ρ. (εναλλακτήρας). Η τριφασική γεννήτρια προώσεως παράγει την απαιτούμενη τριφασική τάση 380/440 V, με την οποία τροφοδοτείται ο τριφασικός σύγχρονος κινητήρας προώσεως που περιστρέφει την προσαρμοσμένη στον άξονά του έλικα του πλοίου.

Με τη χρησιμοποίηση της στροβιλολεκτρικής προώσεως είναι δυνατός ο υποβιβασμός της πολύ μεγάλης ταχύτητας περιστροφής του ατμοστροβίλου στην αρκετά μικρή ταχύτητα περιστροφής της έλικας. Ο υποβιβασμός αυτός είναι απαραίτητος, επειδή ο ατμοστρόβιλος παρουσιάζει μεγάλη απόδοση, όταν λειτουργεί με πολύ μεγάλη ταχύτητα περιστροφής (αρκετές χιλιάδες rpm). Αντίθετα, η έλικα παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόδοσή της, σε πάρα πολύ μικρότερη ταχύτητα περιστροφής (100-300 rpm). Έτσι, με τον υποβιβασμό αυτό εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη δυνατή απόδοση, τόσο του ατμοστροβίλου όσο και της έλικας, επειδή και τα δύο λειτουργούν στις ταχύτητες που παρουσιάζουν την καλύτερη απόδοση.

Βέβαια ο ίδιος υποβιβασμός μπορεί να γίνει και με μειωτήρες τροχούς (γρανάζια), με τους οποίους μεταδίδεται η περιστροφική κίνηση του άξονα του



Σχ. 1.3.
Διάταξη στροβιλολεκτρικής προώσεως.

στροβίλου στην έλικα. Η χρησιμοποίηση όμως της στροβίλοηλεκτρικής προώσεως, σε σύγκρισή της με το σύστημα των μειωτήρων τροχών, παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- a) Στο σύστημα της στροβίλοηλεκτρικής προώσεως, η φορά περιστροφής του στροβίλου είναι η ίδια, είτε η έλικα περιστρέφεται προς την κατεύθυνση του **πρόσω**, είτε προς την κατεύθυνση του **ανάποδα**. Στο σύστημα των μειωτήρων τροχών απαιτείται αναστροφή της φοράς περιστροφής του στροβίλου.
- β) Η κατασκευή του στροφείου του στροβίλου είναι απλή, επειδή, καθώς περιστρέφεται κατά μία φορά, δεν απαιτεί τις **επιπρόσθετες σειρές πτερυγίων του ανάποδα**.
- γ) Η ισχύς που παρέχεται στον ελικοφόρο άξονα είναι η ίδια και κατά την περιστροφή της έλικας προς την κατεύθυνση του πρόσω και προς την κατεύθυνση του ανάποδα. Αυτό όμως δεν ισχύει στο σύστημα με τους μειωτήρες τροχούς, επειδή **ο στρόβιλος κατά τη λειτουργία του ανάποδα παρουσιάζει πολύ μικρότερη ισχύ από ότι κατά τη λειτουργία του πρόσω**.
- δ) Στη στροβίλοηλεκτρική πρόσωση με εναλλασσόμενο ρεύμα, η αναστροφή της φοράς περιστροφής του τριφασικού σύγχρονου κινητήρα προώσεως και κατά συνέπεια η αναστροφή της φοράς περιστροφής της έλικας από την κατεύθυνση του πρόσω στην κατεύθυνση του ανάποδα και αντίστροφα είναι απλή. Επιτυγχάνεται με εναλλαγή της συνδεσμολογίας (διασταύρωση) των δυο από τους τρεις αγωγούς, με τους οποίους παρέχεται το εναλλασσόμενο τριφασικό ρεύμα στο σύγχρονο τριφασικό κινητήρα προώσεως.
- ε) Στη στροβίλοηλεκτρική πρόσωση είναι δυνατή η λειτουργία του στροβίλου χωρίς να περιστρέφεται η έλικα. Η αποκατάσταση και η διακοπή της περιστροφής της έλικας είναι πολύ εύκολη, επειδή επιτυγχάνεται με αποκατάσταση και διακοπή του ρεύματος τροφοδοτήσεως του κινητήρα προώσεως, το οποίο παράγει γεννήτρια προώσεως. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα προθερμάνσεως του στροβίλου σε μικρό χρονικό διάστημα, καθώς μπορεί να περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα χωρίς φορτίο, μια και περιστρέφει μόνο τη γεννήτρια προώσεως, που λειτουργεί χωρίς φορτίο (δεν τροφοδοτεί τον κινητήρα προώσεως).

Εκτός όμως από την ευκολία στην αναστροφή της φοράς περιστροφής της έλικας από την κατεύθυνση του πρόσω στην κατεύθυνση του ανάποδα και αντίστροφα, η χρησιμοποίηση του τριφασικού σύγχρονου κινητήρα, ως κινητήρα προώσεως, παρέχει ευκολία στην εκκίνηση της έλικας και στην αυξομείωση της ταχύτητας περιστροφής της.

Η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι:

$$v_k = \frac{60 f}{P_{zk}} \quad (1)$$

όπου: v_k η ταχύτητα περιστροφής του σε rpm, f η συχνότητα του ρεύματος τροφοδοτήσεως του τριφασικού στάτορά του σε C/s και P_{zu} τα ζεύγη των πόλων σε κάθε φάση του τριφασικού στάτορά του.

Επομένως, για να περιστρέφεται ο κινητήρας αυτός με v_k rpm πρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα τροφοδοτήσεώς του να έχει συχνότητα:

$$\varphi = \frac{n_k P_{zk}}{60} \quad (2)$$

Όμως το ρεύμα αυτό παρέχεται στον κινητήρα από τη γεννήτρια (εναλλακτήρα) προώσεως, την οποία περιστρέφει ο ατμοστρόβιλος και η συχνότητά του θα είναι:

$$f = \frac{n_y P_{zy}}{60} \quad (3)$$

όπου: n_y η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας, με την οποία την περιστρέφει ο ατμοστρόβιλος σε rpm και P_{zy} τα ζεύγη των πόλων της διεγέρσεως της γεννήτριας.

Από τις εξισώσεις (2) και (3) προκύπτει:

$$\frac{n_y}{n_k} = \frac{P_{zk}}{P_{zy}} \quad (4)$$

Δηλαδή ο λόγος μειώσεως μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής του στροβίλου (γεννήτριας προώσεως) n_y και της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα προώσεως (έλικας) n_k είναι ίσος με το λόγο μεταξύ του αριθμού των ζευγών των πόλων κάθε φάσεως του τριφασικού σύγχρονου κινητήρα προώσεως και του αριθμού των ζευγών των πόλων της διεγέρσεως της γεννήτριας (εναλλακτήρα) προώσεως.

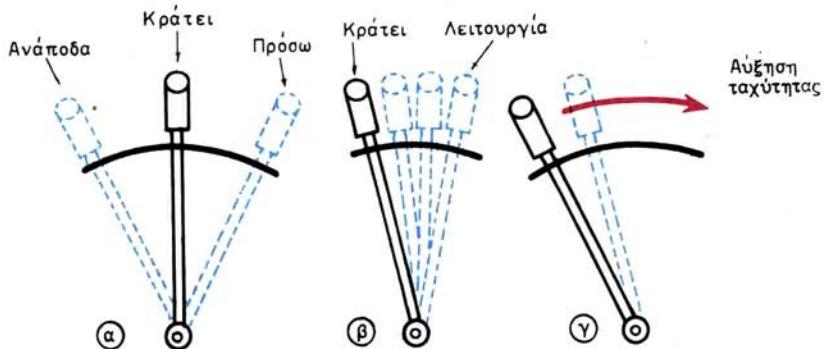
Στην πράξη, η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της έλικας γίνεται θηματιστικά. Αυτό επιτυγχάνεται με αποσύνδεση και σύνδεση ζευγών πόλων της τριφασικής περιελίξεως (στάτορα) του τριφασικού σύγχρονου κινητήρα προώσεως με διάταξη επαφών διακόπτη: η συνεχής μεταβολή της γίνεται με αυξομείωση της ταχύτητας περιστροφής του στροβίλου.

Επίσης, ο σύγχρονος κινητήρας προώσεως, εκτός από την περιέλιξη συνεχούς ρεύματος, φέρει στο ρότορά του και διάταξη βραχυκυκλωμένου δρομέα, με την οποία εξασφαλίζεται η εκκίνησή του. Κατά την εκκίνηση του κινητήρα, οι περιελίξεις συνεχούς ρεύματος δεν τροφοδοτούνται και εκκινεί ως κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα. Όταν πλησιάζει τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του, αποκαθίσταται η τροφοδότηση της περιελίξεως συνεχούς ρεύματος του ρότορά του και λειτουργεί ως σύγχρονος κινητήρας.

1.4 Χειρισμός και λειτουργία στροβιλοηλεκτρικής προώσεως.

Τα σύστηματα στροβιλοηλεκτρικής προώσεως ή συστήματα ηλεκτρικής προώσεως εναλλασσόμενου ρεύματος, συνήθως χρησιμοποιούν διάταξη τριών χειριστηρίων (σχ. 1.4a), με τα οποία εξασφαλίζεται η εκκίνηση ή αναστροφή της φοράς περιστροφής και η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής της έλικας. Για να διευκολυνθεί η κατανόηση του τρόπου χρησιμοποίησεως και της επενέργειας των τριών χειριστηρίων στα κυκλώματα ηλεκτρικής προώσεως, κρίνεται σκόπιμο να επεξηγηθεί η σημασία των συμβολισμών που χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα της στροβιλοηλεκτρικής προώσεως.

Στο σχήμα 1.4b(a) και (b) βλέπομε αντίστοιχα το συμβολισμό κλειστής και το

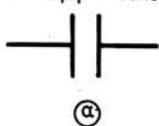


Σχ. 1.4a.

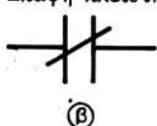
Χειριστήρια στροβιλοηλεκτρικής προώσεως.

- α) Χειριστήρια αναστροφής κινήσεως. β) Χειριστήρια μαγνητικού πεδίου.
γ) Χειριστήρια μεταβολής ταχύτητας.

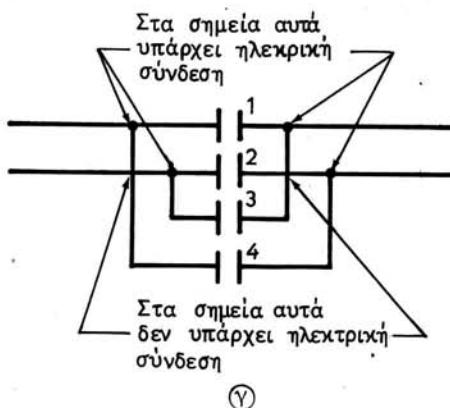
Επαφή ανοικτή



Επαφή κλειστή



ΘΕΣΗ ΔΙΑΚΟΠΤΗ	Ε Π Α Φ Ε Σ			
	1	2	3	4
A	•	•		
B			•	•
Γ				



Σχ. 1.4b.

Ηλεκτρολογικοί συμβολισμοί.

συμβολισμό ανοιχτής επαφής. Στο σχήμα 1.4b(γ) φαίνεται η συνδεσμολογία των τεσσάρων επαφών ενός διακόπτη και το πινακίδιο που δείχνει ποιες επαφές κλείνουν σε κάθε θέση του διακόπτη (η ύπαρξη τελείας στο αντίστοιχο τετραγωνίδιο σημαίνει κλειστή επαφή). Έτσι, όταν ο μοχλός του διακόπτη (χειριστήριο), με τον οποίο χειρίζονται οι επαφές, βρίσκεται στη θέση «Α», τότε κλείνουν οι επαφές «1» και «2», ενώ οι επαφές «3» και «4» παραμένουν ανοικτές. Όταν ο μοχλός του διακόπτη μεταφερθεί στη θέση «Β», ανοίγουν οι επαφές «1» και «2» και κλείνουν οι επαφές «3» και «4», ενώ με τη μεταφορά του μοχλού στη θέση «Γ» ανοίγουν και οι τέσσερες επαφές.

Στο σχήμα 1.4γ φαίνεται τυπικό κύκλωμα στροβιλοηλεκτρικής προώσεως, ο συμβολισμός των τριών χειριστηρίων και τα πινακίδια του συμβολισμού των επαφών που ελέγχονται με το χειριστήριο αναστροφής κινήσεως και το χειριστήριο μαγνητικού πεδίου. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, το χειριστήριο αναστροφής κινήσεως έχει μεταφερθεί **από τη θέση κράτει στη θέση πρόσω** και κλείνουν οι επαφές «3», «4» και «5». Επειδή όμως το χειριστήριο μαγνητικού

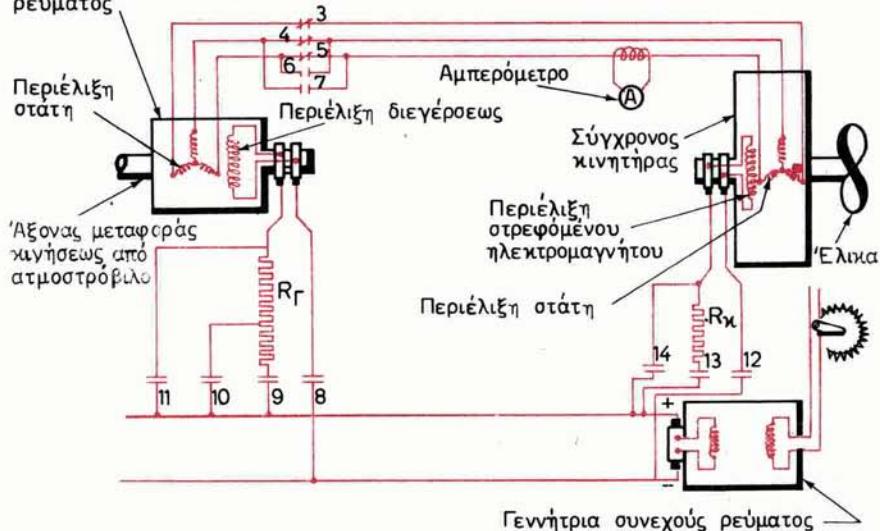
ΧΕΙΡΙΣΤΗΡΙΑ



Θέση χειριστηρίου αναστροφής κινήσεως	Ε Π Α Φ Ε Σ				
	3	4	5	6	7
ΠΡΟΣΩ	●	●	●		
ΚΡΑΤΕΙ					
ΑΝΑΠΟΔΑ	●			●	●

Θέση χειριστηρίου μαγνητικού πεδίου	Ε Π Α Φ Ε Σ						
	8	9	10	11	12	13	14
ΚΡΑΤΕΙ							
1	●	●	●	●	●		
2	●	●	●		●	●	●
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	●	●			●	●	

Γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος

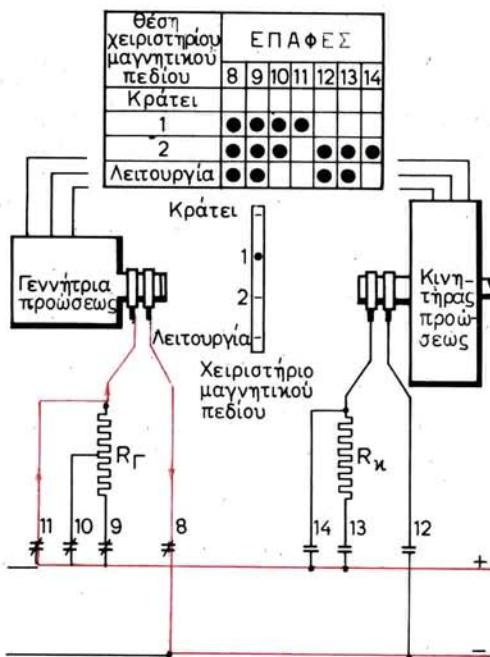


Σχ. 1.4γ.

Τυπικό κύκλωμα στροβιλοθεκτικής προώσεως.

πεδίου θρίσκεται στη θέση «κράτει», οι επαφές «8», «9», «10» και «11» του κυκλώματος διεγέρσεως της γεννήτριας προώσεως είναι ανοικτές, η γεννήτρια δεν παράγει τάση για να τροφοδοτήσει τον κινητήρα προώσεως και ο τελευταίος δεν εκκινεί.

Στο σχήμα 1.4δ φαίνεται το κύκλωμα του σχήματος 1.4γ και το πινακίδιο συμβολισμού των επαφών του χειριστηρίου μαγνητικού πεδίου. Το χειριστήριο έχει μεταφερθεί από τη θέση **κράτει** στη θέση «1». (βλ. και αντιστοιχία στο

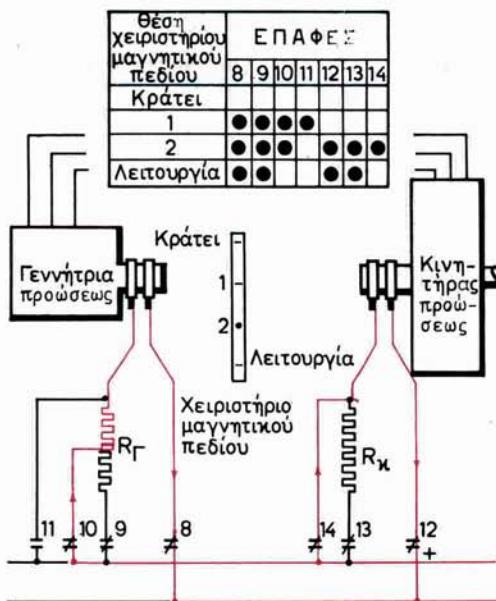


Σχ. 1.4δ.

Εκκίνηση του κινητήρα προώσεως (ως κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα).

σχήμα 1.4γ). Με τη μεταφορά του στη θέση «1» κλείνουν οι επαφές «8», «9», «10» και «11», οπότε η διέγερση της γεννήτριας προώσεως διαρρέεται από μεγάλο ρεύμα, επειδή η αντίσταση R_r βραχυκυκλώνεται από την επαφή «11» (κύκλωμα κόκκινων γραμμών). Η μεταφορά του χειριστήριου μαγνητικού πεδίου στη θέση «1» ονομάζεται υπερδιέγερση της γεννήτριας. Αυτή προκαλεί τη δημιουργία σχετικά υψηλής τάσεως, με την οποία τροφοδοτείται ο κινητήρας προώσεως και εκκινεί με αυξημένη αρχική ροπή, ως κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα, επειδή οι επαφές «12», «13» και «14» είναι ανοικτές και η περιελίξη συνεχούς ρεύματος του δρομέα του δεν τροφοδοτείται.

Στο σχήμα 1.4ε φαίνεται το κύκλωμα του σχήματος 1.4δ, με τη διαφορά ότι το χειριστήριο μαγνητικού πεδίου έχει μεταφερθεί στη θέση «2». Στη θέση αυτή είναι ανοικτή η επαφή «11», οπότε βραχυκυκλώνεται τμήμα της αντιστάσεως R_r και όχι ολόκληρη η R_r όπως στη θέση «1» του χειριστηρίου. Έτσι, η διέγερση της γεννήτριας προώσεως διαρρέεται από μικρότερο ρεύμα από ότι στην περίπτωση του σχήματος 1.4δ (κόκκινες γραμμές του κυκλώματος) και η γεννήτρια λειτουργεί με μειωμένη υπερδιέγερση, οπότε παρέχει λίγο χαμηλότερη τάση από ότι στη θέση «1» στον κινητήρα προώσεως. Ταυτόχρονα όμως κλείνουν και οι επαφές «12», «13» και «14» και αποκαθιστούν την τροφοδότηση της περιελίξης συνεχούς ρεύματος του ρότορα του κινητήρα προώσεως με ρεύμα μεγάλης εντάσεως, (θλέπε κόκκινες γραμμές του κυκλώματος), επειδή η αντίσταση R_k βραχυκυκλώνεται από την κλειστή επαφή «14» και έτσι ο κινητήρας λειτουργεί ως σύγχρονος με υπερδιέγερση. Η λειτουργία σε



Σχ. 1.4ε.

Πρώτο στάδιο λειτουργίας του σύγχρονου κινητήρα.

υπερδιέγερση τόσο της γεννήτριας προώσεως όσο και του κινητήρα εξασφαλίζουν την περίπου σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα με την απαιτούμενη σημαντική ροπή στρέψεως, ώστε να φθάσει τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, πριν το χειριστήριο μαγνητικού πεδίου μεταφερθεί στη θέση **λειτουργία**.

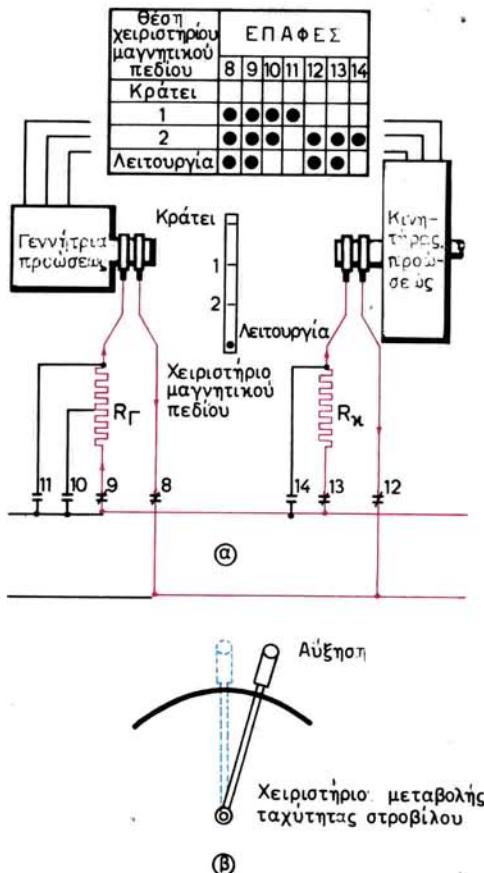
Με τη μεταφορά του χειριστηρίου μαγνητικού πεδίου στη θέση **λειτουργία** [σχ. 1.4σ(α)], ανοίγουν οι επαφές «10» και «14», οπότε αποβραχυκυκλώνονται αντίστοιχα οι αντιστάσεις R_f και R_k (θλέπει κόκκινες γραμμές κυκλωμάτων). Έτσι, η αντίσταση περιορίζει το ρεύμα διεγέρσεως και η γεννήτρια προώσεως παράγει την κανονική τάση για την τροφοδότηση του κινητήρα προώσεως. Ταυτόχρονα η αντίσταση περιορίζει το ρεύμα στην περιέλιξη συνεχούς ρεύματος του ρότορα του κινητήρα προώσεως και αυτός λειτουργεί ως σύγχρονος κινητήρας με κανονική διέγερση και με σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής.

Στη συνέχεια, για την αυξομείωση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα προώσεως (έλικας), αυξομειώνομε την ταχύτητα περιστροφής του ατμοστροβίλου, με το **χειριστήριο μεταβολής ταχύτητας στροβίλου** [σχ. 1.4σ(β)].

Ανακεφαλαίωνοντας τα παραπάνω καταλήγομε στο συμπέρασμα ότι, για το χειρισμό του πλοίου προς την κατεύθυνση του **πρόσω** και του **ανάποδα**, απαιτούνται οι παρακάτω κινήσεις:

a) Κίνηση από το κράτει στο πρόσω.

Αρχικά τα χειριστήρια αναστροφής κινήσεως και μαγνητικού πεδίου βρίσκονται στις θέσεις κράτει, ενώ το χειριστήριο μεταβολής ταχύτητας στροβίλου στη θέση της ελάχιστης ταχύτητας και ο χειρισμός γίνεται με την



Σχ. 1.4στ.
Κανονική λειτουργία σύγχρονου κινητήρα.

ακόλουθη σειρά:

- Μεταφέρομε το **χειριστήριο αναστροφής κινήσεως** από τη θέση **κράτει** στη θέση **πρόσω**.
- Μεταφέρομε το **χειριστήριο μαγνητικού πεδίου** από τη θέση **κράτει** στη θέση «1», και μετά από λίγο στη θέση «2» και μετά στη θέση **λειτουργία**.
- Για την αυξομείωση της ταχύτητας περιστροφής της έλικας χρησιμοποιούμε ανάλογα το **χειριστήριο μεταβολής ταχύτητας στροβίλου**, το οποίο αρχικά βρίσκεται στη θέση ελάχιστης ταχύτητας περιστροφής της έλικας.

6) Κίνηση από το πρόσω στο κράτει.

- Μεταφέρομε το **χειριστήριο μεταβολής ταχύτητας στροβίλου** στη θέση **ελάχιστων στροφών**.
- **Μεταφέρομε το χειριστήριο μαγνητικού πεδίου** από τη θέση **λειτουργία** στη θέση **κράτει**, χωρίς να σταματίσουμε στις ενδιάμεσες θέσεις «1» και «2».
- Μεταφέρομε το **χειριστήριο αναστροφής κινήσεως** από τη θέση **πρόσω** στη θέση **κράτει**.

γ) Κίνηση από το κράτει στο ανάποδα.

Οι χειρισμοί για την κίνηση από το **κράτει** στο **ανάποδα** είναι ίδιοι με της κινήσεως από το **κράτει** στο **πρόσω**, με τη διαφορά ότι μεταφέρομε το **χειριστήριο αναστροφής κινήσεως** από τη θέση **κράτει** στη θέση **ανάποδα**.

δ) Κίνηση από το πρόσω στο ανάποδα ή αντίστροφα.

Για το χειρισμό τέτοιας κινήσεως πρέπει πρώτα να γίνεται η κίνηση του **κράτει**, όπως στην περίπτωση β, πριν την αναστροφή της κινήσεως και μετά πραγματοποιείται η κίνηση από το **κράτει** στο **πρόσω** ή στο **ανάποδα**, όπως στην περίπτωση α και γ αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι τα τρία παραπάνω χειριστήρια της στροβιλοηλεκτρικής προώσεως συνδέονται μεταξύ τους με ειδικό μηχανικό σύστημα από μοχλούς και καστάνιες, το οποίο δεν επιτρέπει μετακινήσεις τους από τις θέσεις που θρίσκονται, αν δεν ακολουθείται μια από τις σειρές μετακινήσεως των παραπάνω περιπτώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΕΩΣ ΠΥΡΚΑΪΑΣ

2.1 Γενικά.

Τα σύγχρονα πλοία διαθέτουν εγκαταστάσεις συστημάτων ανιχνεύσεως πυρκαϊάς, με τα οποία επιτυγχάνεται έγκαιρη ανίχνευση της εστίας πυρκαϊάς σε οποιοδήποτε από τους συγκεκριμένους χώρους τους (διαμερίσματά τους) και η έγκαιρη ειδοποίηση της φυλακής γέφυρας για την εκδήλωσή της και για το συγκεκριμένο χώρο εκδηλώσεώς της. Σε ορισμένες περιπτώσεις το σύστημα ενεργοποιεί αυτόματη εγκατάσταση κατασθέσεως της πυρκαϊάς με νερό, διοξείδιο του άνθρακα ή άλλο κατάλληλο πυροσβεστικό υλικό.

Η αρχή λειτουργίας των συστημάτων ανιχνεύσεως πυρκαϊάς ποικίλει και εξαρτάται από το είδος του ανιχνευτή (ευαίσθητου μηχανισμού) που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του ερεθισμού που δέχεται (ένα από τα αποτελέσματα της πυρκαϊάς) σε ασθενή τάση, σε κλείσιμο επαφών ή σε αποκατάσταση αγωγιμότητας. Με κατάλληλη χρησιμοποίηση (επεξεργασία) της τάσεως αυτής ή της αγωγιμότητας, μπορεί να ενεργοποιούνται ηχητικά και οπτικά μέσα συναγερμού και τα συστήματα κατασθέσεως.

Οι ανιχνευτές οφείλουν το ονομά τους στο προϊόν της πυρκαϊάς που προκαλεί τον ερεθισμό τους και οι τύποι ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται, είναι οι εξής:

a) **Ανιχνευτές καπνού.**

Οι ανιχνευτές καπνού διεγείρονται, όταν καπνός από το χώρο που εκδηλώνεται πυρκαϊά εισχωρήσει σε ειδικό κιβώτιο που φωτίζεται κατάλληλα και προκαλεί απορρόφηση ή διάθλαση φωτός, από το οποίο ερεθίζεται φωτοευαίσθητος μηχανισμός (φωτολυχνία, φωτοστοιχείο, φωτοδίοδος ή φωτοτρανζίστορ).

b) **Θερμοδιαφορικοί ανιχνευτές.**

Οι θερμοδιαφορικοί ανιχνευτές διεγείρονται κυρίως από την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλεί κλείσιμο διμεταλλικών επαφών, όταν η αύξηση της θερμοκρασίας υπερβεί ορισμένη τιμή (θαυμούς C°) ανά λεπτό.

γ) **Ανιχνευτές ιονισμού.**

Οι ανιχνευτές ιονισμού διεγείρονται, όταν τα ορατά και τα αόρατα καυσαέρια της πυρκαϊάς εισχωρήσουν στους ειδικούς θαλάμους τους και μεταβάλλουν την ισορροπία ιονισμού. Οι ανιχνευτές αυτοί παρουσιάζουν το μειονέκτημα ότι

διεγέρονται άσκοπα και από καυσαέρια που μπορεί να μην προέρχονται από πυρκαϊά, για παράδειγμα από το κάπνισμα και από εισροή καυσαερίων στο χώρο που ελέγχεται, ειδικά όταν παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία.

δ) Ηλεκτρικοί ανιχνευτές φλογών.

Οι ηλεκτρικοί ανιχνευτές φλογών διεγέρονται από την υπέρυθρη ακτινοβολία των φλογών. Παρουσιάζουν τα μειονεκτήματα της καθυστερημένης διεγέρσεως (απαιτείται ισχυρή ακτινοβολία), της μικρής εκτάσεως που μπορούν να καλύπτουν και του μεγάλου τους κόστους.

ε) Ανιχνευτές μέγιστης θερμοκρασίας.

Οι ανιχνευτές μέγιστης θερμοκρασίας διεγέρονται, όταν η θερμοκρασία του αέρα στο χώρο που ελέγχουν υπερβεί ένα ορισμένο μέγιστο όριο. Παρουσιάζουν τα μειονεκτήματα της καθυστερημένης διεγέρσεως και το πρόβλημα της ρυθμίσεως του μέγιστου ορίου θερμοκρασίας, λόγω της διαφοράς της θερμοκρασίας που κάθε φορά βρίσκεται το πλοίο.

Έτσι, οι εγκαταστάσεις των συστημάτων ανιχνεύσεως πυρκαϊάς των πλοίων συνήθως χρησιμοποιούν ανιχνευτές καπνού και θερμοδιαφορικούς ανιχνευτές.

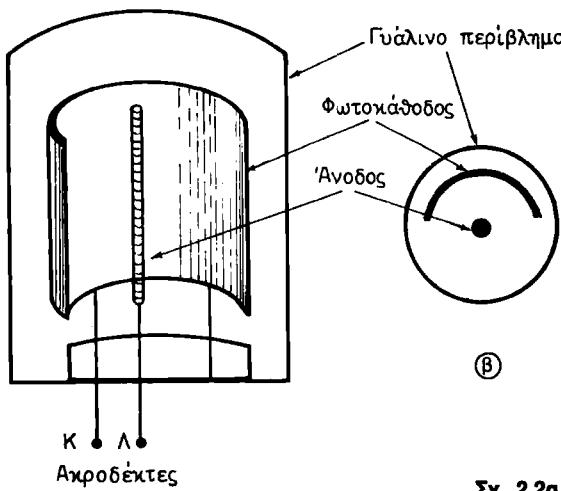
2.2 Οι ανιχνευτές καπνού.

Όπως είπαμε, οι φωτοευαίσθητοι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται ως ανιχνευτές καπνού, είναι η φωτολυχνία, το φωτοστοιχείο, η φωτοδίοδος και το φωτοτρανζίστορ.

α) Η φωτολυχνία.

Η λειτουργία της φωτολυχνίας (phototube) που είναι γνωστή και ως **στοιχείο φωτοεκπομπής** (photoemissive cell) βασίζεται στο **φωτολεκτρικό φαινόμενο** (βλ. ΦΥΣΙΚΗ II, τόμος Α', § 2.2γ).

Η φωτολυχνία [σχ. 2.2α(α)], αποτελείται από γυάλινο περίβλημα υψηλού

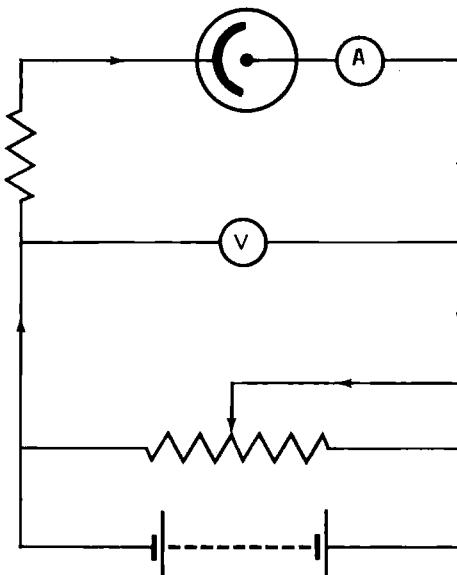


Σχ. 2.2α.
α) Τομή φωτολυχνίας. β) Συμβολισμός φωτολυχνίας.

κενού, στο οποίο περιέχονται η κάθοδος και η άνοδος. Η κάθοδος (φωτοκάθοδος) αποτελείται από χαλύβδινη ή νικελένια πλάκα που έχει καμφθεί σε σχήμα τυμήματος κυλίνδρου, στης οποίας την κοίλη επιφάνεια θρίσκεται το φωτοευαίσθητο υλικό. Στον άξονα που αντιστοιχεί στην τομή κυλίνδρου της καθόδου θρίσκεται η μεταλλική άνοδος, που έχει σχήμα ράθδου με διάμετρο μικρότερη από 1 mm, ώστε να μη σκιάζει σημαντική έκταση της φωτοευαίσθητης επιφάνειας της καθόδου. Σε ένα συνήθη τύπο φωτοκαθόδου, το φωτοευαίσθητο υλικό αποτελείται από στρώμα οξειδίου του αργύρου, που καλύπτεται με λεπτό στρώμα καισίου. Αυτή είναι γνωστή ως φωτοκάθοδος AgO-Cs και είναι περισσότερο ευαίσθητη στην περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Ένας άλλος τύπος φωτοκαθόδου που χρησιμοποιείται αρκετά, αντί του οξειδίου του αργύρου χρησιμοποιεί στρώμα από αντιμόνιο. Αυτή είναι γνωστή ως φωτοκάθοδος Sb-Cs και είναι περισσότερο ευαίσθητη στην περιοχή του ιώδους.

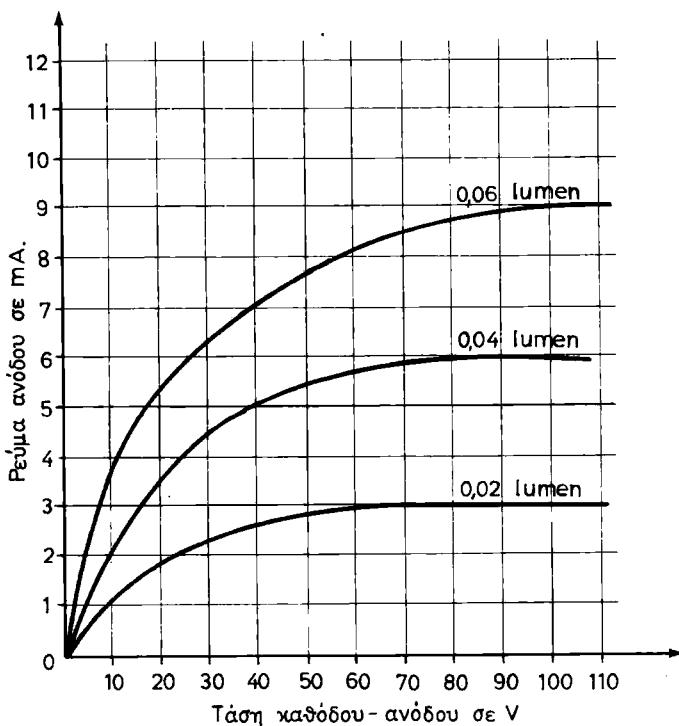
Στο σχήμα 2.26 φαίνεται το κύκλωμα, με το οποίο γίνονται οι μετρήσεις των τάσεων καθόδου-ανόδου και των αντιστοίχων ρευμάτων, για την χάραξη των αντιστοίχων χαρακτηριστικών της φωτολυχνίας, για ορισμένες τιμές φωτεινής ροής. Οι τιμές της τάσεως καθόδου-ανόδου προκύπτουν, αν από την κάθε ένδειξη του θολτομέτρου αφαιρείται η πτώση τάσεως IR που προκαλείται λόγω του ρεύματος της φωτολυχνίας στην αντίσταση R . Με την αντίσταση R που παρεμβάλλεται σε σειρά στο κύκλωμα καθόδου-ανόδου της φωτολυχνίας, εξασφαλίζεται η προστασία της φωτολυχνίας υπό υπερβολική αύξηση του ρεύματος σε περίπτωση ιονισμού.

Στο σχήμα 2.27 φαίνονται χαρακτηριστικές ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση καθόδου-ανόδου της φωτολυχνίας. Για ορισμένη φωτεινή ροή, το ρεύμα



Σχ. 2.26.

Κύκλωμα μετρήσεων για τη χάραξη της χαρακτηριστικής του ρεύματος ανόδου σε συνάρτηση με την τάση καθόδου-ανόδου της φωτολυχνίας.



Σχ. 2.2γ.

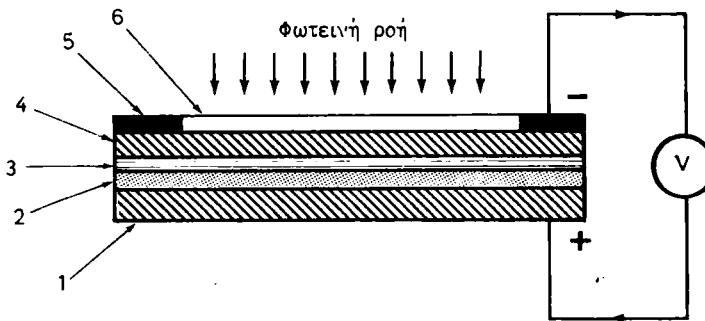
Χαρακτηριστικές ρεύματος ανόδου φωτολυχνίας σε συνάρτηση με την τάση καθόδου-ανόδου για τρεις διαφορετικές τιμές φωτεινής ροής.

της φωτολυχνίας αρχικά ακολουθεί την αύξηση της τάσεως και το μέγεθος της μεταβολής του εξαρτάται από το σχήμα της καθόδου και της ανόδου και τη μεταξύ τους απόσταση. Όταν η τάση καθόδου-ανόδου υπερβεί τα 60 V, το ρεύμα λαμβάνει την τιμή κορεσμού, επειδή όλα τα φωτοηλεκτρόνια που εκλύονται από τη φωτοκάθιδο έλκονται από την άνοδο. Από τις χαρακτηριστικές του σχήματος 2.2γ προκύπτει ότι το ρεύμα είναι ανάλογο της φωτεινής ροής που προσπίπτει στην φωτοκάθιδο.

Εκτός από τις φωτολυχνίες κενού, χρησιμοποιούνται και οι φωτολυχνίες αερίου, με τις οποίες εξασφαλίζονται μεγαλύτερα ρεύματα. Τα μεγαλύτερα ρεύματα προκύπτουν από τον ιονισμό του αερίου (αργό ή νέο), με το οποίο έχει γεμισθεί ο χώρος του περιβλήματος της φωτολυχνίας.

6) Το φωτοστοιχείο.

Η λειτουργία του φωτοστοιχείου (photocell) που είναι γνωστό και ως **φωτοηλεκτρικό στοιχείο** (photoelectric cell) ή **φωτοβολταϊκό στοιχείο** (photovoltaic cell), βασίζεται στην ιδιότητα που παρατηρείται στους ημιαγωγούς, να αποδεσμεύουν ηλεκτρόνια από άτομά τους, όταν διεγείρονται από φωτεινή ροή που προσπίπτει σ' αυτούς. Οι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται περισσότερο στην κατασκευή φωτοστοιχείων και ονομάζονται **ενεργά υλικά**, είναι το σελήνιο και τα χαλκούχα οξείδια.



Σχ. 2.2δ.

Φωτοστοιχείο σεληνίου.

- 1) Πλάκα σιδήρου. 2) Επίστρωση σεληνίου. 3) Περιοχή απογυμνώσεως. 4) Λεπτή πλάκα από διαφανές μέταλλο. 5) Δακτύλιος συνδεσμολογίας. 6) Διαφανής θυρίδα.

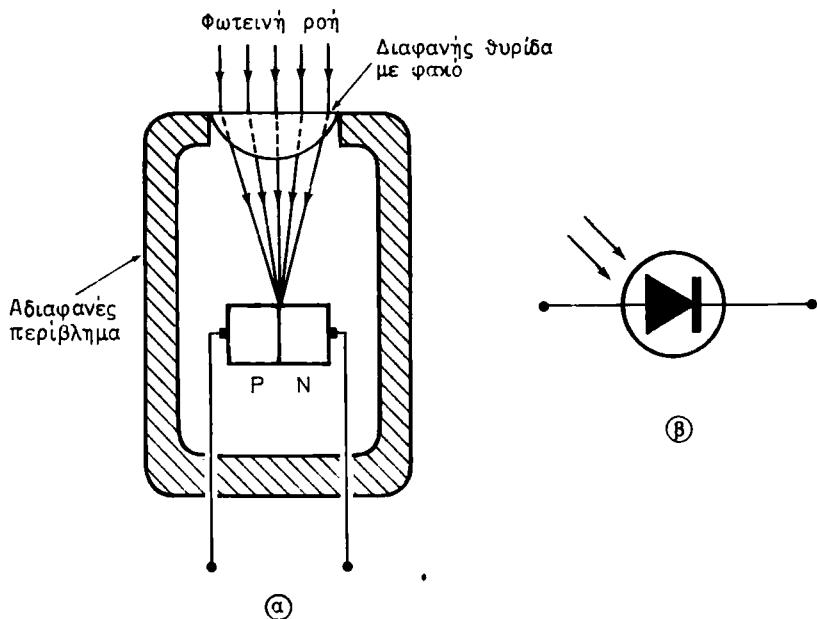
Στο σχήμα 2.2δ φαίνεται τομή φωτοστοιχείου που χρησιμοποιεί ως ενεργό υλικό το σελήνιο. Το σελήνιο προσαρμόζεται ως επίχρισμα επάνω σε πλάκα από σίδηρο με θέρμανση στους 200°C και αφού ψυχθεί θερμαίνεται για δεύτερη φορά στους 80°C , για να αποκτήσει την κρυσταλλική μορφή. Το επίχρισμα σεληνίου καλύπτεται από λεπτή διαφανή μεταλλική πλάκα. Πάνω από αυτή προσαρμόζεται κάλυμμα με διαφανή θυρίδα, που φέρει στα άκρα του δακτύλιο. Αυτός χρησιμεύει ως ακροδέκτης του αρνητικού πόλου του φωτοστοιχείου, ενώ ως θετικός πόλος του χρησιμεύει η πλάκα σιδήρου.

Στην επαφή του στρώματος σεληνίου και της λεπτής διαφανούς μεταλλικής πλάκας δημιουργείται περιοχή απογυμνώσεως (θλ. ΦΥΣΙΚΗ II, τόμος Α', § 3.7). Όταν στην επιφάνεια του σεληνίου προσπίπτει φωτεινή ροή, προκαλείται η απόσπαση ηλεκτρονίων από άτομά του, τα οποία διαπερνούν το στρώμα της περιοχής απογυμνώσεως και μέσω της διαφανούς μεταλλικής πλάκας καταλήγουν στο δακτύλιο συνδεσμολογίας. Αυτή η μεταφορά ηλεκτρονίων δημιουργεί τη διαφορά δυναμικού που εμφανίζεται στους παραπάνω πόλους του φωτοστοιχείου και διαπιστώνεται από την ένδειξη του βολτομέτρου. Η μικρή αυτή διαφορά δυναμικού είναι ανάλογη με την ένταση της φωτεινής ροής που προσπίπτει στη φωτευαίσθητη επιφάνεια σεληνίου. Με κατάλληλη ενίσχυση της, μπορεί να ενεργοποιεί ηλεκτρονόμο, με του οποίου τις επαφές μπορεί να αποκαθίσταται ή να διακόπτεται η λειτουργία οποιουδήποτε κυκλώματος.

γ) Η φωτοδίοδος.

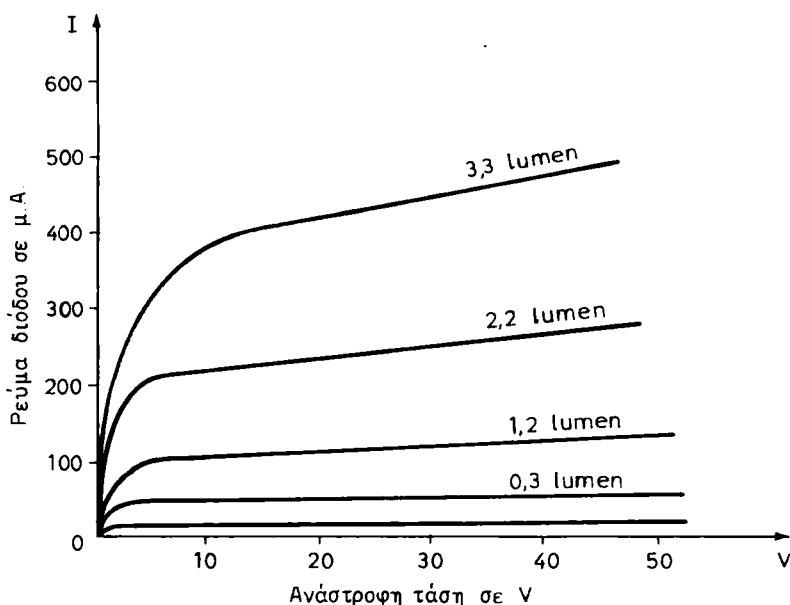
Η λειτουργία της φωτοδιόδου βασίζεται στο φαινόμενο που παρατηρείται στα κρύσταλλα (ημιαγωγούς) γερμανίου, πυριτίου και άλλα, να διασπώνται οι ομοιοπολικοί δεσμοί του κρυσταλλικού πλέγματος από την ενέργεια φωτεινής ροής που προσπίπτει σ' αυτά και να δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών (ΦΥΣΙΚΗ II, τόμος Α', § 3.7).

Η φωτοδίοδος [σχ. 2.2ε(α)] είναι κρυσταλλοδίοδος P-N, της οποίας το περιθλήμα είναι αδιαφανές και σε κατάλληλη έκτασή του φέρει διαφανή θυρίδα με φακό που εστιάζει ακτίνες φωτός στην περιοχή απογυμνώσεως. Το σύνολο αυτό της φωτοδιόδου, της οποίας ο συμβολισμός φαίνεται στο σχήμα 2.2ε(β), αποκτά όγκο με διαστάσεις κλάσματος του cm.



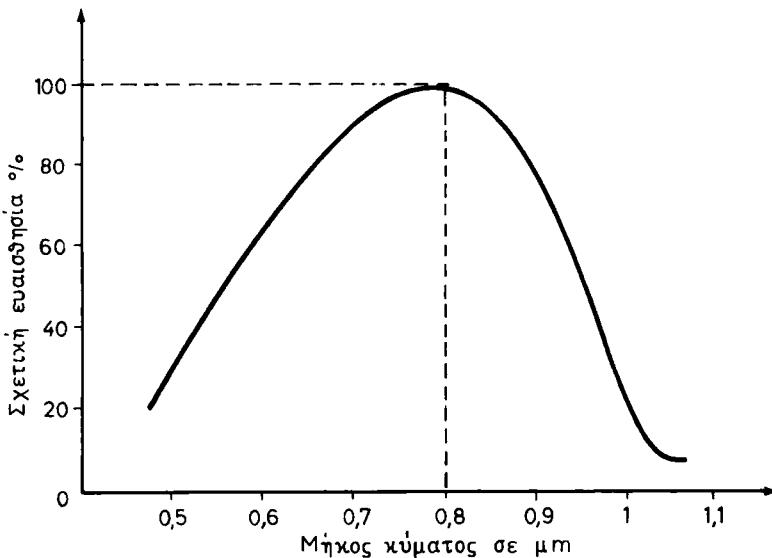
Σχ. 2.2ε.

α) Κατασκευή της φωτοδιόδου. β) Συμβολισμός της φωτοδιόδου.



Σχ. 2.2στ.

Χαρακτηριστικές ρεύματος της φωτοδιόδου σε συνάρτηση με την ανάστροφη τάση.



Σχ. 2.2ζ.

Μεταβολή της σχετικής ευαισθησίας της φωτοδιόδου σε συνάρτηση με το μήκος κύματος, για σταθερή φωτεινή ροή και σταθερή ανάστροφη η τάση.

Η φωτοδιόδος λειτουργεί με ανάστροφη πόλωση και όταν σ' αυτήν δεν προσπίπτει φως (δεν διεγείρεται), διαρρέεται από ένα πολύ μικρό ανάστροφο σταθερό ρεύμα που είναι γνωστό ως ρεύμα σκότους (σχ. 2.2στ.). Όταν η φωτοδιόδος προσβάλλεται από δέσμη φωτός, με ενέργεια αρκετή για να διασπώνται όμοιοι πολικοί δεσμοί των ημιαγωγών, στην περιοχή απογυμνώσεως δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών, τα οποία προστίθενται στα αρχικά (στους φορείς μειονότητας) και το ανάστροφο ρεύμα της φωτοδιόδου αυξάνεται σημαντικά.

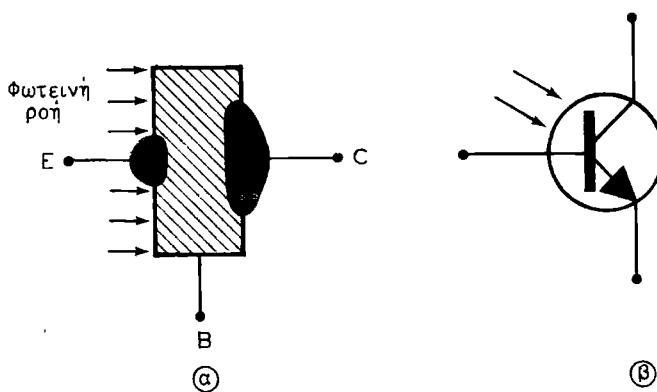
Η τιμή του ανάστροφου ρεύματος εξαρτάται από το είδος της φωτοδιόδου, από τη φωτεινή ροή και το μήκος κύματος της δέσμης φωτός που εστιάζεται στη φωτοδιόδο (σχήματα 2.2στ και 2.2ζ).

Η καμπύλη του σχήματος 2.2ζ είναι γνωστή και ως **καμπύλη φασματικής ευαισθησίας** της φωτοδιόδου, από την οποία φαίνεται το μήκος κύματος (ή συχνότητα) της ακτινοβολίας, στο οποίο η φωτοδιόδος είναι περισσότερο ευαίσθητη.

δ) Το φωτοτρανζίστορ.

Η λειτουργία του φωτοτρανζίστορ βασίζεται στο ίδιο φαινόμενο με τη λειτουργία της φωτοδιόδου.

Η κατάσκευή του φωτοτρανζίστορ [σχ. 2.2η(α)] είναι όμοια με αυτή του κοινού τρανζίστορ (βλ. ΦΥΣΙΚΗ II, τόμος Α', § 3.11, 3.12 και 3.14), με τη διαφορά ότι το περιβλημά του φέρει μικρή διαφανή θυρίδα, από την οποία μπορεί να διέρχεται φωτεινή ροή. Η ροή αυτή προσπίπτει στην έκταση του κρυστάλλου (ημιαγωγού) της βάσεως, κατευθύνεται προς την επαφή βάσεως συλλέκτη και δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών στο κρύσταλλο της βάσεως, που

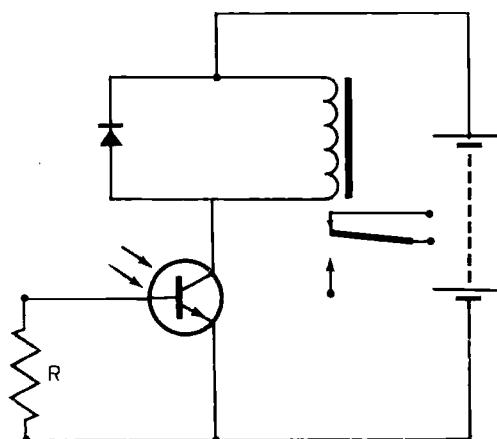


Σχ. 2.2η.

α) Τομή φωτοτρανζίστορ. β) Συμβολισμός του φωτοτρανζίστορ.

συνεπάγεται την εμφάνιση ρεύματος συλλέκτη. Ο αριθμός των ζευγών ηλεκτρονίων και οπών που ελευθερώνονται, είναι ανάλογος της εντάσεως της φωτεινής ροής που προσθάλλει το κρύσταλλο της βάσεως. Έτσι, ανάλογο με την ένταση της φωτεινής ροής είναι και το ρεύμα συλλέκτη του φωτοτρανζίστορ, μέχρι το σημείο που μπορεί να παρατηρηθεί το φαινόμενο της χιονοστιβάδας.

Στο σχήμα 2.2θ φαίνεται κύκλωμα ενεργοποίησεως και απενεργοποίησεως ηλεκτρονόμου με φωτοτρανζίστορ τύπου NPN, όπου η αντίσταση R μεταξύ του κοινού εκπομπού και της βάσεως, που είναι της τάξεως των $5k\Omega$, αυξάνει την ευαισθησία του φωτοτρανζίστορ. Όταν στη διαφανή θυρίδα του φωτοτρανζίστορ προσπίπτει φωτεινή ροή, δημιουργείται ρεύμα συλλέκτη, το οποίο διαρρέει το πηνίο του ηλεκτρονόμου. Αυτός ενεργοποιείται και η κινητή επαφή του κλείνει με την άνω σταθερή και αποκαθίσταται το κύκλωμα στο οποίο



Σχ. 2.2θ.

Κύκλωμα ενεργοποίησης ηλεκτρονόμου με φωτοτρανζίστορ.

παρεμβάλλονται οι δυο αυτές επαφές. Όταν στη θυρίδα πάψει να προσπίπτει φωτεινή ροή, το ρεύμα συλλέκτη διακόπτεται. Έτσι, το πηνίο του ηλεκτρονόμου δεν διαρρέεται από ρεύμα, αυτός απενεργοποιείται και η κινητή επαφή του μετακινείται στην κάτω σταθερή επαφή και διακόπτεται το κύκλωμα, στο οποίο παρεμβάλλονται η άνω σταθερή και η κινητή επαφή του ηλεκτρονόμου. Ταυτόχρονα μπορεί να αποκατασταθεί δεύτερο κύκλωμα, στο οποίο θα παρεμβάλλονται η κάτω σταθερή και η κινητή επαφή του ηλεκτρονόμου.

Η δίοδος, που συνδέεται παράλληλα με το πηνίο του ηλεκτρονόμου, επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος λόγω αυτεπαγωγής (επιρρεύματος διακοπής) του πηνίου από τον κλάδο της, όταν διακόπτεται η προσβολή του φωτοτρανζίστορ από τη φωτεινή ροή και διακόπτεται το ρεύμα συλλέκτη. Έτσι, το ρεύμα στο πηνίο ελαττώνεται με αργό ρυθμό και δεν αναπτύσσεται υψηλή αυτεπαγωγική ΗΕΔ, που θα κατάστρεφε το φωτοτρανζίστορ.

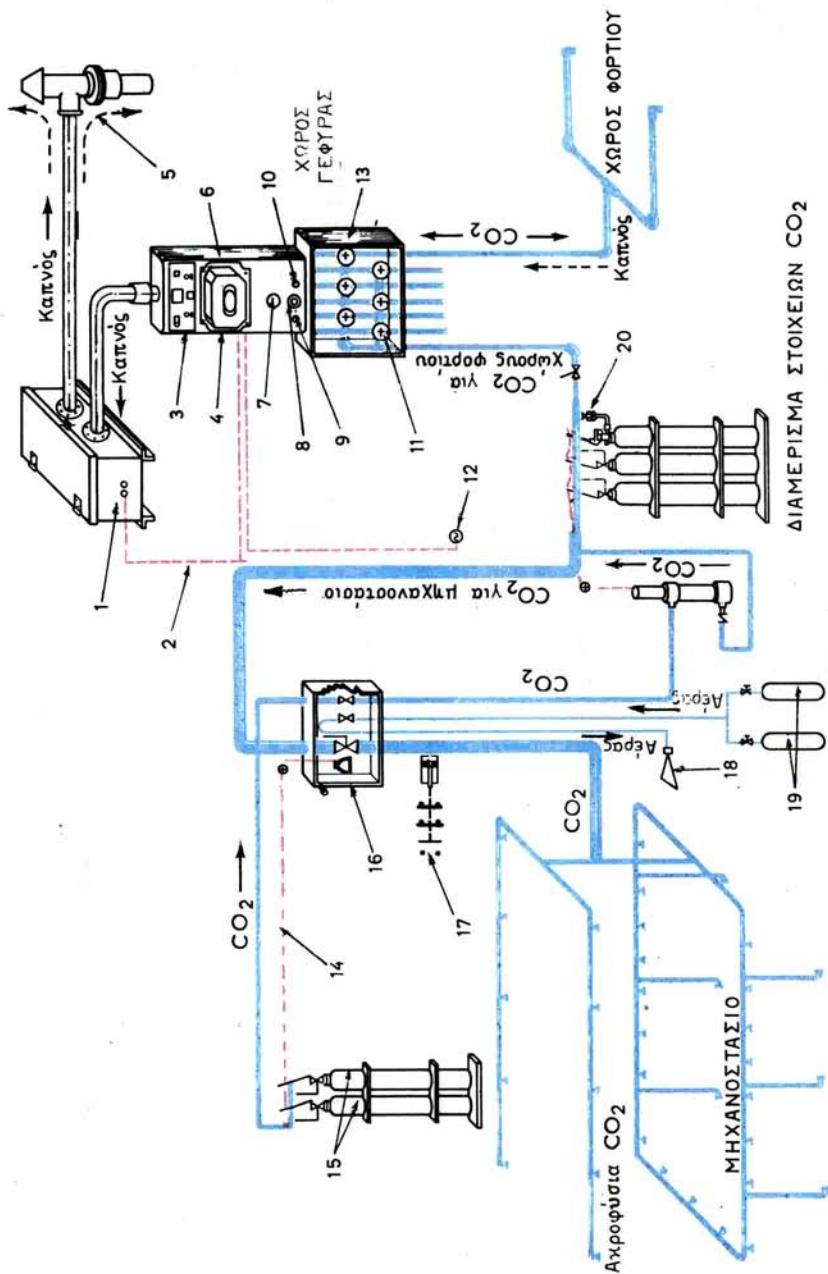
Η μέγιστη ευαισθησία του φωτοτρανζίστορ γερμανίου παρατηρείται σε μήκος κύματος 1,5 μμ περίπου που αντιστοιχεί στην περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας, ενώ η μέγιστη ευαισθησία του φωτοτρανζίστορ πυριτίου παρατηρείται σε μήκος κύματος 0,85 μμ περίπου που είναι λίγο μεγαλύτερο από το μήκος κύματος της περιοχής του ερυθρού.

2.3 Σύστημα ανιχνεύσεως και κατασθέσεως πυρκαϊάς με ανιχνευτή καπνού.

Τυπικό διάγραμμα εγκαταστάσεως συστήματος ανιχνεύσεως και κατασθέσεως πυρκαϊάς εμπορικού πλοίου με ανιχνευτή καπνού φαίνεται στο σχήμα 2.3a. Στο χώρο της γέφυρας του πλοίου βρίσκεται στερεωμένο το κιβώτιο εξαεριστήρα. Το κιβώτιο αυτό συνδέεται με σωλήνες με τους χώρους των διαμερισμάτων του πλοίου που προστατεύονται, από τους οποίους χώρους αναρροφάται αέρας. Το μεγαλύτερο ποσό του αέρα που αναρροφάται καταθλίβεται στην ατμόσφαιρα, ενώ μικρό μέρος του καταθλίβεται στο χώρο της γέφυρας και με αυτό μήπορει να διαπιστώνεται εύκολα η συνεχής λειτουργία του εξαεριστήρα.

Οι σωλήνες, με τους οποίους αναρροφάται αέρας από τους χώρους των προστατευόμενων διαμερισμάτων, διέρχονται από το **κιβώτιο βαλθίδων ελέγχου συστήματος ανιχνεύσεως καπνού και κατασθέσεως πυρκαϊάς με CO₂** και από τον **ηχητικό και οπτικό ανιχνευτή καπνού**. Τα τμήματα των σωλήνων αυτών, που βρίσκονται μέσα στον ηχητικό και οπτικό ανιχνευτή καπνού, είναι γυάλινα διαφανή και διαπερνούνται από δέσμη ακτίνων φωτός όταν αναρροφάται καθαρός αέρας, ενώ δεν διαπερνούνται όταν αναρροφάται καπνός. Ο ηχητικός και οπτικός ανιχνευτής αποτελείται από φωτοευαίσθητο ανιχνευτή καπνού (φωτολυχνία, φωτοστοιχείο, φωτοδίοδο, φωτοτρανζίστορ), στον οποίο εστιάζεται συνέχεια δέσμη ακτίνων φωτός από φωτιστική λυχνία μέσω των παραπάνω γυάλινων τμημάτων των σωλήνων αναρροφήσεως αέρα. Έτσι, ο ανιχνευτής καπνού διεγείρεται συνέχεια και δημιουργείται ρεύμα, με το οποίο τροφοδοτείται το πηνίο ηλεκτρονόμου του οποίου οι επαφές διατηρούνται ανοικτές και δεν τροφοδοτείται η σειρήνα και η ενδεικτική λυχνία πυρκαϊάς.

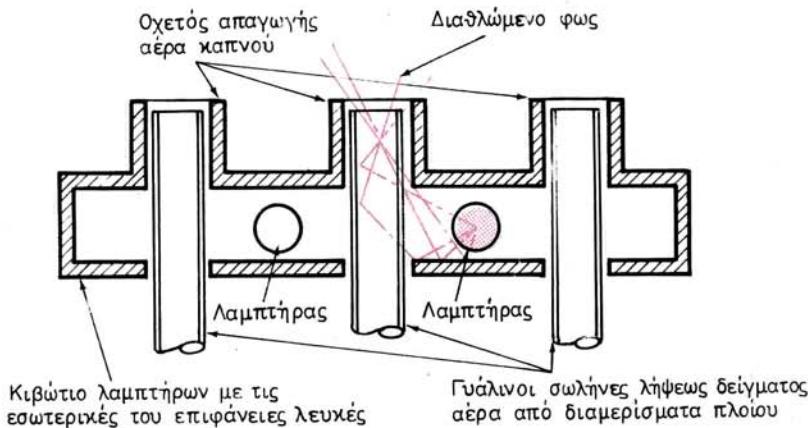
Με την εμφάνιση καπνού στο χώρο κάποιου διαμερίσματος (για παράδειγμα σε χώρο φορτίου) λόγω εκδηλώσεως πυρκαϊάς, θα αναρροφηθεί καπνός από τον εξαεριστήρα του συστήματος, ο οποίος θα διέρχεται από το γυάλινο



Σχ. 2.3a.

Διάγραμμα συστήματος ανιχνεύσεως πυρκαϊδί με ανιχνευτή καπνού και κατασθέσεως

- πυρκαϊδί με CO₂ του μηχανοστασίου και ενός χώρου φορτίου εμπορικού πλοίου.
- Εξαεριστήρας.
 - Καλαδιώδεις.
 - Ηχητική μονάδα.
 - Οπτική μονάδα.
 - Κατθλώψη αέρα προς το χώρο της γέφυρας.
 - Ηχητικός και οπτικός ανιχνευτής καπνού.
 - Σειρήνα.
 - Διακόπτης εξαεριστήρα και λαμπτήρων φωτισμού ανιχνευτή καπνού.
 - Ενδεικτική λυχνία εξαεριστήρα.
 - Πεζόμετρο διακόπτης διακοπής.
 - Τρίοδος βαλβίδες.
 - Σειρήνα συμπλόκου σημαγερμού σε δάλο χώρου.
 - Κιθώτιο βαλβίδων ελέγχου συστήματος ανιχνεύσεως καπνού και κατασθέσεως πηγή πυρκαϊδί με CO₂.
 - Συρματόσχοινο.
 - Φιάλες CO₂.
 - Πιεσοστατικός διακόπτης CO₂ για την πηγή εκκίνησης.
 - Κιθώτιο ασφαλτεσών κύριας βαλβίδας κατακίνησης του μηχανοστασίου με CO₂.
 - Σειρήνα που λειτουργεί με πεπιεσμένο αέρα.
 - Φιάλες αέρα για την εκκίνηση.
 - Ανεπίστροφη βαλβίδα.



Σχ. 2.36.

Διάταξη κιθωτίου λαμπτήρων με σωλήνες αναρροφήσεως καπνού.

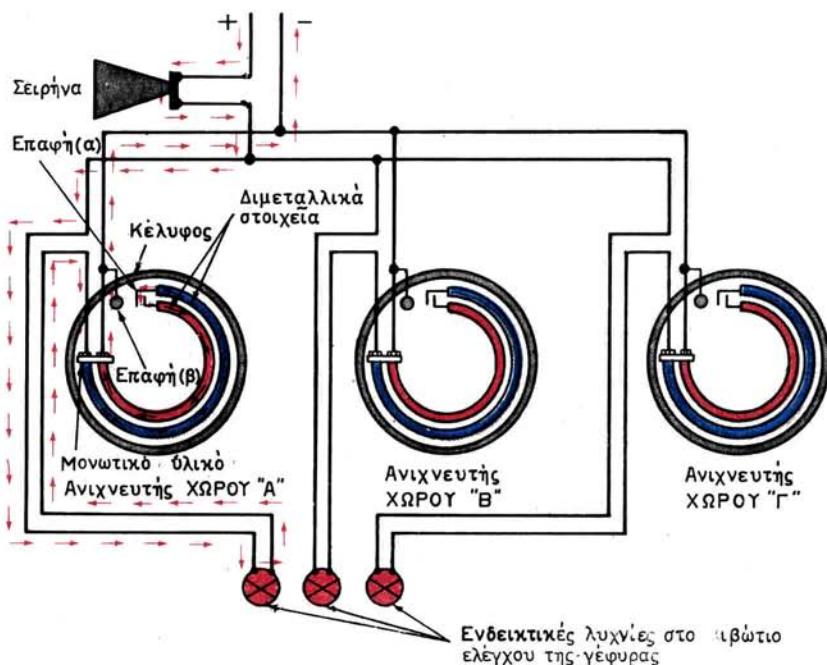
διαφανές τμήμα του σωλήνα που βρίσκεται στον ηχητικό και οπτικό ανιχνευτή.

Ο καπνός που περνά από το τμήμα αυτό του σωλήνα δεν επιτρέπει τον παραπάνω φωτισμό στο φωτοευαίσθητο ανιχνευτή καπνού, αυτός δεν διεγείρεται, δεν δημιουργείται ρεύμα, διακόπτεται η τροφοδότηση του πηνίου του ηλεκτρονόμου, του οποίου οι επαφές κλείνουν και τροφοδοτούν τη σειρήνα και την ενδεικτική λυχνία συναγερμού. Καθώς στο διαφανές γυάλινο τμήμα κάθε σωλήνα αναρροφήσεως υπάρχει πινακίδα του διαμερίσματος, από το οποίο αναρροφά αέρα, μπορούμε να εντοπίσουμε το διάμερισμα στο οποίο έχει εκδηλωθεί πυρκαϊά, επειδή ο αντίστοιχος σωλήνας θα είναι σκοτεινός, λόγω του καπνού που αναρροφάται μ' αυτόν (σχ. 2.36).

Στο σχήμα 2.3a φαίνονται ορισμένες λεπτομέρειες μέρους του συστήματος ανιχνεύσεως και του δικτύου CO_2 για την κατάσθετη της πυρκαϊάς. Οι λεπτομέρειες των υπολοίπων διαμερισμάτων είναι όμοιες με αυτές των διαμερισμάτων που φαίνονται.

2.4 Σύστημα ανιχνεύσεως πυρκαϊάς με θερμοδιαφορικούς ανιχνευτές.

Οι θερμοδιαφορικοί ανιχνευτές αποτελούνται από δυο διμεταλλικά κυκλικά στοιχεία (ράθδους) διαφορετικής διαμέτρου (σχ. 2.4a) που παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στο συντελεστή θερμικής διαστολής. Τα δυο άκρα των στοιχείων αυτών στερεώνονται σε μονωτικό υλικό και αποτελούν τους ακροδέκτες συνδέσεως του ανιχνευτή στο κύκλωμα του συστήματος, ενώ τα άλλα δυο άκρα φέρουν επαφές «a» από πλατίνα. Το εσωτερικό διμεταλλικό κυκλικό στοιχείο έχει το μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής διαστολής και με την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας των δυο στοιχείων κατά ορισμένους βαθμούς κελσίου ανά λεπτό επιμηκύνεται πολύ περισσότερο από το εξωτερικό, οπότε κλείνουν οι επαφές «a». Όταν η αύξηση της θερμοκρασίας είναι βραδεία, τα δυο στοιχεία διαστέλλονται ομοιόμορφα, οπότε δεν κλείνουν οι επαφές «a». Όμως, επειδή η θερμοκρασία συνεχίζει να αυξάνεται, όταν



Σχ. 2.4α.

Σύστημα ανιχνεύσεως πυρκαϊάς με θερμοδιαφορικούς ανιχνευτές.

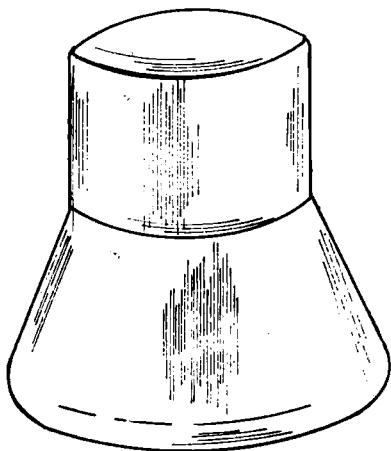
αυξηθεί σημαντικά, η επαφή που φέρει στο άκρο του το εξωτερικό στοιχείο θα κλείσει με την επαφή «β» λόγω της μεγάλης διαστολής (επιμήκυνση) τους.

Αυτά τα δύο στοιχεία με τις επαφές προσαρμόζονται σε περίβλημα, το οποίο έχει εξωτερική μορφή σαν αυτή στο σχήμα 2.4β που επιτρέπει την εύκολη εγκατάσταση των θερμοδιαφορικών ανιχνευτών στην οροφή του χώρου που προστατεύεται, αλλά και εξασφαλίζει τη συγκέντρωση μεγαλύτερου ποσού θερμότητας στα διμεταλλικά στοιχεία. Οι ανιχνευτές των χώρων του πλοίου που προστατεύονται συνδέονται με πηγή τροφοδοτήσεως, με κοινή σειρήνα συναγερμού και ξεχωριστή ενδεικτική λυχνία, όπως στο σχήμα 2.4α. Επειδή η έκταση (εμβαδό), που καλύπτει κάθε θερμοδιαφορικός ανιχνευτής είναι περιορισμένη, στην οροφή χώρων μεγάλου εμβαδού εγκαθίσταται ανάλογος αριθμός τέτοιων ανιχνευτών.

Η λειτουργία του συστήματος ανιχνεύσεως πυρκαϊάς με θερμοδιαφορικούς ανιχνευτές (σχ. 2.4α), έχει ως εξής:

Εφόσον σε κανέναν από τους χώρους του πλοίου που προστατεύονται δεν έχει εκδηλωθεί πυρκαϊά, που θα προκαλούσε απότομη αύξηση της θερμοκρασίας, η θερμοκρασία όλων των χώρων είναι χαμηλή και πρακτικά διατηρείται σταθερή. Έτσι, τα δύο κυκλικά διμεταλλικά στοιχεία έχουν την ίδια χαμηλή θερμοκρασία, δεν παρουσιάζουν επιμήκυνση και οι επαφές «α» και «β» είναι ανοιχτές, οπότε δεν τροφοδοτείται ούτε η σειρήνα ούτε η ενδεικτική λυχνία.

Όταν σε ένα προστατευόμενο χώρο (χώρος Α του σχήματος 2.4β) εκδηλωθεί πυρκαϊά, από την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας που θα προκαλέσει,



Σχ. 2.48.

Η εξωτερική μορφή του θερμοδιαφορικού ανιχνευτή.

κλείνει η επαφή «α», οπότε τροφοδοτείται η σειρήνα και η ενδεικτική λυχνία του αντίστοιχου χώρου (κύκλωμα με θέλη στο σχήμα 2.4a).

Αν εκδηλωθεί πυρκαϊά που δεν επεκτείνεται με μεγάλη ταχύτητα, επειδή και τα δυο διμεταλλικά κυκλικά στοιχεία επιμηκύνονται ισόποσα και με την ίδια ταχύτητα δεν θα κλείσει η επαφή «α», αλλά αφού μετά από αρκετό χρόνο η θερμοκρασία αυξηθεί σημαντικά, θα κλείσει η επαφή (β) οπότε θα τροφοδοτηθεί η σειρήνα και η ενδεικτική λυχνία του αντίστοιχου χώρου.

Καθώς με την κατάσθεση της πυρκαϊάς κατέρχεται και η θερμοκρασία του χώρου, οπότε τα δυο διμεταλλικά στοιχεία του θερμοδιαφορικού ανιχνευτή συστέλλονται, η επαφή «α» ή και η επαφή «β» ανοίγει και διακόπτεται η τροφοδότηση της σειρήνας και της ενδεικτικής λυχνίας του αντίστοιχου χώρου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΑ ΠΛΟΙΑ

3.1 Ηλεκτροχημική διάθρωση.

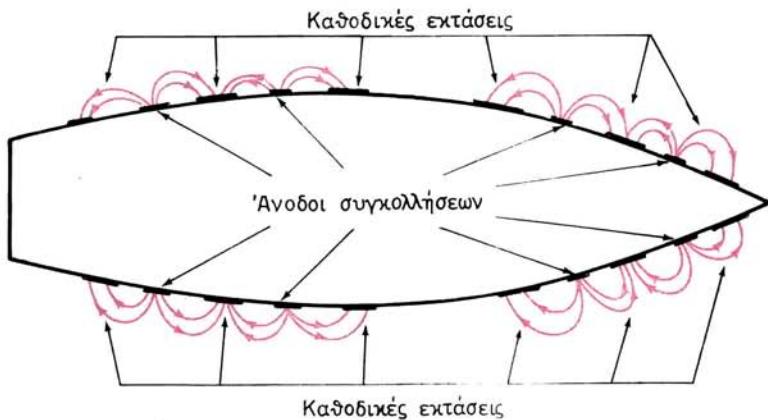
Η ηλεκτροχημική διάθρωση (electrochemical corrosion - ηλεκτροχημικό σκούριασμα) οφείλεται σε γαλβανικές ή ηλεκτρολυτικές δραστηριότητες. Και στις δυο περιπτώσεις, ο ηλεκτρολύτης που μεσολαβεί μπορεί να είναι νερό με κάποια νόθευση ή υγρό χώμα.

a) Η γαλβανική δραστηριότητα.

Η γαλβανική δραστηριότητα έχει ως αποτέλεσμα την κυκλοφορία ρεύματος μέσα σε ηλεκτρολύτη από τη μάζα κάποιας μεταλλικής κατασκευής που αποτελεί άνοδο, σε κάποια γειτονική μεταλλική μάζα που αποτελεί κάθοδο (ηλεκτρολυτικό στοιχείο). Αυτό οφείλεται στο **ηλεκτρολυτικό δυναμικό** που δημιουργείται μεταξύ ενός μετάλλου και ενός ηλεκτρολύτη, όταν έρχονται σε επαφή και προκαλεί διάσπαση των ατόμων του μετάλλου που παρουσιάζει χαμηλότερο (αρνητικό) δυναμικό ως προς τον ηλεκτρολύτη.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται μερικά στοιχεία ηλεκτρολυτικού δυναμικού κατά κατιούσα σειρά (από το μεγαλύτερο θετικό μέχρι το μεγαλύτερο αρνητικό). Το υδρογόνο, που δεν παρουσιάζει ηλεκτρολυτικό δυναμικό, θεωρείται ως το στοιχείο αναφοράς.

Χρυσός	ψηφιλότερο	θετικό	δυναμικό
Πλατίνα		θετικό	
Άργυρος		θετικό	
Υδράργυρος		θετικό	
Χαλκός		θετικό	
Υδρογόνο	χαμηλότερο	ΜΗΔΕΝ	
Μόλυβδος		αρνητικό	
Κασσίτερος		αρνητικό	
Νικέλιο		αρνητικό	
Κοβάλτιο		αρνητικό	
Σίδηρος		αρνητικό	
Κάδμιο		αρνητικό	
Ψευδάργυρος		αρνητικό	
Μαγγάνιο		αρνητικό	
Αλουμίνιο		αρνητικό	
Μαγνήσιο		αρνητικό	
Νάτριο		αρνητικό	δυναμικό



Σχ. 3.1.
Ηλεκτροχημική διάβρωση.

Έτσι, στην περίπτωση των πλοίων, ο μπρούντζος της έλικας, που παρουσιάζει θετικό ηλεκτρολυτικό δυναμικό, οι σιδερένιες ύφαλες κοντινές μάζες του κύτους του πλοίου και του πτερυγίου του πηδαλίου του πλοίου, που παρουσιάζουν αρνητικό ηλεκτρολυτικό δυναμικό, και το αλμυρό θαλάσσιο νερό, που δρα ως ηλεκτρολύτης, συγκροτούν ηλεκτρολυτικό στοιχείο με σημαντική διαφορά δυναμικού. Καθώς τα παραπάνω μέταλλα έρχονται σε σχεδόν τέλεια επαφή, το στοιχείο θεωρείται ως εξωτερικά βραχυκυκλωμένο και έτσι μέσα στο θαλάσσιο νερό κυκλοφορεί ρεύμα ιόντων, το οποίο διαβρώνει επικίνδυνα τις σιδερένιες μάζες του κύτους.

Ηλεκτρολυτικά στοιχεία με μικρότερη διαφορά δυναμικού δημιουργούνται κατά μικρές περιοχές (τοπικά στοιχεία - local cells) σε ολόκληρη την ύφαλη έκταση του κύτους (σχ. 3.1), λόγω των μικρών διαφορών που παρουσιάζει η σύνθεση της σιδερένιας μάζας του κύτους, όπως τα κοιλώματα των επιμεταλλώσεων, οι συγκολλήσεις, τα καρφιά των ενώσεων και οι πολύ μικρές σκουριασμένες εκτάσεις (η σκουριά επιδεινώνει τη σκουριά). Λόγω των τοπικών αυτών στοιχείων προκαλείται διάβρωση σε τοπικές επιφάνειες, που παρουσιάζουν χαμηλότερο (αρνητικό) ηλεκτρολυτικό δυναμικό, από τις οποίες αναχωρεί ρεύμα ιόντων και μέσα από το θαλάσσιο νερό καταλήγει σε επιφάνειες που παρουσιάζουν υψηλότερο (θετικό) ηλεκτρολυτικό δυναμικό. Οι τοπικές επιφάνειες, από τις οποίες αναχωρεί το ρεύμα αυτό, ονομάζονται άνοδοι και οι επιφάνειες στις οποίες καταλήγει ονομάζονται κάθοδοι, αλλά οι ονομασίες αυτές δεν πρέπει να συγχέονται με την ηλεκτρονική φορά του ρεύματος που χρησιμοποιείται στο βιβλίο αυτό.

Ο ρυθμός διαβρώσεως είναι ανάλογος με την ένταση του ρεύματος ιόντων, εξαρτάται όμως από τη σύνθεση των μετάλλων, την αλμυρότητα και τη θερμοκρασία του θαλάσσιου νερού (ηλεκτρολύτη), ακόμη και από την ταχύτητα του πλοίου, επειδή αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν την ένταση του ρεύματος ιόντων.

6) Η ηλεκτρολυτική δραστηριότητα.

Η ηλεκτρολυτική δραστηριότητα προκαλείται από τυχαία ρεύματα λόγω

διαρροής σε ηλεκτρικά συστήματα, όπως στα δίκτυα συνεχούς ρεύματος των ηλεκτροφόρων σιδηροτροχιών ή των εναερίων γραμμών της ηλεκτρικής έλξεως.

Οποιεσδήποτε επαφές της ηλεκτροφόρας ράγας ή αγωγού με παραπλήσιο ουδέτερο αγωγό (σωλήνα, θωράκιση καλωδίων κλπ) προκαλούν την έξιδο μέρους του ρεύματος από την ηλεκτροφόρα ράγα ή τον ηλεκτροφόρο αγωγό και την είσοδό του στον ουδέτερο αγωγό και σε κάποια άλλα σημεία επαναφορά του ρεύματος στην ηλεκτροφόρα ράγα ή τον ηλεκτροφόρο αγωγό. Σε αυτά τα σημεία επαναφοράς του ρεύματος, που είναι σημεία εξόδου του ρεύματος από τον ουδέτερο αγωγό, δημιουργούνται άνοδοι, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την επικίνδυνη διάθρωση των μετάλλων των ουδετέρων αγωγών.

3.2 Καθοδική αντιδιαθρωτική προστασία.

Η ηλεκτροχημική διάθρωση των δυο περιπτώσεων που αναπτύξαμε στην προηγούμενη παράγραφο, μπορεί να προληφθεί με την προσθήκη ανόδων κοντά στις περιοχές που διαβρώνονται. Έτσι παρέχεται ρεύμα, το οποίο διέρχεται από το θαλάσσιο νερό και εισέρχεται στις περιοχές που αρχικά ήταν άνοδοι, οπότε αυτές μετατρέπονται σε καθόδους, εξουδετερώνοντας ή αντιστρέφοντας τα ρεύματα των τοπικών στοιχείων.

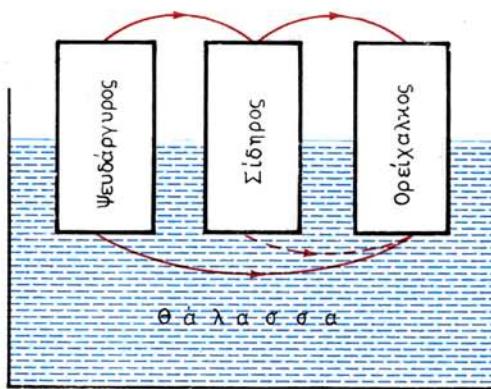
Στην καθοδική αντιδιαθρωτική προστασία των πλοίων χρησιμοποιούνται η **μέθοδος της θυσιαζόμενης ανόδου** (sacrificial anode protection) και η **μέθοδος εμβαλλόμενου ρεύματος** (impressed current protection). Η τελευταία έχει αποδειχθεί ως η αποτελεσματικότερη, αλλά και οι δυο θεωρούνται ως συμπληρώσεις του καλού χρωματισμού των υφάλων του πλοίου.

a) Η μέθοδος της θυσιαζόμενης ανόδου.

Κατά τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται τεμάχια μετάλλου που παρουσιάζουν χαμηλότερο (περισσότερο αρνητικό) ηλεκτρολυτικό δυναμικό από το σίδηρο του κύτους του πλοίου, όπως ο ψευδάργυρος και το μαγνήσιο. Τα τεμάχια αυτά προσαρμόζονται στην εξωτερική ύφαλη επιφάνεια του κύτους, κοντά σε περιοχές που αρχικά συμπεριφέρονται ως άνοδοι και συγκροτούν νέα ηλεκτρικά στοιχεία.

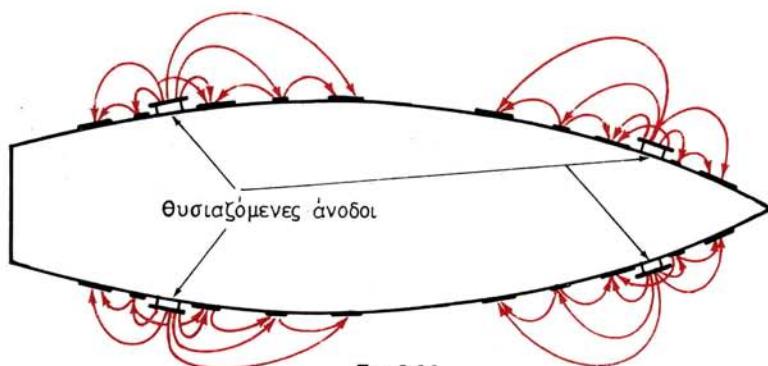
Στην επιφάνεια του κύτους του πλοίου, κοντά στην έλικα, προσαρμόζεται μια πλάκα από ψευδάργυρο (σχ. 3.2a). Η μάζα της πλάκας αυτής και η μάζα του μπρούντζου της έλικας δημιουργούν ηλεκτρικό στοιχείο με υψηλότερη διαφορά δυναμικού από αυτή που δημιουργούσε το αρχικό στοιχείο μπρούντζου-σιδήρου. Η υψηλότερη διαφορά δυναμικού έχει ως αποτέλεσμα, το ρεύμα ιόντων που κυκλοφορεί στο θαλάσσιο νερό να αναχωρεί από την πλάκα ψευδαργύρου και όχι από τη σιδερένια μάζα του κύτους, οπότε η τελευταία παίει να λειτουργεί ως άνοδος και δεν διαθρώνεται.

Για την προστασία της σιδερένιας μάζας του κύτους, λόγω της ανομοιομορφίας της (τοπικά στοιχεία, σχ. 3.1), σε ενδιάμεσες θέσεις, κυρίως μεταξύ συγκολλήσεων ή ενώσεων με καρφιά, προσαρμόζονται στο κέλυφος του πλοίου τεμάχια από ψευδάργυρο, (σχ. 3.2b). Αυτά, επειδή έχουν χαμηλότερο (αρνητικότερο) ηλεκτρολυτικό δυναμικό, συγκροτούν με τη σιδερένια μάζα



Σχ. 3.2a.

Προστασία του σιδήρου με την προσθήκη θυσιαζόμενης ανόδου από ψευδάργυρο.



Σχ. 3.2b.

Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους.

ηλεκτρικά στοιχεία. Στα στοιχεία αυτά τα τεμάχια ψευδαργύρου αποτελούν την άνοδο και η σιδερένια μάζα την κάθοδο. Έτσι δεν διαβρώνεται η σιδερένια μάζα του κύτους του πλοίου, αλλά οι πρόσθετες άνοδοι από ψευδάργυρο, που έχουν πολύ μικρότερο κόστος και αντικαθιστώνται εύκολα.

Καθώς και στις δυο περιπτώσεις οι πρόσθετες άνοδοι από ψευδάργυρο φθείρονται από τη διάβρωση, απαιτούν τακτική περιοδική αντικατάσταση (θυσιαζόμενες άνοδοι), γιατί αν η μάζα τους ελαττώθει σημαντικά, παύουν να λειτουργούν αποτελεσματικά ως άνοδοι.

Επειδή η διαφορά του ηλεκτρολυτικού δυναμικού μεταξύ μαγνησίου - σιδήρου είναι μεγαλύτερη (περίπου 1,8 V) από την αντίστοιχη μεταξύ ψευδαργύρου και σιδήρου, η χρησιμοποίηση θυσιαζόμενης ανόδου από μαγνήσιο έχει καλύτερα αποτελέσματα, αλλά μεγαλύτερο κόστος.

Η μέθοδος της θυσιαζόμενης ανόδου είναι αποτελεσματική για την προστασία μικρών κατασκευών, επειδή η διαφορά δυναμικού που δημιουργείται από την προσθήκη των ανόδων αυτών είναι σταθερή και δεν υπάρχει δυνατότητα ρυθμίσεως της εντάσεως του ρεύματος.

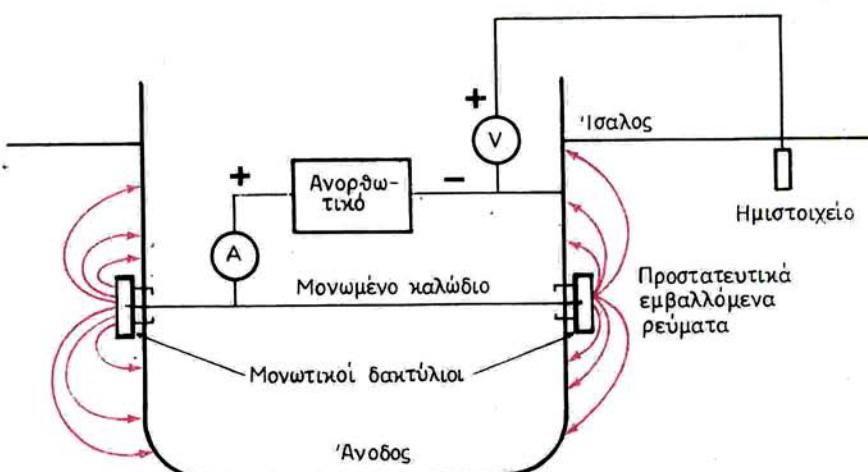
6) Η μέθοδος του εμβαλλόμενου ρεύματος.

Κατά τη μέθοδο αυτή, διοχετεύεται συνεχές ρεύμα μέσω του θαλάσσιου νερού προς την επιφάνεια του κύτους, το οποίο έχει ικανοποιητική ένταση, ώστε να εξουδετερώνει το φαινόμενο των τοπικών στοιχείων που μπορεί να έχουν σχηματισθεί. Το ρεύμα αυτό προέρχεται από γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ή από ανορθωτικό και διοχετεύεται στο θαλάσσιο νερό από εξωτερικές ανόδους που στερεώνονται με μονωτήρες στην επιφάνεια ή σε προστατευτικές εσοχές του κελύφους του πλοίου σε τέτοια θέση, ώστε να βρίσκονται πάντα κάτω από την ίσαλο γραμμή (σχ. 3.2γ). Ο θετικός πόλος της γεννήτριας ή του ανορθωτικού συνδέεται στις ανόδους με καλώδιο ανθεκτικής μονώσεως και ο αρνητικός πόλος συνδέεται στο μεταλλικό κύτος του πλοίου. (Σε εγκαταστάσεις ξηράς, στη μεταλλική κατασκευή που προστατεύεται, συνδέεται ο αρνητικός πόλος της πηγής, ώστε να αποτελεί κάθοδο και οι άνοδοι, στις οποίες συνδέεται ο θετικός πόλος, θάβονται στο έδαφος σε τέτοιες θέσεις, ώστε να παρέχεται ρεύμα προς όλες τις επιφάνειες της προστατευόμενης καθόδου).

Στην περίπτωση των πλοίων η ένταση ρεύματος, που απαιτείται για την εξασφάλιση προστασίας, εξαρτάται από την κατάσταση του χρωματισμού του πλοίου, την ταχύτητά του, την κατάσταση φορτώσεών του, την αλμυρότητα και τη θερμοκρασία του θαλάσσιου νερού και μπορεί να κυμαίνεται από 20-300 Α.

Οι άνοδοι κατασκευάζονται από επιπλατινωμένο τιτάνιο ή κράμα μολύβδου-αργύρου, που επηρεάζονται ελάχιστα από το εξερχόμενο ρεύμα και η ζωή τους υπερβαίνει και τη δεκαπενταετία.

Σημειώνεται ότι το σύστημα αυτό λειτουργεί αποτελεσματικότερα, όταν υπάρχει μια διαλυόμενη άνοδος, όπως το σύστημα του αλουμινένου σύρματος. Αυτό είναι μονωμένο από το κέλυφος του πλοίου και σύρεται από την πρύμνη κάτω από την ίσαλο. Επειδή λειτουργεί ως άνοδος και διαθρώνεται πρέπει να αντικαθίσταται τακτικά.



Σχ. 3.2γ.

Καθοδική προστασία με εμβαλλόμενα ρεύματα.

Αν το εμβαλλόμενο προστατευτικό ρεύμα είναι μεγαλύτερο από το κανονικό, η ηλεκτρόλυση του θαλάσσιου νερού θα προκαλέσει τη δημιουργία αλκαλίου και υδρογόνου, που έχει ως αποτέλεσμα το φουσκάλιασμα των χρωμάτων του κύτους. Αν το ρεύμα είναι μικρότερο από το κανονικό, παρατηρείται διάθρωση ανάλογη με τη μείωση του ρεύματος. Έτσι, είναι απαραίτητο να παρακολουθείται και να ρυθμίζεται η τιμή του ρεύματος στην κανονική του τιμή, η οποία εξασφαλίζει πλήρη προστασία. Η παρακολούθηση γίνεται μετρώντας την τάση που επικρατεί μεταξύ του κύτους και του θαλάσσιου νερού (ηλεκτρολύτη), με ένα ευαίσθητο βολτόμετρο και ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς (σχ. 3.2γ). Στην πράξη, ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιείται ημιστοιχείο μετρήσεως αργύρου-χλωριούχου αργύρου ή χαλκού-θειούχου χαλκού. Ο απροστάτευτος σίδηρος του κύτους έχει ηλεκτρολυτικό δυναμικό χαμηλότερο (αρνητικότερο) κατά $-0,55\text{ V}$ από την ημιστοιχείο μετρήσεως χαλκού-θειούχου χαλκού. Όταν το δυναμικό αυτό αυξηθεί σε $-0,85\text{ V}$ επιτυγχάνεται πλήρης προστασία.

Η τιμή της τάσεως του εμβαλλόμενου ρεύματος ρυθμίζεται χειροκίνητα ή αυτόματα, έτσι ώστε η διαφορά δυναμικού μεταξύ του σιδερένιου κελύφους και του ηλεκτροδίου αναφοράς να διατηρείται σταθερή στην τιμή των $-0,85\text{ V}$. Στα σύγχρονα αυτόματα συστήματα εμβαλλόμενου ρεύματος το ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιείται ως αισθητήρας και οι μεταβολές της παραπάνω τάσεως πάνω ή κάτω από τα $-0,85\text{ V}$ διεγείρουν έναν ενισχυτή, του οποίου η έξοδος εφαρμόζεται στο ανορθωτικό. Αυτός προκαλεί αυτόματη ελάττωση ή αύξηση αντίστοιχα της τάσεως, με την οποία εξασφαλίζεται εμβαλλόμενο ρεύμα κανονικής τιμής και πλήρης καθοδική αντιδιαθρωτική προστασία.

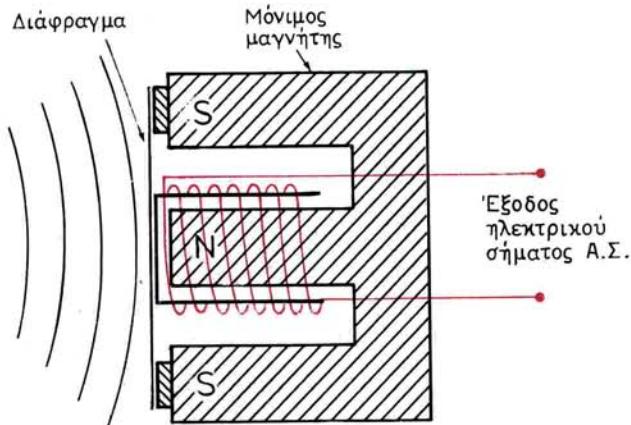
3.3 Τα μικρόφωνα.

Τα μικρόφωνα είναι απλές συσκευές, οι οποίες μετατρέπουν την ενέργεια των ηχητικών κυμάτων σε ηλεκτρική ενέργεια. Ως τέτοιες συσκευές χρησιμοποιούνται, για να μετατρέπουν τις ηχητικές ταλαντώσεις, που δημιουργεί η ανθρώπινη φωνή ή η μουσική, σε ηλεκτρικές ταλαντώσεις, όπου αυτό είναι απαραίτητο (τηλεφωνία, ραδιοτηλεφωνία, ραδιοφωνία, συστήματα αναπαραγωγής μουσικής ή φωνής κλπ). Το πλάτος και η συχνότητα των ηλεκτρικών ταλαντώσεων που προκύπτουν από τη μετατροπή αυτή δεν είναι σταθερά, αλλά αντίστοιχα ακολουθούν τις μεταβολές της εντάσεως και του τόνου (συχνότητας) της φωνής ή της μουσικής από την οποία προέρχονται. Οι ταλαντώσεις αυτές, που είναι γνωστές και ως *σήμα*, μεταβιθάζονται με αγωγούς σε άλλη θέση, όπου με το μεγάφωνο (βλ. ΦΥΣΙΚΗ II, τόμος Α', § 3.7) ή με το ακουστικό (βλ. παρακάτω § 3.4), μετατρέπονται πάλι σε ηχητικά κύματα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, στη γραμμή που συνδέει το μικρόφωνο με το μεγάφωνο παρεμβάλλεται ενισχυτική διάταξη για την ενίσχυση των ασθενών ταλαντώσεων και μόνο όταν δεν απαιτείται μεγάλη ισχύς και η μεταξύ τους απόσταση είναι μικρή συνδέονται απευθείας με τους αγωγούς της γραμμής.

Οι τύποι μικροφώνου που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις πλοίων, είναι το **μικρόφωνο κινητού πηνίου** (moving coil microphone), το **μικρόφωνο άνθρακα** (carbon microphone) και το **κρυσταλλικό μικρόφωνο** (crystal microphone).

a) Το μικρόφωνο κινητού πηνίου.

Το μικρόφωνο κινητού πηνίου (σχ. 3.3α) περιέχει μόνιμο μαγνήτη-οχήματος



Σχ. 3.3α.
Το μικρόφωνο κινητού πηνίου.

Ε, του οποίου τα δυο ακραία σκέλη αποτελούν δυο όμοιους πόλους (είτε βόρειους είτε νότιους) και το μεσαίο, που το μήκος του είναι λίγο μικρότερο, αποτελεί τον αντίθετο πόλο. Το μεσαίο σκέλος περιβάλλεται από πηνίο, του οποίου τα άκρα του τυλίγματος καταλήγουν σε σταθερές επαφές, από τις οποίες λαμβάνεται η τάση σήματος που προκύπτει από τον ήχο. Το πηνίο δεν εφάπτεται με τα σκέλη του μόνιμου μαγνήτη, αλλά προσαρμόζεται σταθερά σε λεπτό διάφραγμα από πισσόχαρτο ή και από χάλυβα, που έχει κατάλληλη ελαστικότητα και στερεώνεται στους ακραίους πόλους του μαγνήτη.

Ο τρόπος στερεώσεως και η ελαστικότητα επιτρέπουν τις εύκολες κάμψεις του διαφράγματος και προς τις δυο κατευθύνσεις της καθέτου στο μέσο της επιφάνειάς τους, από τις οποίες κάμψεις προκύπτει παλινδρομική κίνηση (ταλάντωση) του πηνίου κατά μήκος του μεσαίου σκέλους και κατά μικρά διαστήματα. Καθώς το μεσαίο σκέλος του μόνιμου μαγνήτη έχει μικρότερο μήκος από τα ακραία, η μαγνητική ροή του μεσαίου σκέλους, μέρος της οποίας διέρχεται από το πηνίο, διαμορφώνεται έτσι, ώστε οι μικρές αυτές παλινδρομικές κινήσεις να προκαλούν μεγάλες μεταβολές της μαγνητικής ροής που διέρχεται από το πηνίο. Έτσι, τα ηχητικά κύματα που προσπίπτουν στο διάφραγμα, «ξαναγκάζουν» το κέντρο του και το πηνίο να πραγματοποιούν ταλαντώσεις με τη συχνότητα των ηχητικών κυμάτων κατά μήκος του μεσαίου σκέλους του μαγνήτη και με πλάτος ανάλογο με το πλάτος των ηχητικών κυμάτων (ένταση ήχου), οι οποίες συνεπάγονται μεταβολή της μαγνητικής ροής που διέρχεται από το τύλιγμα του πηνίου με την ίδια συχνότητα.

Σύμφωνα με το γενικό νόμο της επαγωγής (βλ. ΦΥΣΙΚΗ II, τόμος Α', § 4.2), η παραπάνω μεταβολή της μαγνητικής ροής έχει ως συνέπεια την επαγωγή τάσεως στο τύλιγμα του πηνίου με τη συχνότητα των ηχητικών κυμάτων και πλάτος ανάλογο με την έντασή τους.

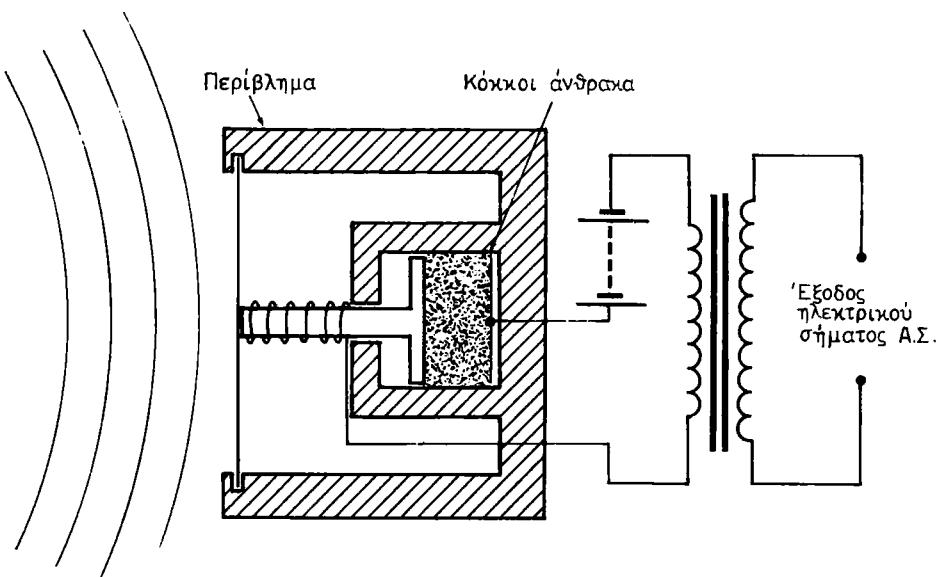
Η ελαστικότητα του διαφράγματος και η μάζα του διαφράγματος και του πηνίου καθορίζουν την ιδιοσυχνότητα ταλαντώσεώς τους, στην οποία οι ταλαντώσεις τους, και κατά συνέπεια η επαγόμενη τάση (το σήμα), λαμβάνουν το μεγαλύτερο πλάτος. Στο διάφραγμα του μικροφώνου κινητού πηνίου

προσαρμόζονται διατάξεις τριβών και μηχανικής ανατροφοδοτήσεως με τις οποίες επιτυγχάνεται ευρύς μηχανικός συντονισμός που είναι απαραίτητος για να διατηρείται πρακτικά σταθερό το πλάτος της επαγόμενης τάσεως σε ολόκληρη την περιοχή ακουστικών συχνοτήτων (καλή απόκριση συχνοτήτων). Η καλή απόκριση συχνοτήτων είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την καλή αναπαραγωγή του ήχου με το μεγάφωνο (αναπαράγονται όλοι οι τόνοι και δεν αλοιώνεται η χροιά του ήχου).

Εκτός από την καλή απόκριση συχνοτήτων, ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα του μικρόφωνου κινητού πηνίου, σε σύγκρισή του με μικρόφωνα άλλων τύπων, είναι ότι το πηνίο του παρουσιάζει αρκετά υψηλή σύνθετη αντίσταση και μπορεί να συνδέεται απευθείας στην είσοδο των ενισχυτικών διατάξεων, χωρίς να απαιτείται η μεσολάβηση μετασχηματιστή προσαρμογής αντιστάσεων. Για το μικρόφωνο του τύπου αυτού ισχύει και η αντιστροφή, δηλαδή μπορεί να μετατρέπει τις ηλεκτρικές ταλαντώσεις σε ηχητικά κύματα (μεγάφωνο). Βέβαια, η παραπάνω κατασκευή του ως μικρόφωνου δεν του επιτρέπει να έχει μεγάλη απόδοση ως μεγάφωνο, γι' αυτό και η χρησιμοποίησή του και για τους δυο σκοπούς είναι περιορισμένη. Για τη μετατροπή των ηλεκτρικών ταλαντώσεων σε ηχητικά κύματα χρησιμοποιείται το μεγάφωνο κινητού πηνίου (βλ. ΦΥΣΙΚΗ II, τόμος Α', § 3.7).

8) Το μικρόφωνο άνθρακα.

Το μικρόφωνο άνθρακα (σχ. 3.38) αποτελείται από περιβλήμα (μονωτικό κουτί), που το εσωτερικό του διαμορφώνεται σε κυλινδρικό μονωτικό δοχείο που περιέχει λεπτούς κόκκους άνθρακα, οι οποίοι στο σύνολό τους συμπεριφέρονται ως αντίσταση. Στη μία βάση του μονωτικού δοχείου υπάρχει μεταλλικός δίσκος, στο κέντρο του οποίου προσαρμόζεται ο ένας ακροδέκτης της αντιστάσεως που δημιουργούν οι κόκκοι άνθρακα. Από την άλλη βάση



Σχ. 3.38.
Το μικρόφωνο άνθρακα.

εισέρχεται μεταλλικό έμβολο, το οποίο ασκεί πίεση στους κόκκους άνθρακα και στον άξονά του φέρει το δεύτερο ακροδέκτη της αντιστάσεως. Η μα επίπεδη πλευρά του περιβλήματος κλείνεται από το διάφραγμα, που παρουσιάζει ελαστικότητα και όπου στερεώνεται ο άξονας του εμβόλου, και ελατήριο με το οποίο ασκείται μέση σταθερή πίεση στους κόκκους άνθρακα, οπότε το συνολό τους παρουσιάζει μέση σταθερή τιμή αντιστάσεως. Η αύξηση και η μείωση της πιέσεως που ασκείται στους κόκκους άνθρακα από το έμβολο, προκαλεί αντίστοιχα αύξηση και ελάττωση των επιφανειών κόκκων άνθρακα που έρχονται σε επαφή και έχει ως αντίστοιχα αποτελέσματα την ελάττωση και την αύξηση της τιμής της αντιστάσεως που δημιουργούν.

Με τους παραπάνω ακροδέκτες η αντίσταση των κόκκων άνθρακα συνδέεται σε σειρά με το πρωτεύον του μετασχηματιστή προσαρμογής αντιστάσεων και σε πηγή συνεχούς ρεύματος.

Όταν το διάφραγμα βρίσκεται σε ηρεμία, στους κόκκους άνθρακα ασκείται σταθερή μέση πίεση, το κύκλωμα παρουσιάζει μέση σταθερής τιμής αντίσταση και διαρρέεται από σταθερό ρεύμα. Έτσι το πρωτεύον δημιουργεί σταθερή μαγνητική ροή και στο δευτερεύον του μετασχηματιστή προσαρμογής δεν επάγεται τάση.

Όταν στο διάφραγμα προσπίπτουν ηχητικά κύματα, προκαλούνται ταλαντώσεις του διαφράγματος και του εμβόλου που στερεώνεται σ' αυτό, με τη συχνότητα των ηχητικών κυμάτων. Αυτή συνεπάγεται μεταβολή της τιμής της αντιστάσεως και του ρεύματος του κυκλώματος με την ίδια συχνότητα. Έτσι με την ίδια συχνότητα μεταβάλλεται και η μαγνητική ροή που δημιουργεί το πρωτεύον, οπότε στο δευτερεύον του μετασχηματιστή προσαρμογής επάγεται τάση με τη συχνότητα των ηχητικών κυμάτων.

Βασικό μειονέκτημα του μικροφώνου άνθρακα είναι η κακή απόκριση συχνοτήτων και ιδιαίτερα στις υψηλές ακουστικές συχνότητες. Η ανεπάρκεια αυτή οφείλεται στη σημαντική αδράνεια των κόκκων άνθρακα η οποία δεν τους επιτρέπει να ακολουθήσουν τις πολύ γρήγορες (υψηλών συχνοτήτων) μεταβολές της πιέσεως. Εκτός από την κακή απόκριση συχνοτήτων, το μικρόφωνο άνθρακα παρουσιάζει και τα εξής μειονεκτήματα:

- Η λειτουργία του απαιτεί σύνδεσή του με πηγή συνεχούς ρεύματος.
- Όταν δεν διεγείρεται από ηχητικά κύματα παρουσιάζει έντονο υποχθόνιο θόρυβο που προέρχεται από τις τυχαίες κινήσεις των κόκκων άνθρακα.
- Με την πάροδο του χρόνου και ειδικά όταν βρίσκεται σε υγρό χώρο, παρατηρείται ενσωμάτωση (κόλληση) κόκκων άνθρακα που προκαλεί ελάττωση της ευαισθησίας του.
- Καθώς η λειτουργία του βασίζεται στη μεταβολή της αντιστάσεως που προκύπτει από τα ηχητικά κύματα, δεν παρουσιάζει το αντιστρεπτό φαινόμενο, δηλαδή δεν μπορεί να λειτουργήσει ως μεγάφωνο.

Παρουσιάζει όμως τα πλεονεκτήματα της απλής και ανθεκτικής κατασκευής και του μικρού κόστους του, γι' αυτό και έχει επικρατήσει η χρησιμοποίησή του σε συστήματα που δεν απαιτούν καλή απόκριση συχνοτήτων, όπως στην τηλεφωνία.

γ) Το κρυσταλλικό μικρόφωνο.

Η λειτουργία του κρυσταλλικού μικροφώνου βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό

φαινόμενο που παρουσιάζουν ορισμένα κρύσταλλα και κυρίως ο χαλαζίας (quartz).

Σύμφωνα με το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, ένα τεμάχιο κρυστάλλου χαλαζία συστέλλεται ή διαστέλλεται, όταν στις αντίθετες έδρες του εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού. Η συστολή ή η διαστολή εξαρτάται από την πολικότητα της τάσεως που εφαρμόζεται. Έτσι, αν στις απέναντι έδρες του κρυστάλλου εφαρμοσθεί εναλλασσόμενη τάση, από τις συνεχείς εναλλακτικές συστολές και διαστολές του κρυστάλλου προκύπτουν ταλαντώσεις που μπορούν να διαδοθούν σε κωνικό διάφραγμα, το οποίο θα δημιουργήσει ηχητικά κύματα (μεγάφωνο).

Όμως το κρύσταλλο αυτό παρουσιάζει και το αντιστρεπτό φαινόμενο. Δηλαδή αν στις απέναντι έδρες του τεμάχιον του κρυστάλλου εφαρμοσθούν δυνάμεις συμπιέσεως ή εφελκυσμού, καθώς θα του προκαλέσουν συστολή ή διαστολή αντίστοιχα, στις επιφάνειες αυτές εμφανίζεται διαφορά δυναμικού με τη μια ή την άλλη πολικότητα. Αν τώρα σε τεμάχια τέτοιου κρυστάλλου προσαρμόζεται διάφραγμα με κατάλληλη ελαστικότητα, έτσι, ώστε οι ταλαντώσεις του διαφράγματος, οι οποίες προέρχονται από ηχητικά κύματα που προσπίπτουν σ' αυτό, να εφαρμόζονται στο τεμάχιο ως εναλλασσόμενες δυνάμεις συμπιέσεως και εφελκυσμού, στις έδρες του κρυστάλλου εμφανίζεται εναλλασσόμενη τάση με τη συχνότητα των ηχητικών κυμάτων (μικρόφωνο).

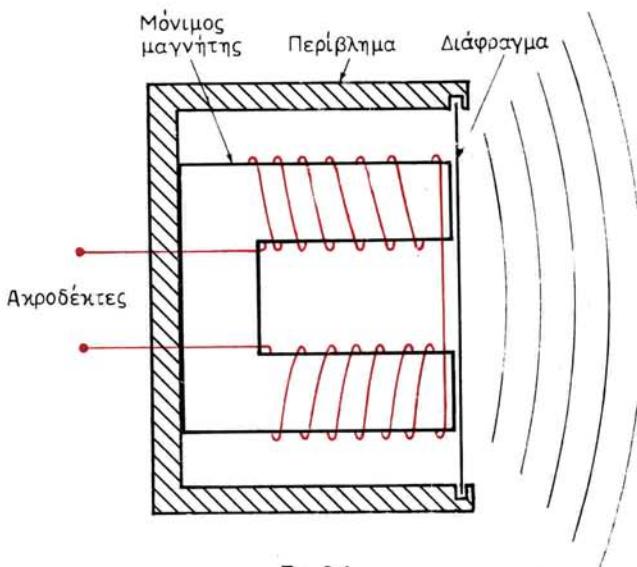
Η απόκριση συχνοτήτων του κρυσταλλικού μικροφώνου είναι καλύτερη από αυτή του μικροφώνου άνθρακα, δεν είναι όμως τόσο καλή όσο του μικροφώνου κινητού πηνίου. Γι' αυτό το κρυσταλλικό μικρόφωνο χρησιμοποιείται σε συστήματα που δεν απαιτούν καλή απόκριση συχνοτήτων και χρησιμοποιούν το ίδιο εξάρτημα και ως μικρόφωνο και ως μεγάφωνο.

3.4 Το ακουστικό.

Το ακουστικό είναι είδος μεγαφώνου μικρών διαστάσεων και χρησιμοποιείται σε συστήματα που δεν απαιτούν καλή απόκριση συχνοτήτων (καλή πιστότητα αναπαραγωγής ήχου). Εξασφαλίζει όμως την ατομική ακρόαση, αλλά και τη διευκόλυνση ακροάσεως σε χώρους με ήχους και θορύβους μεγάλων εντάσεων, όπως στα συστήματα τηλεφωνίας.

Η λειτουργία του ακουστικού, που είναι γνωστό και ως μεγάφωνο κινητού σιδήρου (moving iron loudspeaker), είναι ίδια με αυτή του μεγαφώνου κινητού πηνίου (βλ. ΦΥΣΙΚΗ II, τόμος Α', § 3.7), με τη διαφορά ότι το πηνίο είναι σταθερό και κινείται (πραγματοποιεί ταλαντώσεις) τεμάχιο σιδήρου κατάλληλου σχήματος με τη συχνότητα του ρεύματος που τροφοδοτείται το πηνίο και δημιουργεί τα ηχητικά κύματα.

Το ακουστικό (σχ. 3.4) αποτελείται από ένα μόνιμο μαγνήτη σχήματος Π που στερεώνεται στο περίβλημά του. Στα σκέλη του Π, που τα άκρα τους αποτελούν τους πόλους του μαγνήτη, προσαρμόζονται δυο πηνία που συνδέονται σε σειρά. Η φορά των τυλιγμάτων των δυο πηνίων είναι αντίθετη. Έτσι οι μαγνητικές ροές που δημιουργούν είναι της ίδιας φοράς και στα άκρα τους, που συμπίπτουν με τους πόλους του μόνιμου μαγνήτη, δημιουργούν αντίθετους πόλους, οι οποίοι αντιστρέφονται με το ρυθμό της συχνότητας του ρεύματος που διαρρέει τα πηνία. Σε μικρή απόσταση από τα άκρα των πόλων



Σχ. 3.4.
Το ακουστικό.

θρίσκεται το χαλύβδινο διάφραγμα, που έχει σχήμα δίσκου και στερεώνεται κυκλικά στο περίβλημα του ακουστικού.

Όταν τα πηνία τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενο ρεύμα ακουστικών συχνοτήτων, δημιουργούν εναλλασσόμενη μαγνητική ροή, που προστίθεται αλγεθρικά στη σταθερή μαγνητική ροή του μόνιμου μαγνήτη. Έτσι προκύπτει μαγνητική ροή που μεταβάλλεται με μεγάλο πλάτος με τη συχνότητα του ρεύματος τροφοδοτήσεως των πηνίων. Η μεταβαλλόμενη αυτή ροή ασκεί εναλλασσόμενες δυνάμεις Laplace στο διάφραγμα, οι οποίες το εξαναγκάζουν σε μηχανικές ταλαντώσεις (κάμψεις και από τη μία και από την άλλη επιφάνειά του εναλλακτικά) με το ρυθμό της συχνότητας του ρεύματος και δημιουργεί ηχητικά κύματα ίδιας συχνότητας.

Η απόκριση συχνοτήτων των ακουστικών δεν καλύπτει την περιοχή ακουστικών συχνοτήτων, υπερκαλύπτει όμως τις απαιτήσεις των περιπτώσεων που χρησιμοποιούνται. Εξάλλου η απλή κατασκευή τους, η ανθεκτικότητά τους και το μικρό κόστος τους έχουν καθιερώσει τη χρησιμοποίησή τους στις εφαρμογές που αναφέραμε.

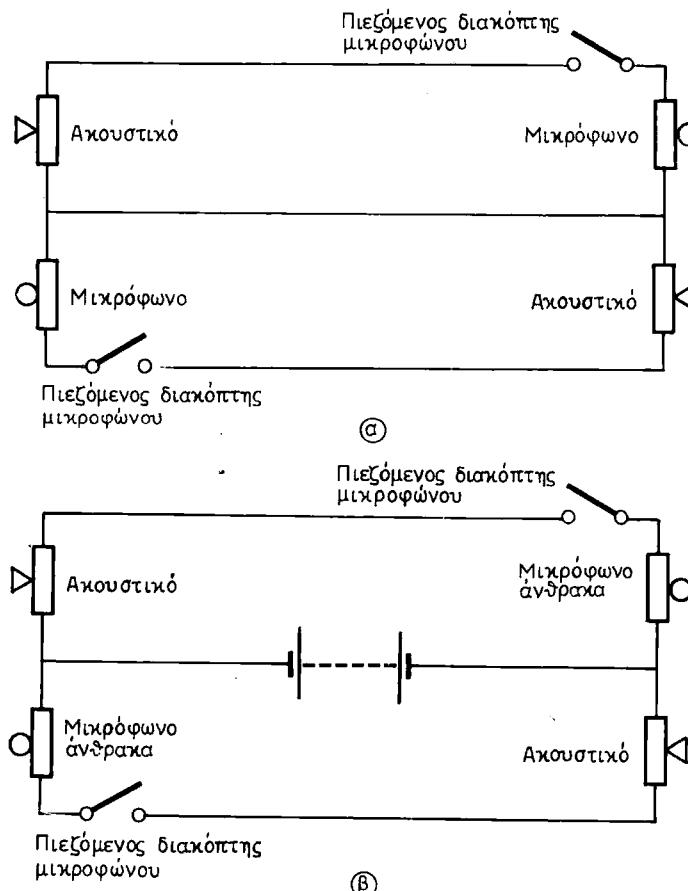
3.5 Τηλεφωνικά συστήματα πλοίων.

Η συσκευή που χρησιμοποιείται άμεσα στην τηλεφωνική επικοινωνία μεταξύ δύο προσώπων σε όλα τα είδη τηλεφωνικών συστημάτων είναι το χειροτηλέφωνο (hand set). Αυτό αποτελείται από ένα μικρόφωνο (συνήθως άνθρακα) και ακουστικό. Η σύνδεση δυο χειροτηλεφώνων με γραμμή αγωγών αποτελεί την βασική τηλεφωνική διάταξη [σχ. 3.5a(a)]. Όταν χρησιμοποιούνται μικρόφωνα άνθρακα στη διάταξη παρεμβάλλεται και η πηγή συνεχούς ρεύματος, όπως στο σχήμα 3.5a(b). Όταν η γραμμή είναι μεγάλου μήκους μεσολαβεί ενισχυτής διπλής κατευθύνσεως, για να ενισχύονται τα ασθενή σήματα (ρεύματα ακουστικών συχνοτήτων) και να αναπληρώνονται οι απώλειες στην αντίσταση

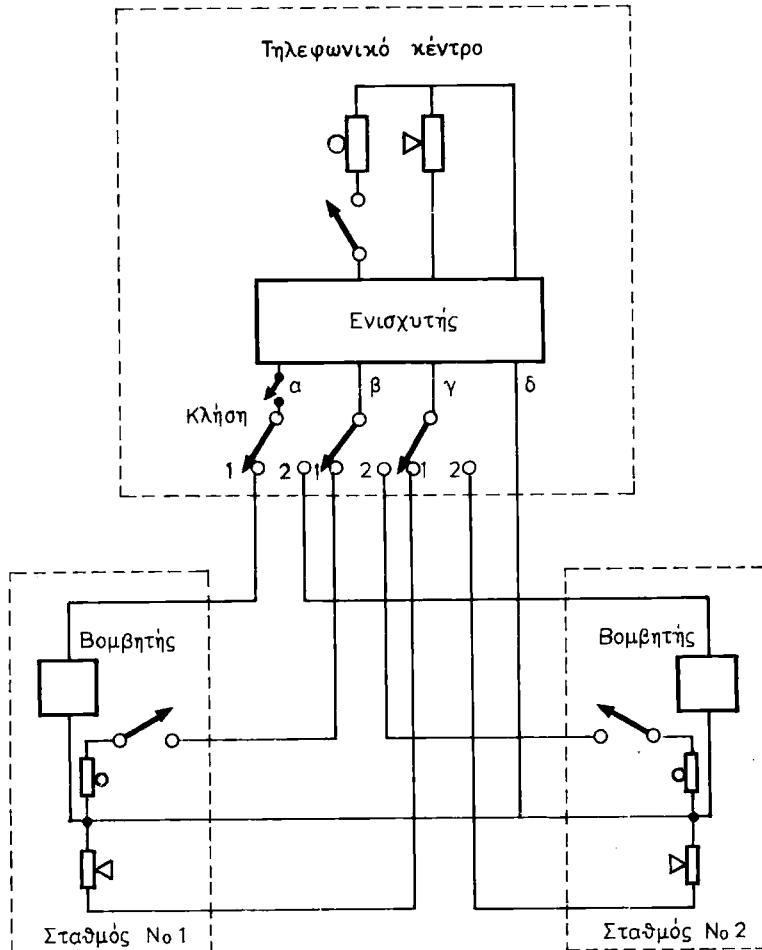
των αγωγών της γραμμής μεγάλου μήκους. Οι δυο διακόπτες, που θρίσκονται επάνω στο βραχίονα των χειροτηλεφώνων, συγκρατούνται από το ελατήριό τους μόνιμα ανοικτοί και κλείνονται επί όσο χρόνο πιέζονται, οπότε εξασφαλίζεται η διακοπή της τροφοδοτήσεως ή της συνδέσεως των μικροφώνων, όταν δεν χρησιμοποιούνται.

Στο σχήμα 3.58 φαίνεται τηλεφωνική διάταξη που αποτελείται από ένα κέντρο και δυο σταθμούς, το οποίο προκύπτει από θελτίωση των διατάξεων του σχήματος 3.5a. Το κέντρο έχει τη δυνατότητα επιλογής κλήσεως και επικοινωνίας με τον ένα από τους δύο σταθμούς. Η επιλογή γίνεται με τον τριπολικό διακόπτη δύο θέσεων. Επειδή η απόσταση κέντρου-σταθμών είναι μεγάλη, χρησιμοποιείται ενισχυτική διάταξη διπλής κατευθύνσεως.

Στη διάταξη του σχήματος 3.58, οι αγωγοί των γραμμών κέντρου-σταθμών έχουν χαρακτηρισθεί ως «α», «β», «γ» και «δ», ώστε να διευκολύνεται η μελέτη των κυκλωμάτων που επιλέγονται. Από την παρακολούθηση των γραμμών προκύπτει, ότι οι αγωγοί «β» και «γ» και «δ» αντιστοιχούν με τους τρεις αγωγούς της απλής διατάξεως του σχήματος 3.5a. Με αυτούς εξασφαλίζεται η



Σχ. 3.5a.
Απλές τηλεφωνικές διατάξεις.



Σχ. 3.58.

Διάγραμμα τηλεφωνικού συστήματος ενός κέντρου και δυο σταθμών.

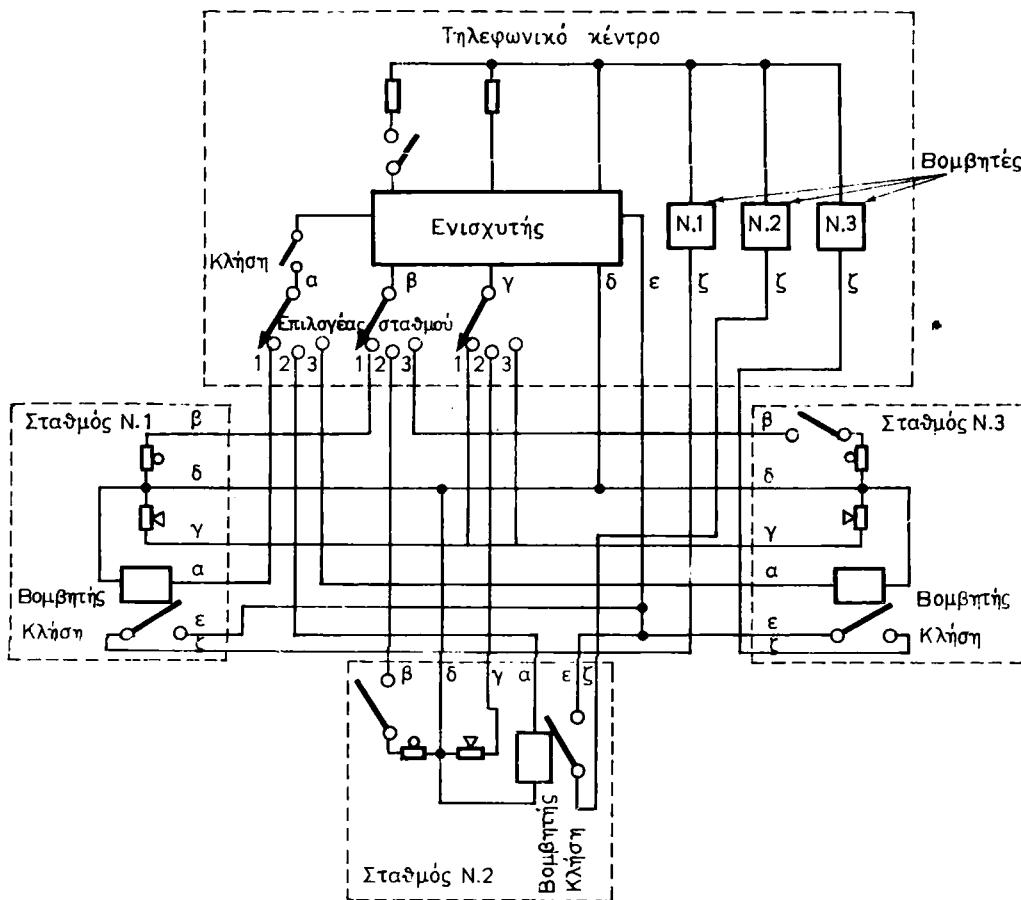
σύνδεση μικροφώνου και ακουστικού του κέντρου και του σταθμού 1 που έχει επιλεγεί (κόκκινες γραμμές). Με την παραπάνω σύνδεση εξασφαλίζεται η επικοινωνία (ομιλία-ακρόαση) και είναι γνωστή ως κύκλωμα ομιλίας. Η κλήση του σταθμού που έχει επιλεγεί εξασφαλίζεται με το κύκλωμα κλήσεως που αποτελείται από τον αγωγό «α», το βομβητή του σταθμού και την κοινή γραμμή «δ». Με τον αγωγό «α» παρέχεται χαμηλή τάση από διάταξη ανορθωτικού που δρίσκεται μέσα στον ενισχυτή και με την πίεση του διακόπτη «κλήση» τριπολικός διακόπτης επιλογής σταθμού είναι περισσοτέρων θέσεων (μπορεί να είναι μέχρι 12) με την ίδια συνδεσμολογία είναι δυνατή και η λειτουργία ισαρίθμων σταθμών.

Στο σχήμα 3.5γ έχουν προστεθεί οι αγωγοί «ε» και «ζ» και βομβητές στο

κέντρο και έτσι είναι δυνατή η κλήση του κέντρου από τους σταθμούς. Για να αποκατασταθεί επικοινωνία ενός σταθμού με το κέντρο, μετά την κλήση του πρώτου, πρέπει ο χειριστής του κέντρου να στρέψει το διακόπτη επιλογέα σταθμών στη θέση που αντιστοιχεί στο σταθμό που πραγματοποιεί την κλήση.

Τα κέντρα των τηλεφωνικών δικτύων των πλοίων εγκαθίστανται στη γέφυρα και οι σταθμοί σε χώρους με τους οποίους απαιτείται η επικοινωνία.

Σε κέντρα μεγάλης δυναμικότητας, ο διακόπτης επιλογέας σταθμών αντικαθίσταται από πιεζόμενους διακόπτες (πλήκτρα), με την πίεση των οποίων ενεργοποιούνται ηλεκτρονόμοι και οι επαφές τους αποκαθιστούν κυκλώματα όμοια με αυτά του σχήματος 3.5γ. Στα σύγχρονα κέντρα, αντί των ηλεκτρονόμων χρησιμοποιούνται ψηφιακά λογικά κυκλώματα, με τα οποία η εγκατάσταση γίνεται οικονομικότερη και ταχύτερη στην επιλογή.



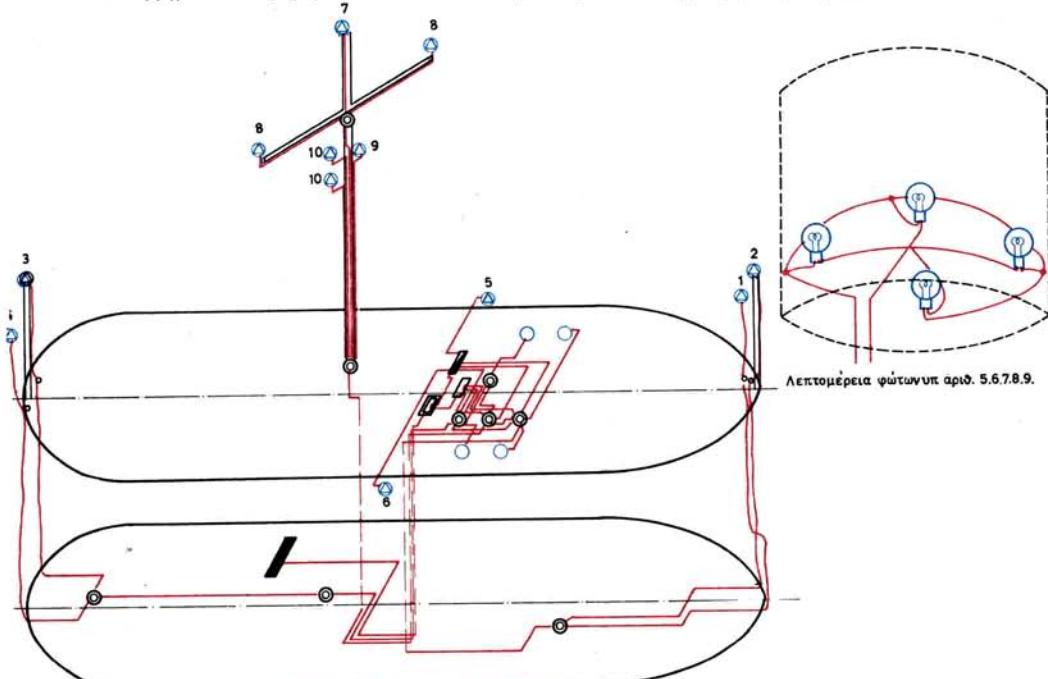
Σχ. 3.5γ.

Διάγραμμα τηλεφωνικού συστήματος ενός κέντρου και τριών σταθμών με δυνατότητα επιλογής ενός σταθμού και δυνατότητα κλήσεως ενός σταθμού από το κέντρο και του κέντρου από κάθε σταθμό.

3.6 Ηλεκτρικά κυκλώματα γέφυρας.

Ως ηλεκτρικά κυκλώματα γέφυρας εννοούνται τα κυκλώματα των φανών που κάθε πλοίο πρέπει να επιδεικνύει σύμφωνα με τους κανόνες 20, 21 και 22 των ΔΚΑΣ (φώτα πλεύσεως, αγκυροθολίας, ρυμουλκήσεως κλπ) και των φώτων εκπομπής σημάτων με αναλαμπές.

Στο σχήμα 3.6a(a) φαίνεται τυπικό ηλεκτρικό διάγραμμα μιας γραμμής των



■ Κύριος πίνακας διανομής από την ηλεκτρογεννήτρια.

■ Πίνακας τροφοδοτήσεως πλοϊκών, φώτων αγκυροθολίας και φώτων διαμερίσματος πηδαλιουχίας.

■ Ασφαλειοκιβώτιο πλοϊκών φώτων.

■ Ασφαλειοκιβώτιο φώτων ιστού και στηλιδών πλώρης και πρύμνης.

○ Διακλαδωτήρες.

○ Φώτα διαμερίσματος πηδαλιουχίας.

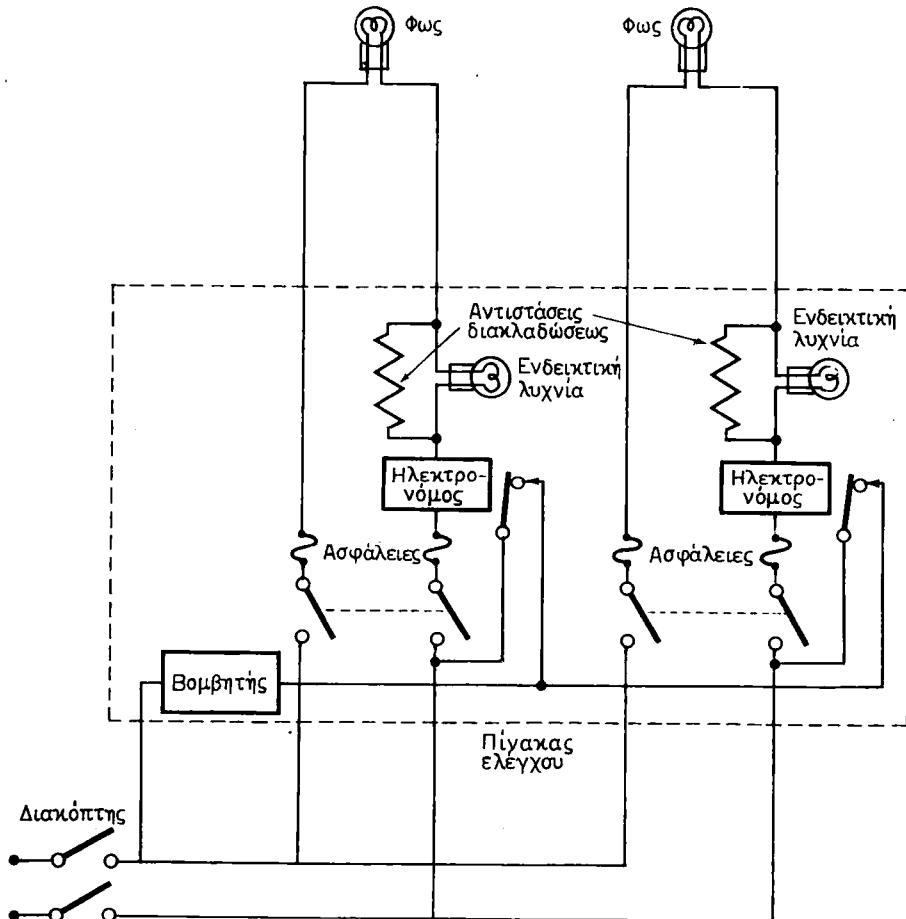
Σχ. 3.6a.

Μονογραμμικό ηλεκτρικό διάγραμμα (φώτων πλεύσεως, αγκυροθολίας και σημάτων με αναλαμπές). 1) Φανός πηδαλιουχίας. 2) Πλωριός φανός αγκυροθολίας. 3) ΠΜ φανός αγκυροθολίας. 4) ΠΜ φανός κορώνης (εν πλω). 5) ΑΡ πλοϊκός φανός (κόκκινο). 6) ΔΕ πλοϊκός φανός (πράσινο). 7) Ερυθρός φανός αεροσκαφών (αγκυροθολίας 4πλούς). 8) Φώτα σημάτων με αναλαμπές (4πλά). 9) Φως πλωριού ιστού. 10) Δύο (2) ερυθρά πλοίο ακυβέρνητο.

κυκλωμάτων των παραπάνω φώτων και των φώτων του διαμερίσματος πηδαλιούχιας. Όσα από τα παραπάνω φώτα βρίσκονται σε δυσπρόσιτα σημεία (πλοϊκά φώτα ιστών, πλευρικά πλοϊκά φώτα, φως αεροσκαφών και φώτα εκπομπής σημάτων με αναλαμπές), αποτελούνται από περισσότερες δύοις λάμπες (3-6) που περιέχονται στο ίδιο γυάλινο προστατευτικό περίθλημα [σχ. 3.6a(β)]. Οι λάμπες αυτές συνδέονται παράλληλα, τροφοδοτούνται από την ίδια γραμμή και ανάβουν και σθήνουν με τον ίδιο διακόπτη.

Τα φώτα αυτά πρέπει να τροφοδοτούνται μέσω ξεχωριστών πινάκων διανομής, τόσο από την κύρια ηλεκτρική παροχή του πλοίου (ηλεκτρογενή-τρια), όσο και από παροχή ανάγκης (συστοιχία συσσωρευτών). Η τροφοδότηση για κάθε φως γίνεται με διπολική γραμμή (δυο αγωγών), με διπολικό διακόπτη και μια ασφάλεια σε κάθε αγωγό της γραμμής. Πρέπει να υπάρχει σύστημα άμεσης ειδοποίησεως για βλάβη (alarm system) σε κάθε φως ή στην ηλεκτρική παροχή, που μπορεί να είναι οπτικό, ηχητικό ή και τα δυο.

Στο σχήμα 3.66 παρουσιάζονται τα αναλυτικά κυκλώματα για δυο φώτα με τις



Σχ. 3.66.

Κυκλώματα φώτων πλεύσεως ή αγκυροβολίας με οπτικό και ηχητικό σύστημα ειδοποίησεως βλάβης τους.

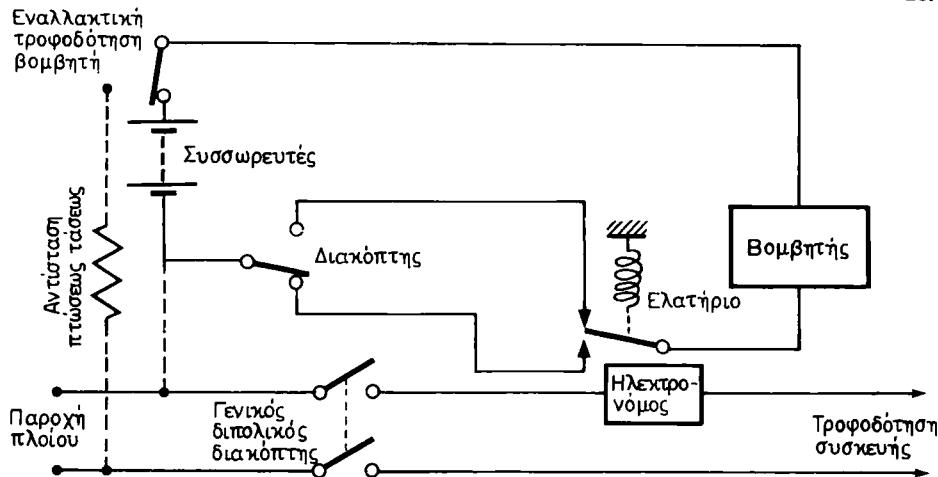
παραπάνω προϋποθέσεις. Τα κυκλώματα των υπολοίπων φώτων είναι όμοια και συνδέονται παράλληλα στην ηλεκτρική παροχή. Η γραμμή της ηλεκτρικής παροχής πλοίου εισέρχεται στο κιβώτιο ελέγχου, στο οποίο βρίσκονται όσα εξαρτήματα αναφέρονται στο σχήμα 6b. Από τη γραμμή αυτή αναχωρούν διακλαδώσεις διπολικής γραμμής με διπολικό διακόπτη και δυο ξεχωριστές ασφάλειες για κάθε φως. Στον ένα αγωγό κάθε γραμμής παρεμβάλλεται σε σειρά το πηνίο ηλεκτρονόμου και ενδεικτική λυχνία με μικρή αντίσταση σε παράλληλη σύνδεση. Η επαφή του ηλεκτρονόμου διατηρείται ανοικτή, όταν το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα και κλείνεται από το ελατήριο του ηλεκτρονόμου με τη διακοπή του ρεύματος στο πηνίο του. Η ενδεικτική λυχνία (pilot bulb) είναι συνήθως των 12 V και μέσα από αυτή περνά ασήμαντο ρεύμα, που είναι αρκετό για να ανάβει, ενώ σχεδόν όλο το ρεύμα που απαιτεί το κύριο φως, περνά από τον παράλληλο κλάδο της αντιστάσεως. Σε κάθε διακόπτη υπάρχει επιγραφή στην οποία αναγράφεται το φως στο οποίο αντιστοιχεί.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, με το κλείσιμο του διακόπτη παροχής (βλ. σχ. 3.6b) και εφόσον υπάρχει ρεύμα πλοίου και ένας ή περισσότεροι διακόπτες μερικών κυκλωμάτων φώτων είναι ανοικτοί, ηχεί ο βομβητής και ειδοποιεί για την αποκατάσταση της παροχής και ότι ένα ή περισσότερα ή και όλα τα φώτα δεν ανάβουν. Όταν κλείσουν όλοι οι διακόπτες των φώτων και εφόσον αυτά ανάβουν τα πηνία των ηλεκτρονόμων διαρρέονται από ρεύμα, οπότε οι επαφές τους ανοίγουν. Αυτές διακόπτουν την τροφοδότηση του βομβητή και αυτός παύει να ηχεί, ενώ ταυτόχρονα ανάβουν οι ενδεικτικές λυχνίες. Με την παρουσία βλάβης σε οποιοδήποτε ξεχωριστό κύκλωμα, η οποία θα προκαλέσει σθήσιμο του φωτός, διακόπτεται το ρεύμα στο πηνίο του αντίστοιχου ηλεκτρονόμου, οπότε με το κλείσιμο της επαφής του τροφοδοτείται ο βομβητής και ηχεί. Ταυτόχρονα σθήνει και η αντίστοιχη ενδεικτική λυχνία, από την οποία διαπιστώνεται το κύκλωμα που παρουσιάζει τη βλάβη.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο σύστημα αυτό δεν ηχεί ο βομβητής, σε περίπτωση διακοπής της ηλεκτρικής παροχής πλοίου, επειδή οι επαφές του ηλεκτρονόμου θα κλείνουν και θα αποκαθιστούν το κύκλωμά του, δεν θα υπάρχει ρεύμα για την τροφοδότησή του. Όμως όλες οι ενδεικτικές λυχνίες θα σθήσουν και αν τις ελέγχομε τακτικά, θα ειδοποιηθούμε για τη διακοπή της ηλεκτρικής παροχής. Αν επιθυμούμε τη λειτουργία του βομβητή και στην περίπτωση της διακοπής (βλάβης) της ηλεκτρικής παροχής πλοίου, πρέπει ο βομβητής να τροφοδοτείται από ανεξάρτητη παροχή συσσωρευτών, όπως στα συστήματα σημάνσεως γενικών βλαβών που αναπτύσσονται στην επόμενη παράγραφο.

3.7 Συστήματα σημάνσεως γενικών βλαβών.

Με τα συστήματα σημάνσεως γενικών βλαβών (γενικών συναγερμών) εξασφαλίζεται η άμεση και με απόλυτη βεβαιότητα ειδοποίηση για την ύπαρξη βλάβης ή για τη διακοπή τροφοδοτήσεως ορισμένης συσκευής ή μηχανήματος, που θα είχε επικίνδυνα αποτελέσματα στην ασφάλεια του πλοίου. Τα συστήματα αυτά συνήθως είναι ηχητικά και ηχούν αυτόματα με την αποκατάσταση της τροφοδοτήσεως της συσκευής ή του μηχανήματος που προστατεύεται και ειδοποιούν για την έναρξη της λειτουργίας τους. Με μεταγωγή του διακόπτη



Σχ. 3.7.

Κύκλωμα σημάνσεως γενικών θλαθών.

σιγής, που προσαρμόζεται στη μονάδα του βομβητή του, σταματά να ηχεί το σύστημα, αλλά είναι και έτοιμο να ηχήσει πάλι με την παρουσία θλάθης στη συσκευή ή με τη διακοπή της ηλεκτρικής παροχής προς τη συσκευή για οποιοδήποτε λόγο. Τα κυκλώματα συναγερμού (βομβητής ή και ενδεικτική λυχνία) τροφοδοτούνται από συσσωρευτές ή και ξηρά στοιχεία μεγάλης διάρκειας, ώστε να μπορούν να λειτουργούν και να ειδοποιούν ακόμη και κατά τη γενική διακοπή της ηλεκτρικής παροχής.

Στο σχήμα 3.7 εικονίζεται το κύκλωμα λειτουργίας συστήματος σημάνσεως γενικών θλαθών. Ο ηλεκτρονόμος, του οποίου το πηνίο παρεμβάλλεται σε σειρά στη γραμμή τροφοδοτήσεως της συσκευής, είναι διπλής ενέργειας. Δηλαδή η κινητή επαφή του κλείνει με την κάτω σταθερή επαφή, όταν το πηνίο του διαρρέεται από ρεύμα και με την επάνω σταθερή επαφή, όταν διακόπτεται το ρεύμα στο πηνίο του, λόγω της έλξεως του ελατηρίου. Το πηνίο του ηλεκτρονόμου παρουσιάζει ασήμαντη ωμική αντίσταση (χοντρό σύρμα) και έτσι δεν προκαλεί πτώση τάσεως στη συσκευή που τροφοδοτείται από τη γραμμή στην οποία παρεμβάλλεται σε σειρά. Όμως η πτώση τάσεως μπορεί να αποφεύγεται αποτελεσματικότερα, αν το πηνίο του ηλεκτρονόμου συνδέεται παράλληλα στη γραμμή τροφοδοτήσεως μετά από τις γενικές ασφάλειες της συσκευής.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7, ο γενικός διπολικός διακόπτης τροφοδοτήσεως της συσκευής είναι ανοικτός, οπότε η συσκευή δεν τροφοδοτείται. Έτσι δεν διαρρέεται από ρεύμα το πηνίο του ηλεκτρονόμου και η κινητή επαφή του κλείνει με την άνω γραμμή του κυκλώματος συναγερμού. Καθώς δύμας ο διακόπτης σιγής βρίσκεται στην κάτω γραμμή, ο βομβητής δεν τροφοδοτείται και δεν ηχεί. Όταν με το κλείσιμο του γενικού διακόπτη αποκατασταθεί η τροφοδότηση της συσκευής, το πηνίο του ηλεκτρονόμου θα διαρρέεται από ρεύμα και η κινητή επαφή του κλείνει με την κάτω γραμμή του κυκλώματος

συναγερμού, οπότε αποκαθίσταται η τροφοδότηση του βομβητή και ηχεί. Με μεταγωγή του διακόπτη σιγής στην άνω γραμμή, ανοίγεται το κύκλωμα συναγερμού και ο βομβητής δεν ηχεί, επί όσο χρόνο η συσκευή τροφοδοτείται και λειτουργεί κανονικά. Όταν διακοπεί η ηλεκτρική παροχή προς τη συσκευή για οποιοδήποτε λόγο (βλάβη ηλεκτρογεννήτριας, κάψιμο ασφαλειών, ανοιχθεί ο γενικός διακόπτης), η κινητή επαφή του ηλεκτρονόμου θα κλείσει με την επάνω γραμμή του κυκλώματος συναγερμού, οπότε πάλι τροφοδοτείται ο βομβητής και ηχεί. Με μεταγωγή του διακόπτη σιγής, σταματά να ηχεί ο βομβητής.

Σε ορισμένα συστήματα υπάρχει η δυνατότητα εναλλακτικής τροφοδοτήσεως του βομβητή και από την ηλεκτρική παροχή πλοίου. Αυτή μπορεί να γίνεται με μεταγωγέα διακόπτη (σχ. 3.7), ενώ σε σειρά παρεμβάλλεται αντίσταση κατάλληλης τιμής σε Ω και σε ισχύ, με την οποία εξασφαλίζεται η πτώση τάσεως που απαιτείται.

ΜΕΡΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

1) Φωτομετρικά μεγέθη και μονάδες μετρήσεως.

Στερεά γωνία: Αν θεωρηθεί κώνος με κορυφή το κέντρο σφαίρας ακτίνας r , ο οποίος στην επιφάνεια της σφαίρας αποκόπτει επιφάνεια εμβαδού S , ο λόγος

$$\omega = \frac{S}{r^2} \quad (1)$$

ορίζεται ως στερεά γωνία. Η μονάδα μετρήσεως της στερεάς γωνίας είναι το **στερεακτίνιο** (sterad). Από την (1) προκύπτει ότι η στερεά γωνία που ορίζεται από ολόκληρη τη σφαίρα είναι 4π sterad, ενώ η αντίστοιχη προς ημισφαίριο στερεά γωνία είναι 2π sterad.

Φωτεινή ροή ή Φωτεινή ισχύς: Είναι η ανά μονάδα χρόνου ακτινοβολούμενη ενέργεια από μία φωτεινή πηγή:

$$\Phi = \frac{dW}{dt} \quad (2)$$

Μονάδα φωτεινής ισχύος είναι το Lumen (lm).

Φωτεινή ένταση: Είναι η μέσα σε στοιχειώδη στερεά γωνία $d\omega$ στοιχειώδης φωτεινή ροή $d\Phi$, ανηγμένη στη στερεά γωνία $d\omega$:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (3)$$

Μονάδα μετρήσεως της φωτεινής εντάσεως (ή εντάσεως φωτεινής πηγής): είναι η Candela (cd). Από την (3) προκύπτει ότι ένα Lumen είναι ή φωτεινή ροή που εκπέμπεται στο εσωτερικό στερεάς γωνίας ενός sterad από φωτεινή πηγή ομοιόμορφης ακτινοβολίας εντάσεως μιας Candela.

Η **απόδοση ηλεκτρικής φωτεινής πηγής** εκφράζεται από το πηλίκο της αποδιδόμενης (από κάποιον ηλεκτρικό λαμπτήρα) φωτεινής ισχύος προς την καταναλισκόμενη (από τον ίδιο λαμπτήρα) ηλεκτρική ισχύ και υπολογίζεται σε lm/W .

Από τη (2) προκύπτει ότι η φωτεινή ενέργεια, που ονομάζεται και ποσότητα φωτός, εκφράζεται από το ολοκλήρωμα:

$$W = \int_0^T \Phi(t) \cdot dt \quad (4)$$

ή, προφανώς, από τη σχέση:

$$W = \Phi \cdot T \quad (5)$$

(εφόσον αναφερόμαστε σε φωτεινή πηγή σταθερής φωτεινής ροής). Η ποσότητα φωτός μετρείται σε lm.s ή lm.h.

Αν θεωρήσουμε στοιχειώδη επιφάνεια dS φωτιζόμενου σώματος, στην οποία προσπίπτει κάθετα φωτεινή ροή $d\Phi$, τότε ο φωτισμός της επιφάνειας δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (6)$$

μετρείται δε σε Lux (για ϕ εκφρασμένο σε lm και S σε m²).

Λαμπρότητα ακτινοβολούσας επιφανείας που μετρείται σε stilb (sb), προς ορισμένη κατεύθυνση είναι ο λόγος dl/dS' :

$$B = \frac{dl}{dS'} \quad (7)$$

όπου: dl είναι η φωτεινή ένταση της επιφάνειας κατά τη θεωρούμενη κατεύθυνση και dS' η προθολή της επιφάνειας σε επίπεδο κάθετο προς τη θεωρούμενη κατεύθυνση.

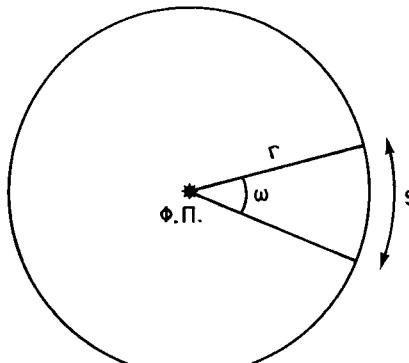
2) Νόμος της φωτομετρίας.

Στο σχήμα 1 φαίνεται φωτεινή πηγή, σταθερής εντάσεως I προς όλες τις διευθύνσεις μέσα σε στερεά γωνία ω. Η φωτεινή ροή Φ στο εσωτερικό της στερεάς γωνίας ω ισούται με το γινόμενο I . ω. Γράφοντας σφαίρα με κέντρο τη φωτεινή πηγή Φ.Π. και ακτίνα r, ορίζεται επάνω στην επιφάνειά της και από τη στερεά γωνία ω εμβαδό S, το οποίο δέχεται τη φωτεινή ροή Φ .

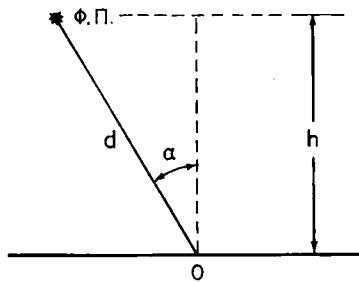
Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, ο φωτισμός της επιφάνειας S δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{I \cdot \omega}{\omega \cdot r^2} = \frac{I}{r^2} \quad (8)$$

Αν ήδη θεωρηθεί ότι η επιφάνεια $S \rightarrow 0$, τότε αυτή τείνει σε απείρως μικρή



Σχ. 1.



Σχ. 2.

επίπεδη επιφάνεια κάθετη προς την ακτίνα που καταλήγει στο κέντρο της. Συμβολίζοντας, στη συνέχεια, την ακτίνα με d , έχομε:

$$E = \frac{I}{d^2} \quad (9)$$

Βλέπομε, δηλαδή, ότι ο φωτισμός σ' ένα σημείο επιφάνειας, που είναι κάθετη προς την ευθεία, που ενώνει το παραπάνω σημείο με τη (σημειακή) φωτεινή πηγή, δίνεται από το πηλίκο της εντάσεως της φωτεινής πηγής στη διεύθυνση του σημείου προς το τετράγωνο της αποστάσεως φωτεινής πηγής-σημείου.

Η (9) ισχύει για την περίπτωση του κάθετου φωτισμού. Όταν οι φωτεινές ακτίνες προσπίπτουν πλάγια στη φωτιζόμενη επιφάνεια (σχήμα 2), τότε ισχύει

$$E = \frac{I}{d^2} \cdot \cos a \quad (10)$$

όπου a η γωνία μεταξύ της ευθείας φωτεινής πηγής-φωτιζόμενου σημείου O και της κατακόρυφης επάνω στη φωτιζόμενη επιφάνεια.

Η σχέση (10) αποτελεί το θεμελιώδη νόμο της φωτομετρίας, ενώ η (9) αποτελεί ειδική περίπτωση για $a = 0$ (τότε $\cos a = 1$).

Σημειώνεται ότι κατά την εκπόνηση φωτοτεχνικών μελετών προτιμάται (και επί πλέον εξυπηρετεί) η έκφραση του φωτισμού επιφάνειας σε συνάρτηση με το ύψος αναρτήσεως h του φωτιστικού σώματος (σχ. 2). Εφαρμογή απλών τριγωνομετρικών σχέσεων οδηγεί από τη (10) στην (11):

$$E = \frac{I}{h^2} \cos^3 a \quad (11)$$

Από τον τρόπο παρουσιάσεως των (10) και (11) προκύπτει ότι οι σχέσεις αυτές αναφέρονται στον οριζόντιο φωτισμό της μελετώμενης επιφάνειας. Ο φωτισμός σε επιφάνεια κάθετη προς αυτήν καλείται **κατακόρυφος φωτισμός** και δίνεται από τις σχέσεις.

$$E_k = \frac{I}{d^2} \sin a = \frac{I}{h^2} \cos^2 a \cdot \sin a \quad (12)$$

3) Νόμος του Lambert.

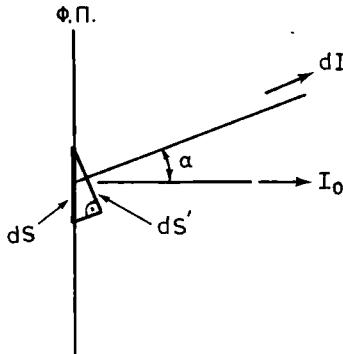
Ο νόμος του Lambert ορίζει: «Αν μία φωτεινή επιφάνεια έχει σταθερή λαμπρότητα προς όλες τις διευθύνσεις, τότε η έντασή της προς κάποια διεύθυνση, η οποία σχηματίζει γωνία a προς την κάθετη επί την επιφάνεια,

ισούται προς το γινόμενο της εντάσεως I_o κατά την κάθετη, επί το συνημίτονο της γωνίας a . Το σχήμα 3 διευκολύνει την κατανόηση του νόμου του Lambert:

από την (7) έχουμε $dI = B \cdot dS'$

Ισχύει εξάλλου: $dS' = dS \cdot \cos a$, επομένως $dI = B \cdot dS \cdot \cos a$

Από την (7) ούμως $I_o = B \cdot dS$, επομένως $dI = I_o \cdot \cos a$



Σχ. 3.

4) Ανάκλαση – Απορρόφηση – Διαφάνεια.

Ενώ το φως κατά τη διάδοσή του δια του κενού δεν υφίσταται καμιά μεταβολή, κατά τη διάδοσή του δια μέσου της ύλης ή όταν συναντά τη διαχωριστική επιφάνεια διαφορετικών οπτικών μέσων υφίσταται μεταβολές.

Έστω ότι δέσμη φωτός προσπίπτει σε λεία και στιλπνή επιφάνεια. Τότε, μέρος της προσπίπτουσας ακτινοθολίας ανακλάται επάνω σ' αυτήν και (υπό την προϋπόθεση, ότι η διαχωριστική επιφάνεια επιτρέπει την δια μέσου αυτής διέλευση του φωτός) ένα άλλο μέρος διέρχεται. Τρίτο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοθολίας απορροφάται.

Συμβολίζομε με Φ την προσπίπτουσα φωτεινή ροή και με Φ_r , Φ_d και Φ_a την ανακλώμενη, τη διερχομένη και την απορροφούμενη φωτεινή ροή αντίστοιχα. Ισχύει προφανώς:

$$\Phi = \Phi_r + \Phi_d + \Phi_a \quad (13)$$

Οι συντελεστές ανακλάσεως r , διαφάνειας d και απορροφήσεως a ορίζονται αντίστοιχα από τα πηλίκα:

$$r = \frac{\Phi_r}{\Phi} \quad (14)$$

$$d = \frac{\Phi_d}{\Phi} \quad (15)$$

$$\text{καὶ} \quad a = \frac{\Phi_a}{\Phi} \quad (16)$$

συνδέονται δε με τη σχέση:

$$r + d + a = 1 \quad (17)$$

Αν το σώμα, στο οποίο προσπίπτει η ακτινοθολία, είναι τελείως αδιαφανές, τότε συμβαίνει μόνο ανάκλαση και απορρόφηση, επομένως ισχύει:

$$\Phi_d = 0 \quad (18)$$

$$d = 0 \quad (19)$$

και

$$r + a = 1 \quad (20)$$

5) Λαμπτήρες πυρακτώσεως.

Η λειτουργία των λαμπτήρων πυρακτώσεως στηρίζεται στο φαινόμενο της θερμάνσεως (με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος) μεταλλικού νήματος ώσπου να λευκοπυρωθεί.

Από την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλίσκεται, μόνον ένα ποσοστό περί το 15% μετατρέπεται σε ωφέλιμη φωτεινή ενέργεια. Το υπόλοιπο ποσοστό εμφανίζεται κυρίως ως θερμική ενέργεια (απώλειες) αλλά και ως φωτεινή ακτινοθολία έξω από το ορατό φάσμα. Η απόδοση των λαμπτήρων πυρακτώσεως ανέρχεται σε 10-20 lm/W. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι αν ήταν δυνατή η «κατασκευή» μιας αντιστάσεως τέτοιας, ώστε όλη η παρεχόμενη σ' αυτήν ηλεκτρική ενέργεια να μετατρέπεται σε φωτεινή ακτινοθολία μήκους κύματος 5550 Å, τότε θα ήταν εφικτή απόδοση έως και 680 lm/W (στα 5550 Å ο οφθαλμός παρουσιάζει μέγιστη ευαισθησία). Επίσης, αν όλη η παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορούσε να μετατραπεί σε φωτεινή ακτινοθολία του ορατού φάσματος, η απόδοση θα ήταν περί τα 200 lm/W.

Αρχικά, οι κώδωνες των λαμπτήρων δεν περιείχαν αέρα, για να αποφεύγονται φαινόμενα οξειδώσεως του νήματος, των οποίων η ταχύτητα εξελίξεως ήταν υψηλή, αφού η θερμοκρασία λειτουργίας του νήματος είναι υψηλή. Αργότερα διαπιστώθηκε ότι η ύπαρξη μέσα στον κώδωνα αδρανούς αερίου υπό πίεση (συνήθως αργού ή άζωτου) έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση διαφυγής ηλεκτρονίων από το νήμα και τη μείωση της θερμοκρασίας του, ενώ στον κενό από αέρα κώδωνα η απώλεια θερμότητας οφείλεται αποκλειστικά σε ακτινοθολία, στους λαμπτήρες με αέριο η απώλεια θερμότητας πραγματοποιείται επιπλέον και δια μεταφοράς και δι' αγωγής. Συχνά τα αέρια που αναφέραμε χρησιμοποιούνται και ως μίγμα (90% αργόν, 10% άζωτο), ενώ το κρυπτόν έχει το πλεονέκτημα απέναντι στα άλλα δύο αέρια ότι συντελεί λιγότερο στην απώλεια θερμότητας δι' αγωγής και δια μεταφοράς από εκείνα. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο ατομικό του βάρος.

Οι σημερινοί λαμπτήρες πυρακτώσεως έχουν απόδοση πολύ ανώτερη (πάνω από 300%) σε σύγκριση με εκείνους που κατασκευάζονταν πριν από μερικές δεκαετίες.

Το νήμα είναι συνήθως από τουνγκοστένιο, επειδή τούτο έχει σημείο τήξεως 3350 °C αλλά και σχετικά μεγάλο έργο εξαγωγής των ηλεκτρονίων του.

Τα νήματα παράγονται σε τρεις διάφορες μορφές (ευθύγραμμα, ελικοειδή και με διπλή ελικοειδή περιέλιξη) με διάμετρο έως και 10 μμ. Οι δυο τελευταίες κατασκευές των νημάτων εξασφαλίζουν θράχυνση του νήματος και κατά

συνέπεια απλούστερη στήριξή του. Ο κώδωνας του λαμπτήρα έρχεται σε επαφή με τον κάλυκα αεροστεγώς, ώστε το νήμα που λειτουργεί είτε στο κενό είτε σε περιβάλλον αδρανούς αερίου, να είναι απομονωμένο από τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Συνηθέστερες κατασκευές των καλύκων είναι η κοχλιωτή (βιδωτή) και η τύπου bayonet (μπαγιονέτ). Η συγκολλητική ουσία μεταξύ κάλυκα και κώδωνα αντέχει σε θερμοκρασίες μέχρι 180° C. Αυτό επιβάλλει τη μέριμνα για την απαγωγή της θερμότητας, ώστε να μην αναπτυχθούν υψηλότερες θερμοκρασίες.

Η φωτεινή ροή των λαμπτήρων πυρακτώσεως και ο χρόνος ζωής τους εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του νήματος. Η φωτεινή ροή αυξάνεται και ο χρόνος ζωής μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του νήματος, λόγω αυξήσεως της ταχύτητας εξαχνώσεώς του.

Η αύξηση της θερμοκρασίας του νήματος οφείλεται κυρίως στις υπερτάσεις. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως – φωτεινή ροή σε lm, ισχύς σε W, απόδοση σε lm/W και χρόνος ζωής – μεταβάλλονται σε συνάρτηση με την τάση κατά τρόπο εκθετικό, σύμφωνα με τη γενική έκφραση (21).

$$\frac{\text{Τιμή του χαρακτηριστικού μεγέθους}}{\text{Ονομ. τιμή του χαρ/κού μεγέθους}} = \left(\frac{\text{Εφαρμοζόμενη τάση}}{\text{Ονομ. τάση λειτουργίας}} \right)^k \quad (21)$$

όπου ο εκθέτης κ παίρνει τις παρακάτω τιμές:

- για τη φωτεινή ροή: 3,55
- για τη φωτεινή απόδοση: 2
- για την ισχύ: 1,55
- για το χρόνο ζωής: -14(!).

Τα παραπάνω σημαίνουν ότι υπέρταση της τάξεως του 5% συνεπάγεται αύξηση της φωτεινής ροής κατά 19%, της φωτεινής αποδόσεως κατά 10%, της ισχύος κατά 8% και μείωση του χρόνου ζωής κατά 49%.

Το πρόβλημα της εξαχνώσεως του νήματος αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά τα τελευταία χρόνια με τη βοήθεια των αλογόνων (χλωρίου, ιαδίου, θρωμάτου και φθορίου). Μικρή ποσότητα ατμών ενός από τα αλογόνα (συνήθως ιαδίου) τοποθετείται στο εσωτερικό του κώδωνα, αντιδρά με το τουνγκοστένιο που έχει εξαχνωθεί και σχηματίζει το αντίστοιχο **αλογονίδιο** του τουνγκοστενίου.

Το αλογονίδιο επικάθεται στο νήμα και στη συνέχεια, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, διασπάται. Το τουνγκοστένιο αποτίθεται στο νήμα, ενώ το αλογόνο απελευθερώνεται, προκειμένου να επαναλάβει τη δράση του.

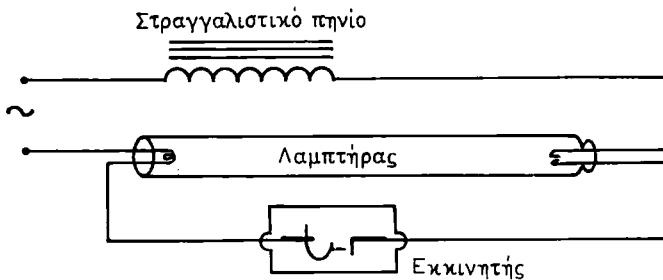
Έτσι, το νήμα τροφοδοτείται συνεχώς με τουνγκοστένιο, η συνολική εξάχνωση διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, ενώ παράλληλα αποφεύγεται σε μεγάλο βαθμό η επικάθηση τουνγκοστενίου στα τοιχώματα του κώδωνα, η οποία θα προκαλούσε το χαρακτηριστικό «μαύρισμα» του λαμπτήρα. Η δράση των αλογόνων, όπως έχει περιγραφεί, επέτρεψε την αύξηση της θερμοκρασίας του νήματος, τη βελτίωση της αποδόσεως και τη μείωση των διαστάσεων του κώδωνα, χωρίς κίνδυνο «μαυρίσματος». Ο χρόνος ζωής των λαμπτήρων αυτών (λαμπτήρων ιαδίνης) είναι 2000 h, διπλάσιος, δηλαδή από το χρόνο ζωής των συνηθισμένων λαμπτήρων πυρακτώσεως.

6) Λαμπτήρες φθορισμού.

Οι λαμπτήρες φθορισμού είναι λαμπτήρες εκκενώσεως ατμών υδραργύρου χαμηλής πίεσεως με φθορίζοντα τοιχώματα. Η εκκένωση δια μέσου των ατμών υδραργύρου προκαλεί ακτινοβολία στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος, η οποία με τη βοήθεια της φθορίζουσας ουσίας, μετατρέπεται σε ακτινοβολία ορατού μήκους κύματος.

Αποτελούνται από γυάλινο σωλήνα, στα άκρα του οποίου βρίσκονται δυο ηλεκτρόδια' στο εσωτερικό τους υπάρχει σταγόνα υδραργύρου και προσμίξεις ευγενών αερίων, συνήθως νέου και αργού. Η πίεση λειτουργίας, κάτω από θερμοκρασία τοιχωμάτων γύρω στους 40°C , είναι $5 \times 10^{-3} \text{ mm Hg}$. Μικρή πίεση μέσα στο σωλήνα προκαλεί μείωση των διαθεσίμων ίόντων και της αποδόσεως του λαμπτήρα, ενώ μεγάλη πίεση προκαλεί απώλεια ακτινοβολίας λόγω αυτοαπορροφήσεως.

Επειδή η εκκένωση δια μέσου των ατμών υδραργύρου είναι μια τυπική εκκένωση τόξου, είναι απαραίτητο να υπάρχει στο κύκλωμα ένα παθητικό στοιχείο σε σειρά, για τον έλεγχο της αυξήσεως του ρεύματος. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνει το στραγγαλιστικό πηνίο (ballast) (σχ. 4), το οποίο προθερμαίνει με τη βοήθεια του εκκινητή (βλ. παρακάτω) τα νήματα των ηλεκτροδίων, ώστε να αρχίσει η θερμιονική εκπομπή των ηλεκτρονίων. Επίσης, το στραγγαλιστικό πηνίο εξασφαλίζει την απαιτούμενη τάση εναύσεως του λαμπτήρα και σταθεροποιεί την ένταση του ρεύματος λειτουργίας της εκκενώσεως στην απαιτούμενη, για κάθε λαμπτήρα, τιμή.



Σχ. 4.

Ο εκκινητής (starter) συνδέεται σε σειρά με τα ηλεκτρόδια. Αποτελείται από διμεταλλικό έλασμα και είναι απαραίτητος για την έναυση του λαμπτήρα. Απλή σύνδεση του λαμπτήρα στην τάση τρυφοδοσίας δεν οδηγεί σε έναυση, γιατί τα ηλεκτρόδια είναι ψυχρά και δεν εκπέμπουν ηλεκτρόνια.

Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων του εκκινητή είναι πολύ μικρή. Σ' ένα εκκινητή πρέπει οι επαφές του διμεταλλικού διακόπτη να παραμένουν για αρκετό χρόνο κλειστές, ώστε να θερμαίνονται επαρκώς τα ηλεκτρόδια, ενώ ο ίδιος πρέπει να είναι κατάλληλος για μερικές χλιιάδες επαναφών.

Κατά την επιβολή της τάσεως τρυφοδοσίας (κλείσιμο του διακόπτη), ο μεν λαμπτήρας δεν διαρρέεται από ρεύμα, η δε τάση στα άκρα των ηλεκτροδίων του εκκινητή είναι επαρκής για την έναρξη εκκένωσης αίγλης. Η εκκένωση θερμαίνει το διμεταλλικό έλασμα του εκκινητή, που παραμορφώνεται και

κλείνει το υπάρχον διάκενο. Τότε διακόπτεται η εκκένωση αίγλης και το κύκλωμα εκκινητή-ηλεκτροδίων διαρρέεται από ισχυρό ρεύμα, το οποίο θερμαίνει τα ηλεκτρόδια του λαμπτήρα, ώστε να αρχίσει η εκπομπή ηλεκτρονίων. Στο μεταξύ, και επειδή έχει διακοπεί η εκκένωση αίγλης, το διμεταλλικό έλασμα ψύχεται και επανέρχεται στην αρχική του θέση, διακόπτοντας το κύκλωμα. Καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λαμπτήρα ο εκκινητής παραμένει εκτός κυκλώματος.

Η διακοπή, όμως, που έχει αναφερθεί, προκαλεί στα άκρα του λαμπτήρα επαγωγική τάση, με τη βοήθεια του στραγγαλιστικού πηνίου, μεγαλύτερη από την τάση του δικτύου. Αυτή, με τη σειρά της, προκαλεί την έναρξη της εκκενώσεως μέσω των ατμών του υδραργύρου. Οι ατμοί προέρχονται από την εξάτμιση της σταγόνας υδραργύρου, που βρίσκεται μέσα στο λαμπτήρα, λόγω της θερμάνσεως των νημάτων.

Εκτός από τους λαμπτήρες φθορισμού που αναφέραμε, οι οποίοι απαιτούν για τη λειτουργία τους εκκινητή, υπάρχουν λαμπτήρες που δεν απαιτούν την ύπαρξη εκκινητή, και είναι γνωστοί ως λαμπτήρες άμεσης εναύσεως. Με τη βοήθεια ειδικού στραγγαλιστικού πηνίου πραγματοποιείται συνεχής θέρμανση των νημάτων των ηλεκτροδίων, η οποία οδηγεί στη θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων. Έτσι, όταν κλείνει το κύκλωμα τροφοδοσίας, τα νήματα των ηλεκτροδίων είναι θερμά, ο υδράργυρος βρίσκεται, ήδη, υπό μορφή ατμών, οπότε έχουμε άμεση έναυση του λαμπτήρα.

Η σκόνη που συγκεντρώνεται στην επάνω επιφάνεια των σωλήνων δημιουργεί με την πάροδο του χρόνου αδιαφανές στρώμα που υποβιβάζει την απόδοση των λαμπτήρων. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη βοήθεια ενσωματωμένου κατόπτρου που καταλαμβάνει την επάνω επιφάνεια του λαμπτήρα και αντιστοιχεί σε γωνία 130° .

Η καταλληλότητα και η ποιότητα του στραγγαλιστικού πηνίου επηρεάζουν αποφασιστικά τη διάρκεια ζωής και την απόδοση του λαμπτήρα, γιατί τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του λαμπτήρα υπό την ονομαστική του τάση καθορίζονται από το στραγγαλιστικό πηνίο. Αν π.χ. το στραγγαλιστικό πηνίο τροφοδοτεί το λαμπτήρα με ρεύμα διαφορετικό από το κανονικό, τότε:

- Τα ηλεκτρόδια φθείρονται ταχύτερα και επιφέρουν καταστροφή του λαμπτήρα (όταν το παρεχόμενο ρεύμα είναι μεγαλύτερο από το κανονικό).
- Στην αντίθετη περίπτωση ο λαμπτήρας, επειδή υποτροφοδοτείται, δεν αποδίδει την κανονική φωτεινή ροή, και συνεπώς η λειτουργία του είναι αντιοικονομική.

Η φωτεινή ροή των λαμπτήρων φθορισμού μειώνεται με το χρόνο, λόγω γηράνσεως των υλικών. Η ισχύς του λαμπτήρα, η φωτεινή ροή, η ολική ισχύς και το ρεύμα του είναι αύξουσες συναρτήσεις της τάσεως τροφοδοσίας. Αντίθετα, η τάση του λαμπτήρα μειώνεται με την αύξηση της τάσεως τροφοδοσίας. Η απόδοση ενός λαμπτήρα φθορισμού (σε lm), μετά τις πρώτες 2000 ώρες λειτουργίας μειώνεται με μέσο ρυθμό $5\% / 1000$ ώρες λειτουργίας.

Ο χρόνος ζωής ενός λαμπτήρα φθορισμού είναι αντιστρόφως ανάλογος προς τον αριθμό αφών και σβέσεων (άνοιγμα και κλείσιμο του διακόπτη). Λαμπτήρας που λειτουργεί συνεχώς έχει τριπλάσιο ως τετραπλάσιο χρόνο ζωής σε σχέση με λαμπτήρα που λειτουργεί με συχνά αναβοσθησίματα.

Η θερμοκρασία των τοιχωμάτων του σωλήνα, δηλαδή η θερμοκρασία του

περιβάλλοντος χώρου, επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των λαμπτήρων φθορισμού. Οι συνηθισμένοι λαμπτήρες φθορισμού αποδίδουν τη μέγιστη φωτεινή ροή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C . Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία η απόδοση μειώνεται. Σε θερμοκρασία π.χ. περιβάλλοντος 70°C η απόδοση έχει πέσει στο 60%.

Σήμερα παράγονται λαμπτήρες φθορισμού που καλύπτουν όλες τις απαιτήσεις τόσο της καθημερινής ζωής όσο και πάρα πολλές ειδικές περιπτώσεις. Αυτοί κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- **Λαμπτήρες Warm White**, με ενεργειακή φασματική κατανομή παρόμοια προς εκείνη των λαμπτήρων πυρακτώσεως, με τους οποίους και συνδυάζονται ικανοποιητικότατα.
- **Λαμπτήρες White**, που συνδυάζονται ικανοποιητικά τόσο με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως όσο και με το φως της ημέρας.
- **Λαμπτήρες Daylight**, με ενεργειακή φασματική κατανομή παρόμοια προς εκείνη του φωτός της ημέρας, με το οποίο και συνδυάζονται πολύ ικανοποιητικά.

Η απόδοση των λαμπτήρων φθορισμού κυμαίνεται μεταξύ 30... 80 lm/W και η διάρκεια ζωής τους φθάνει τις 8000 ώρες.

7) Άλλοι λαμπτήρες εκκενώσεως.

Αυτοί διακρίνονται σε:

- **Λαμπτήρες ατμών υδραργύρου, υψηλής πιέσεως.** Ως προς το σημείο αυτό, δηλαδή την υψηλή πίεση, διαφέρουν από τους λαμπτήρες φθορισμού. Η αρχή της ηλεκτρικής λειτουργίας των δυο τύπων παρουσιάζει πολλά κοινά σημεία. Ο σωλήνας εκκενώσωσης κατασκευάζεται από χαλαζία που είναι ανθεκτικός στις αναπτυσσόμενες κατά την εκκένωση υψηλές θερμοκρασίες, ενώ εμφανίζει και πολύ χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής. Η πίεση μέσα στο σωλήνα εκκενώσεως είναι, ανάλογα με το λαμπτήρα, 2-10 at, ενώ η θερμοκρασία στο κέντρο της εκκενώσεως ανέρχεται σε 6000°K . Η θερμοκρασία αυτή μειώνεται ταχύτατα κατά την προσέγγιση στα τοιχώματα, όπου επικρατούν θερμοκρασίες γύρω στους 800°K . Οι λαμπτήρες αυτοί έχουν μορφή σωληνοειδή ή απιοειδή. Έχουν απόδοση 40...90 lm/W και διάρκεια ζωής έως 5000 ώρες.
- **Λαμπτήρες ατμών νατρίου.** Διακρίνονται σε **χαμηλής** και **υψηλής πιέσεως**. Οι λαμπτήρες ατμών νατρίου χαμηλής πιέσεως αποτελούν σήμερα τη φωτεινή πηγή με τη μεγαλύτερη απόδοση ($130...180\text{ lm/W}$). Σ' αυτούς η πίεση μέσα στο σωλήνα εκκενώσεως είναι μερικά χιλιοστά στήλης υδραργύρου (ο συνδυασμός θερμοκρασίας 260°C και πιέσεως $5 \times 10^{-3} \text{ mmHg}$ ικανοποιεί τις απαιτήσεις της εκκενώσεως κατά τον καλύτερο τρόπο). Στους λαμπτήρες ατμών υψηλής πιέσεως η πίεση είναι γύρω στα 200 mm Hg . Η απόδοσή τους είναι $100...120\text{ lm/W}$.
- **Οι λαμπτήρες ξένου, φθορισμού ψυχρής καθόδου, υδραργύρου πολύ χαμηλής πιέσεως (βακτηριοκτόνοι), «μαύρου φωτός», αίγλης κλπ.** είναι επίσης λαμπτήρες εκκενώσεως.

8) Είδη φωτισμού.

Διακρίνομε κατ' αρχήν τον εσωτερικό από τον εξωτερικό φωτισμό ή, για να

είναι σαφέστερο το κριτήριο διαχωρισμού, το φωτισμό εσωτερικών χώρων από εκείνο των εξωτερικών χώρων.

Στο φωτισμό εσωτερικών χώρων διακρίνομε το γενικό και τον τοπικό φωτισμό. Ο γενικός φωτισμός εξυπηρετεί ολόκληρο το χώρο, για τον οποίο προορίζεται, ενώ ο τοπικός συγκεκριμένες θέσεις εργασίας. Συχνά συνυπάρχουν στον ίδιο χώρο και τα δύο είδη φωτισμού (μικτός φωτισμός).

Γενικός φωτισμός χρησιμοποιείται σε χώρους όπου δεν υπάρχουν μόνιμες θέσεις εργασίας ή όπου υπάρχουν μόνιμες θέσεις εργασίας σε πυκνή διάταξη (π.χ. αίθουσες υποδοχής, αποθήκες, αμφιθέατρα, σχολεία κ.λπ.).

Μικτός φωτισμός χρησιμοποιείται σε χώρους όπου, υπάρχει μεν η απαίτηση να φωτίζεται με γενικό φωτισμό ο χώρος, υπάρχει όμως παράλληλα η ανάγκη τοπικού φωτισμού, που συμπληρώνει το γενικό, στις θέσεις εργασίας (π.χ. μικτός φωτισμός χρησιμοποιείται στα μηχανουργεία, όπου το γενικό φωτισμό συμπληρώνει ο τοπικός στις εργαλειομηχανές και στις άλλες μόνιμες θέσεις εργασίας). Τοπικός, τέλος, φωτισμός χρησιμοποιείται όπου απαιτούνται μεγάλες εντάσεις φωτισμού ή μεγάλες αντιθέσεις σκιών (π.χ. σε θέσεις γραφομηχανών), σχεδόν πάντοτε δε, συνδυάζεται με βοηθητικό γενικό φωτισμό.

Ο τοπικός φωτισμός διακρίνεται σε **κατευθυνόμενο** και **διάχυτο**. Μόνο τοπικός φωτισμός πρέπει να αποφεύγεται, γιατί οι έντονες αντιθέσεις μεταξύ φωτιζομένων και μη επιφανειών ή τμημάτων χώρου είναι κουραστικές για τα μάτια.

Ο γενικός φωτισμός υποδιαιρείται στις εξής κατηγορίες: άμεσος, ημιάμεσος, διαχυτικός, έμμεσος-άμεσος, ημιέμμεσος και έμμεσος, ανάλογα με τον τύπο των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιούνται. Η κατάταξη των φωτιστικών σωμάτων σε ομώνυμες προς τις παραπάνω κατηγορίες γίνεται ανάλογα με την κατανομή της συνολικής φωτεινής ροής ως προς το οριζόντιο επίπεδο:

Κατηγορία Φωτιστικού Σώματος	Κατανομή της φωτεινής ροής ως προς το οριζόντιο επίπεδο (%)	
Άμεσος	Προς τα άνω 0...10	Προς τα κάτω 90..100
Ημιάμεσος	10..40	60..90
Διαχυτικό	40..60	40..60
Έμμεσος-Άμεσος	40..60	40..60
Ημιέμμεσος	60..90	10..40
Έμμεσος	90..100	0..10

Επειδή δεν φαίνεται να υπάρχει, εκ πρώτης όψεως, διαφορά μεταξύ διαχυτικών και εμμέσων-άμεσων φωτιστικών σωμάτων, αναφέρομε ότι στη μεν πρώτη περίπτωση είναι ανεκτή διαφορά μεταξύ φωτεινής ροής προς τα άνω και προς τα κάτω έως και 20%, ενώ στη δευτερη έως και 10%.

Ο άμεσος φωτισμός επιτυγχάνεται με αδιαφανείς σκιάδες που καλύπτουν το λαμπτήρα στο επάνω μέρος του. Ο ημιάμεσος με φωτιστικά σώματα από θαμπό ή γαλακτόχρωμο γυαλί που καλύπτουν το επάνω μέρος του λαμπτήρα. Ο διαχυτικός με γυάλινους κλειστούς κώδωνες ή γαλακτόχρωμα πλαστικά

περιβλήματα. Ο έμμεσος-άμεσος με κατασκευές, οι οποίες, με μορφή οριζόντιας στεφάνης, περιβάλλουν το λαμπτήρα. Ο ημιέμμεσος με φωτιστικά σώματα με διαχέουσα επιφάνεια ή ημιδιαφανή, που καλύπτουν το λαμπτήρα από το κάτω μέρος του, ενώ στην περίπτωση του εμμέσου φωτισμού χρησιμοποιούνται φωτιστικά σώματα, όπως στον άμεσο φωτισμό, αλλά με αντίθετη κατεύθυνση ή λαμπτήρες μέσα σε γύψινες θήκες, σε εσοχές των τοίχων κ.λπ. Ο άμεσος φωτισμός δημιουργεί μεγάλες εντάσεις φωτισμού στις επιφάνειες εργασίας κατά οικονομικό τρόπο, δημιουργεί, όμως, έντονες σκιές. Έτσι, περιορίζεται φαινομενικά ο χώρος εργασίας, επειδή το επάνω μέρος του μένει σκοτεινό και προκαλείται αίσθημα θαμβώσεως, όταν αυτός που βρίσκεται μέσα στο χώρο στρέψει το βλέμμα του προς τα πάνω. Πάντως, ο άμεσος φωτισμός συνεπάγεται μικρό κόστος εγκαταστάσεως και συντηρήσεως, έχει μεγάλο θαθμό αποδόσεως, αλλά συχνά υστερεί σε εμφάνιση.

Ο ημιάμεσος φωτισμός δίνει ασθενέστερες σκιές απ' ότι ο άμεσος, εξασφαλίζει γενικά ωραιότερη εμφάνιση του χώρου, χωρίς, πάντως, να ενδείκνυται για χώρους με σκουρόχρωμες οροφές και τοίχους.

Ο διαχυτικός φωτισμός δίνει ασθενείς σκιές και χρησιμοποιείται σε χώρους (π.χ. γραφεία) όπου η οροφή είναι ανοικτόχρωμη, ώστε να αντανακλάται προς τα κάτω το φως που ακτινοθολείται προς τα επάνω. Ενδείκνυται ιδιαίτερα για χώρους με μικρό ή μέσο ύψος.

Για τον έμμεσο-άμεσο φωτισμό ισχύουν σε γενικές γραμμές τα όσα έχουν αναφερθεί και για το διαχυτικό φωτισμό, με την εξαίρεση φυσικά, ότι στην περίπτωση αυτή υπάρχει έντονη σκιά στους τοίχους και στο ύψος των λαμπτήρων.

Ο ημιέμμεσος φωτισμός είναι σκόπιμο να εφαρμόζεται μόνον όταν οι οροφές και οι τοίχοι έχουν ανοικτά χρώματα. Δίνει, πάντως, ελάχιστες σκιές και αρκετά ομοιόμορφη ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας, είναι, όμως, μάλλον αντιοικονομικός. Είναι κατάλληλος φωτισμός για γραφεία, εργαστήρια κ.λπ.

Ο έμμεσος, τέλος, φωτισμός έχει μικρή απόδοση, χρησιμοποιείται όμως πολύ γιατί δίνει μεγάλη ομοιομορφία φωτισμού και καλά αισθητικά αποτελέσματα, χωρίς σκιές και χωρίς ενδεχόμενο προκλήσεως θαμβώσεως. Είναι, οπωσδήποτε, αντιοικονομικός, ιδιαίτερα όταν οι οροφές και οι τοίχοι είναι σκουρόχρωμοι.

9) Χρήσεις των διαφόρων λαμπτήρων.

Για το φωτισμό εσωτερικών χώρων χρησιμοποιούνται:

- Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως (σε κάθε περίπτωση).
- Οι λαμπτήρες ατμών υδραργύρου υψηλής πιέσεως (σε βιομηχανικούς χώρους, για την ανάπτυξη φυτών, σε φωτοτυπεία και όπου, γενικά, δεν υπάρχει απαίτηση πιστής αποδόσεως των χρωμάτων αλλά μόνο οικονομικής λειτουργίας).
- Οι λαμπτήρες μικτού φωτισμού ατμών υδραργύρου υψηλής πιέσεως και πυρακτώσεως (σε βιομηχανικούς χώρους).
- Οι λαμπτήρες ατμών νατρίου (σε χυτήρια, χαλυβουργεία, σήραγγες ορυχείων κ.λπ., επειδή δίνουν μονοχρωματικό - κίτρινο - φως δημιουργώντας σαφέστατες οπτικές εντυπώσεις) και
- Οι λαμπτήρες φθορισμού (σχεδόν σε κάθε περίπτωση).

Για το φωτισμό εξωτερικών χώρων χρησιμοποιούνται:

- Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως (σε κάθε περίπτωση).
- Οι λαμπτήρες ατμών υδραργύρου υψηλής πιέσεως (σε κήπους, προσόψεις κτιρίων και όπου δεν υπάρχει αυστηρή απαίτηση πιστής αποδόσεως των χρωμάτων).
- Οι λαμπτήρες μικτού φωτισμού (για το φωτισμό περιβόλων).
- Οι λαμπτήρες ατμών νατρίου (σε λιμάνια, τελωνεία).
- Οι λαμπτήρες φθορισμού (σχεδόν σε κάθε περίπτωση)
- Οι σωλήνες νέον (φωτεινές επιγραφές, διαφημίσεις) και
- Οι λαμπτήρες ξένου (για φωτισμό μεγάλων εξωτερικών επιφανειών).

10) Φωτισμός εσωτερικών χώρων.

Για να είναι ικανοποιητική και αποτελεσματική μία εγκατάσταση φωτισμού, εκτός από την ποσοτική συνθήκη που αναφέρεται στη μέση ένταση φωτισμού και η οποία πρέπει να πληρούται, πρέπει να ικανοποιεί και διάφορες ποιοτικές συνθήκες, όπως:

- Αποφυγή της άμεσης ή έμμεσης θαμβώσεως που μειώνει την οπτική άνεση.
- Καλή κατανομή των λαμπτήρων μεταξύ των αντικειμένων που πρόκειται να φωτισθούν και του περιθάλλοντός τους, σε συνάρτηση και με τη χρήση του χώρου.
- Φασματική κατανομή του φωτός σε αντιστοιχία με τη χρησιμοποίηση του χώρου.
- Δημιουργία θετικής ψυχολογικής καταστάσεως σε αυτούς που θα χρησιμοποιήσουν το χώρο.

Ένα ακόμη ποσοτικό κριτήριο που αναφέρεται στην ομοιομορφία του φωτισμού, χρησιμοποιείται συχνά για τον τελικό έλεγχο της ορθής επιλογής και διατάξεως των φωτιστικών σωμάτων.

Ομοιομορφία φωτισμού καλείται ο λόγος της ελάχιστης εντάσεως φωτισμού σε ένα χώρο προς τη μέση ένταση φωτισμού στον ίδιο χώρο.

Ακολουθεί ένα παράδειγμα υπολογισμού φωτισμού εσωτερικού χώρου. Σημειώνεται ότι, προκειμένου να γίνουν παρόμοιοι υπολογισμοί σε τυχόντα εσωτερικό χώρο, απαιτείται η προσφυγή σε πίνακες διαφόρων συντελεστών (π.χ. συντελεστής φωτιστικής αποδόσεως του χώρου) και τεχνικών χαρακτηριστικών λαμπτήρων. Η παράθεση των αντιστοίχων πινάκων δεν περιλαμβάνεται στο σκοπό του θιβλίου αυτού. Τα απαιτούμενα στοιχεία μπορούν να αναζητηθούν σε ειδικά θιβλία ή σε καταλόγους εταιρειών κατασκευής λαμπτήρων. Πάντως, κατά την παρουσίαση του παραδείγματος, σημειώνονται με αστερίσκο (*) οι θέσεις όπου χρειάσθηκε η προσφυγή σε πίνακες.

10.1 Παράδειγμα υπολογισμών.

Ζητείται ο υπολογισμός του φωτισμού του χώρου γραφείων του σχήματος 5, όταν είναι γνωστά τα εξής:

Μήκος χώρου: 8,4 m

Πλάτος χώρου: 7,5 m

Υψος χώρου: 3,3 m

Οροφή: ανοικτόχρωμη

Τοίχοι: ημιανοικτόχρωμοι

Δάπεδο: ημιανοικτόχρωμο

Επειδή έχουμε χώρο γραφείων με τοίχους και οροφή ανοικτού χρώματος επιλέγομε ημιέμμεσο φωτισμό, με φωτιστικά σώματα έμμεσου συγκεντρωτικού φωτισμού.

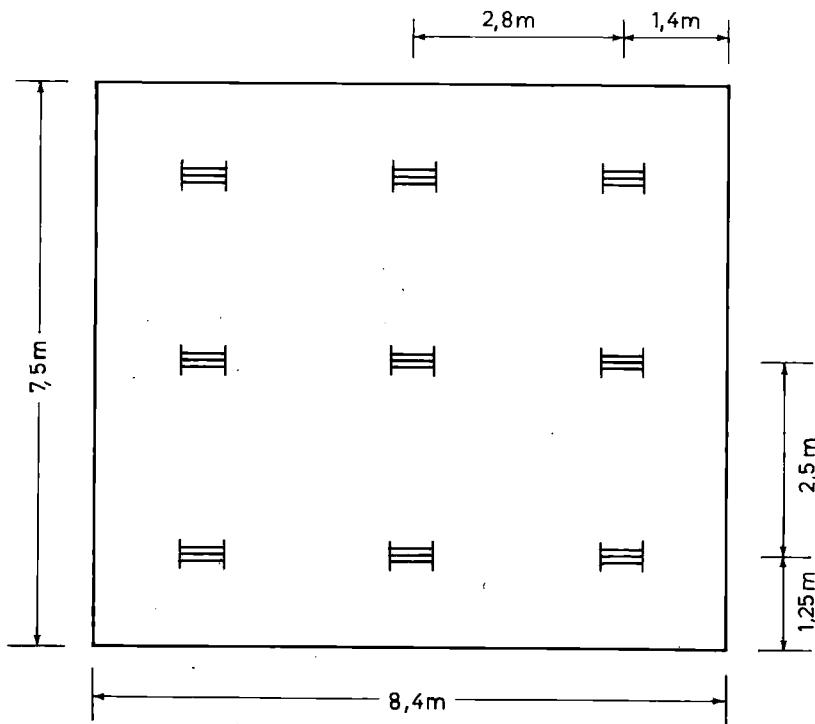
Για ημιέμμεσο φωτισμό με συγκεντρωτικά φωτιστικά σώματα δίνεται (*) ότι η απόσταση του κέντρου των λαμπτήρων από την οροφή πρέπει να είναι το 20%... 30% του ύψους του χώρου, δηλαδή μεταξύ 66 και 99 cm. Επιλέγομε απόσταση 80 cm.

Η μεταξύ γειτονικών φωτιστικών σωμάτων απόσταση πρέπει (*) να είναι 3πλάσια... 5πλάσια της παραπάνω απόστασεως των 0,8 m, μεταξύ δηλαδή 2,4 και 4,0 m. Κατά τη διεύθυνση της διαστάσεως των 7,5 m επιλέγομε απόσταση 2,5 m, ενώ κατά τη διεύθυνση της διαστάσεως των 8,4 m επιλέγομε απόσταση 2,8 m. Σημείωση: Ισχύει αφ' ενός $2,4 < 2,5 < 4,0$ και $2,4 < 2,8 < 4,0$, αφ' επέρου δε τα πηλίκα των διαιρέσεων $7,5/2,5$ και $8,4/2,8$ είναι ακέραιοι αριθμοί (πράγμα απαραίτητο για καλαίσθητη κατανομή των φωτιστικών στην οροφή). Επομένως, έχουν, ήδη, καθορισθεί τα σημεία αναρτήσεως των φωτιστικών σωμάτων και σημειώνονται στο σχήμα 5. Υπολογίζομε (*) το δείκτη χώρου K, ο οποίος για τον ημιέμμεσο φωτισμό δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{3 \cdot l \cdot b}{2h' (l + b)}$$

όπου l και b είναι το μήκος και το πλάτος του χώρου αντίστοιχα, ενώ h' είναι το ύψος της οροφής πάνω από το επίπεδο μετρήσεως. Το επίπεδο μετρήσεως λαμβάνεται (*) σε ύψος 0,85 m πάνω από το δάπεδο, επομένως $h = 3,3 - 0,85 = 2,45$ m. Συνεπώς προκύπτει:

$$K = \frac{3 \times 8,4 \times 7,5}{2 \times 2,45 \times (8,4 + 7,5)} = 2,43$$



Σχ. 5

Βάσει των χαρακτηριστικών των επιφανειών του χώρου και για $K = 2,43$ θρίσκομε (*) το βαθμό φωτιστικής αποδόσεως του χώρου (η_x):

$$\eta_x = 0,66$$

Για ημιέμμεσο φωτισμό δίνεται (*) ότι ο βαθμός αποδόσεως του φωτιστικού σώματος είναι $\eta_o = 0,60 \dots 0,80$. Επιλέγομε μια μέση τιμή $\eta_o = 0,70$.

Από τη σχέση $\eta_\phi = \eta_x \cdot \eta_o$, όπου η_ϕ ο βαθμός αποδόσεως φωτισμού, υπολογίζομε αυτόν το συντελεστή: $\eta_\phi = \eta_x \cdot \eta_o = 0,66 \times 0,70 = 0,46$.

Η απαιτούμενη ένταση φωτισμού για γραφεία επιλέγεται (*) ίση προς 250 Lux.

Από τη σχέση

$$\Phi_o = \frac{E \cdot F \cdot Z}{\eta_\phi \cdot \eta}$$

υπολογίζεται η φωτεινή ισχύς του κάθε φωτιστικού σώματος (Φ_o). Στη σχέση αυτή E είναι ο απαιτούμενος φωτισμός, F η επιφάνεια (κάτοψη) του χώρου, Z ο συντελεστής προσαυξήσεως, ανάλογα με το είδος του φωτισμού, την περιεκτικότητα του αέρα σε σκόνη και τη συχνότητα καθαρισμού των φωτιστικών συσκευών και επιφανειών και η το πλήθος των φωτιστικών σωμάτων. Για ημιέμμεσο φωτισμό, μικρή περιεκτικότητα του αέρα σε σκόνη και καθαρισμό των φωτιστικών κατ' έτος έχομε (*) $Z = 1,33$, επομένως:

$$\Phi_o = \frac{E \cdot F \cdot Z}{\eta_\phi \cdot \eta} = \frac{250 \times 7,5 \times 8,4 \times 1,33}{0,46 \times 9} = 5060 \text{ lm}$$

Από κατάλογο κατασκευαστή επιλέγομε (*) λαμπτήρες φθορισμού 25W/220V λευκού χρώματος γενικής χρήσεως, με φωτεινή ισχύ καθενός 1800 lm.

Επομένως, ανά φωτιστικό σώμα θα χρησιμοποιηθούν τρεις τέτοιοι λαμπτήρες φωτεινής, ισχύος $39 \times 1800 = 5400 \text{ lm}$ έναντι 5060 lm , που απαιτούνται τουλάχιστον. Αυτό θα έχει ως συνέπεια την αύξηση του μέσου φωτισμού από 250 lx σε $250 \times 5400/5060 = 267 \text{ lx}$.

11) Υπολογισμός φωτισμού εξωτερικών χώρων.

Κατά τους φωτομετρικούς υπολογισμούς εξωτερικού χώρου, η ένταση φωτισμού υπολογίζεται είτε στο έδαφος είτε σε οριζόντιο επίπεδο σε ύψος 20 cm επάνω από αυτό.

Τα φωτιστικά σώματα που χρησιμοποιούνται ή είναι τοποθετημένα σε στύλους ή κρεμασμένα από σύρματα αναρτήσεως, σε ύψος πάνω από 7 m από το έδαφος (συνήθως 8...10 m).

Για να θρεθεί η μέση ένταση φωτισμού σε επιφάνεια εξωτερικού χώρου, χρησιμοποιείται η βασική σχέση (10), αφού εφαρμοσθεί η παρακάτω διαδικασία:

- Ανάλογα με το σχήμα, είδος, περιβάλλον και τυχόν ειδικές απαιτήσεις για το φωτισμό της συγκεκριμένης εξωτερικής επιφάνειας, επιλέγονται από καταλόγους κατασκευαστών τα κατάλληλα φωτιστικά σώματα και οι θέσεις, όπου θα τοποθετηθούν. Αν π.χ. πρόκειται για δρόμο στο ύπαιθρο, επιλέγονται σώματα με συγκεντρωτικό φωτισμό, ενώ αν πρόκειται για δρόμο σε αστική περιοχή, περιβαλλόμενο από κτίρια, θα πρέπει να επιλεγούν φωτιστικά σώματα μεγάλου εύρους, ώστε να φωτίζονται και να αναδεικνύονται τα περιβάλλοντα κτίρια. Επιπλέον, χρησιμοποίηση φωτιστικών μεγάλου εύρους επιτρέπει μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους και εξασφαλίζει μικρές αντιθέσεις φωτισμού.
- Η επιφάνεια που θα φωτισθεί χωρίζεται σε ίσα τετραγωνικά τμήματα και υπολογίζεται η ένταση (οριζόντιου) φωτισμού στο κέντρο του κάθε

τετραγώνου. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος των εντάσεων φωτισμού που έχουν βρεθεί. Είναι φανερό ότι πρόκειται για προσεγγιστικό υπολογισμό, ο οποίος, πάντως, επιβαρύνεται με τόσο μικρότερο σφάλμα, όσο μικρότερες επιλεγούν οι διαστάσεις των τετραγωνικών τμημάτων. Τυχόν συμμετρία που υπάρχει στη διάταξη των φωτιστικών σώματων θα πρέπει να αξιοποιηθεί για την ελαχιστοποίηση των απαιτουμένων υπολογισμών: σε μία τέτοια περίπτωση απαιτείται οι υπολογισμοί να γίνουν σε μέρος μόνο της επιφάνειας.

- Οι παράμετροι που πρέπει να υπολογισθούν, ώστε με εφαρμογή της (10) να φθάσουμε στο φωτισμό του κέντρου ενός τετραγωνικού τμήματος είναι η φωτεινή ένταση I, η απόσταση d και η γωνία a. Η απόσταση d και η γωνία a υπολογίζονται βάσει της σχετικής θέσεως φωτιστικού σώματος-κέντρου τετραγωνικού σχήματος, ενώ η ένταση I θα βρεθεί, για την εν τω μεταξύ γνωστή γωνία a, από τη **φωτομετρική καμπύλη** του χρησιμοποιούμενου φωτιστικού. Η φωτομετρική καμπύλη είναι ένα διάγραμμα μεταβολής του I συναρτήσει του a, αναφερόμενο σε φωτεινή ισχύ του ή των λαμπτήρων του φωτιστικού σώματος ίση με 1000 lm (διατίθεται από τους κατασκευαστές φωτιστικών). Είναι προφανές ότι οι προκύπτουσες από τη φωτομετρική καμπύλη φωτεινές εντάσεις I πρέπει να αυξομειωθούν ανάλογα με το αν η φωτεινή ισχύς των χρησιμοποιουμένων φωτιστικών σώματων είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από 1000 lm. Είναι προφανές ότι ο φωτισμός του κέντρου ενός τετραγωνικού τμήματος θα προκύψει προσθέτοντας τους «φωτισμούς» που δημιουργούν στο σημείο αυτό όλα τα φωτιστικά σώματα της εγκαταστάσεως.

Τα παραπάνω ισχύουν με την προϋπόθεση ότι τα χρησιμοποιούμενα φωτιστικά μπορούν να θεωρηθούν ως σημειακές φωτεινές πηγές, που εμφανίζουν συμμετρία της φωτομετρικής καμπύλης σ' όλους τους άξονες.

Όταν χρησιμοποιούνται φωτιστικά σώματα που δεν εμφανίζουν συμμετρία φωτομετρικής καμπύλης σε όλους τους άξονες (π.χ. γραμμικές φωτεινές πηγές, λαμπτήρες φθορισμού), πρέπει ο κατασκευαστής να δίνει φωτομετρικές καμπύλες για όλες τις γωνίες μεταξύ των δυο κυρίων αξόνων του φωτιστικού σώματος.

Η ανάπτυξη του τρόπου υπολογισμού σε μία τέτοια περίπτωση ξεφεύγει από τα όρια του βιβλίου αυτού.

12) Φωτισμός λιμανιών.

Οι χώροι που ανήκουν σ' ένα λιμάνι βρίσκονται άλλοι στη θάλασσα και άλλοι στη στεριά και ο καθένας εξυπηρετεί ορισμένες λειτουργίες: Έτσι έχομε στη θάλασσα τη θαλάσσια οδό προσεγγίσεως και στη στεριά τις αποβάθρες, τους στεγασμένους και υπαίθριους αποθηκευτικούς χώρους, τους σταθμούς μεταφορτώσεως, τους δρόμους επικοινωνίας κ.λπ. Ακόμη, στον ευρύτερο χώρο του λιμανιού εντάσσονται τυχόν υπάρχοντα συνεργεία επισκευών, δεξαμενές κ.λπ.

Ο φωτισμός αυτού του συμπλέγματος χώρων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η κίνηση και το μέγεθος του λιμανιού, οι κλιματολογικές συνθήκες κ.ά.

Διεθνείς κανονισμοί, αναφερόμενοι ειδικά στο φωτισμό λιμανιών, δεν

υπάρχουν. Από την άλλη μεριά. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι σε κάθε λιμάνι υπάρχουν ορισμένες ειδικές ανάγκες που επιβάλλουν, ενδεχομένως, τη χρησιμοποίηση ιδιαίτερης τεχνικής. Αυτή βέβαια δεν επιτρέπεται να αντιβαίνει σε ορισμένες, ήδη καθιερωμένες στην πράξη, γενικές αρχές φωτισμού λιμανιών, στις οποίες και θα αναφερθούμε στη συνέχεια.

Για να βοηθηθεί η προσέγγιση σκαφών στο λιμάνι, πρέπει να σηματοδοτηθούν οι δίαιυλοι, τους οποίους χρησιμοποιούν τα προσεγγίζοντα (αλλά και αναχωρούντα) σκάφη. Η σηματοδότηση αυτή μπορεί να γίνει με την εκπομπή φωτεινής ακτινοβολίας, ορατής από απόσταση 20 ναυτικών μιλλίων, κατά τον άξονα του διαιύλου.

Γι' αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθούν προβολείς με λαμπτήρες μεγάλης λαμπρότητας. Έτσι, κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορούν να χρησιμοποιηθούν λαμπτήρες ξένου (π.χ. λαμπτήρες 1600 W/10⁷ cd φωτεινή ένταση κατά τον άξονα) και κατά τη διάρκεια της νύχτας λαμπτήρες αλογόνου των 250 W. Ανάλογα με τις επικρατούσες στην περιοχή συνθήκες ορατότητας, η ισχύς των λαμπτήρων αυτών μπορεί να ρυθμίζεται.

Συνιστάται ακόμη, να φωτίζεται και η επιφάνεια των διαιώλων προσεγγίσεως, ώστε τα πλοία να κινούνται με ασφάλεια μέσα σ' αυτούς. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται λαμπτήρες νατρίου υψηλής πιέσεως.

Για την άνετη προσέγγιση των πλοίων στις αποβάθρες, αλλά και για την ασφάλεια των ατόμων που κινούνται κοντά σ' αυτές, είναι χρήσιμο να φωτίζονται οι θέσεις προσδέσεως. Σε ορισμένα λιμάνια χρησιμοποιούνται δυο σειρές προβολέων, μία σειρά 6 προβολέων περιορισμένης δέσμης και μία σειρά άλλων 6 προβολέων ανοικτής δέσμης, με δυο λαμπτήρες νατρίου υψηλής πιέσεως 250 W ανά προβολέα. Όταν πλησιάζει το πλοίο, ορισμένοι λαμπτήρες σβήνουν, οπότε δημιουργείται μια μαύρη γραμμή η οποία, στην περίπτωση της ορθής προσεγγίσεως, εφάπτεται με το πλοίο, διευκολύνοντας κατ' αυτό τον τρόπο τον πλοίαρχο.

Όσον αφορά στο φωτισμό της αποβάθρας, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω κριτήρια, κατά την επιλογή του: Απαιτούνται αρκετά μεγάλες εντάσεις φωτισμού, τόσο για λόγους ασφαλείας όσο και για λόγους διευκολύνσεως της εργασίας. Η χρωματική απόδοση των πηγών πρέπει να είναι καλή, ενώ είναι ανεπιθύμητη η εγκατάσταση στύλων στους χώρους διακινήσεως εμπορευμάτων, ώστε να μη δυσχεραίνεται η κίνηση των διαφόρων μηχανημάτων, οχημάτων κ.λπ.

Μία λύση, που χρησιμοποιείται συχνά, είναι η τοποθέτηση προβολέων στα δικτυώματα των γερανών και των υποστέγων. Αυτό έχει το μειονέκτημα μιας μάλλον μικρής εντάσεως φωτισμού, λόγω της αναγκαστικής τοποθετήσεως των προβολέων σε μεγάλα ύψη.

Σε μεγάλους υπαίθριους χώρους αποθηκεύσεως εμπορευμάτων δεν είναι δυνατή η αποφυγή εγκαταστάσεως στύλων: Τηρουμένων μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των στύλων (200 m), οι προβολείς τοποθετούνται σε μεγάλο ύψος (30 m), ενώ οι συνήθως χρησιμοποιούμενοι λαμπτήρες είναι νατρίου υψηλής πιέσεως. Η ένταση φωτισμού που απαιτείται στους χώρους αποθηκεύσεως εμπορευμάτων είναι η μισή από εκείνη που απαιτείται για τη φορτοεκφόρτωση (20...30 lx). Προβολείς τοποθετημένοι στην αποβάθρα και σε μεγάλο ύψος πρέπει να

ρυθμίζονται έτσι, ώστε να αποφεύγεται η θάμβωση των πλοιάρχων των σκαφών που προσεγγίζουν.

Οι κύριοι δρόμοι κυκλοφορίας φωτίζονται με λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσεως, με απαιτήσεις ως προς τη μέση λαμπρότητα τα $1,5\ldots 2 \text{ cd/m}^2$. Επειδή στις διασταύρωσεις οι απαιτήσεις διπλασιάζονται στα $2,5\ldots 3 \text{ cd/m}^2$, ο φωτισμός ενισχύεται τοπικά με λαμπτήρες νατρίου υψηλής πιέσεως.

Επίσης λαμπτήρες νατρίου υψηλής πιέσεως χρησιμοποιούνται για το φωτισμό των δευτερευόντων δρόμων (απαίτηση: $1\ldots 1,5 \text{ cd/m}^2$).

Όταν για το φωτισμό των δρόμων υπάρχουν απαιτήσεις για μεγαλύτερη χρωματική απόδοση και για φως λευκού χρώματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ικανοποιητικά αποτελέσματα λαμπτήρες με ιωδίδια μετάλλων.

13) Φωτισμός δεξαμενών επισκευής πλοίων.

Οι γενικές απαιτήσεις φωτισμού συμπίπτουν με τις αναφερόμενες στο φωτισμό λιμανιών.

Η ιδιαιτερότητα στην προκειμένη περίπτωση έγκειται στο ότι ένα μέρος των εγκαταστάσεων φωτισμού, εκείνες, δηλαδή που βρίσκονται στα χαμηλότερα επίπεδα, βρίσκονται εναλλάξ μέσα και έξω από το νερό, ενώ οι χρησιμοποιούμενες στις επισκευές των πλοίων βαφές και λοιπές ουσίες έχουν ισχυρές διαβρωτικές ικανότητες.

Οι ανάγκες εργασίας σε διάφορες θέσεις επιβάλλουν συχνά την τοποθέτηση λαμπτήρων σε φορητές συσκευές ή και στο άκρο του αγωγού τροφοδοσίας.

Οι προβολείς τοποθετούνται, επίσης, είτε σε φορητές συσκευές είτε, επί μονίμου βάσεως, σε κατάλληλες κοιλότητες.

Τα χρησιμοποιούμενα υλικά πρέπει να είναι ανθεκτικά στην πίεση, στη διάθρωση και στις κρούσεις. Οι βοηθητικές συσκευές τροφοδοσίας των λαμπτήρων τοποθετούνται σε στεγανούς χώρους, ενώ οι ίδιοι οι λαμπτήρες προστατεύονται με ανοξείδωτες σχάρες.

Αν γίνει, πάντως, σύγκριση του μόνιμου με το φορητό φωτισμό, τότε ο δεύτερος προκύπτει οικονομικότερος, γιατί οι δυσκολίες και οι δαπάνες συντηρήσεως μιας μόνιμης εγκαταστάσεως είναι μεγάλες.

Πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για τον τακτικό καθαρισμό των φωτιστικών σωμάτων, ώστε να μη μειώνεται η απόδοσή τους, λόγω των διαφόρων επικαθήσεων. Ο καθαρισμός γίνεται με διάλυμα απορρυπαντικού σε νερό, υπό πίεση 4 ατμοσφαιρών.

Ο φωτισμός του επάνω μέρους του πλοίου είναι λιγότερο προβληματικός απ' ότι ο φωτισμός του κάτω μέρους γίνεται με προβολείς που βρίσκονται στις άκρες της δεξαμενής και έξω από αυτήν.

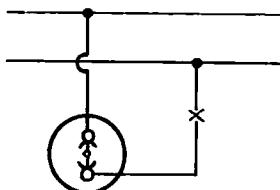
Για το φωτισμό της κυκλοφορίας και το γενικό φωτισμό του χώρου χρησιμοποιούνται προβολείς, τοποθετημένοι σε στύλους μεγάλου ύψους (30 m).

Οι σκάλες πρέπει να φωτίζονται πολύ καλά και γι' αυτό χρησιμοποιούνται προβολείς τοποθετημένοι κάθετα επάνω από αυτές.

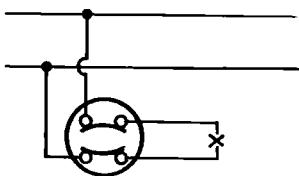
Φωτιστικά σώματα τοποθετημένα στην πρόσοψη των κτιρίων χρησιμοποιούνται τόσο για το φωτισμό των προσόψεων όσο και της κυκλοφορίας γύρω από τα κτίρια.

14) Συνδεσμολογίες ηλεκτρικών κυκλωμάτων φωτισμού.

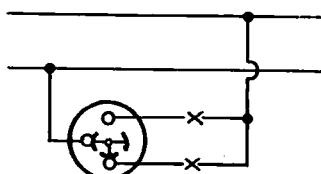
Διαγράμματα συνδεσμολογίας διακόπτών.



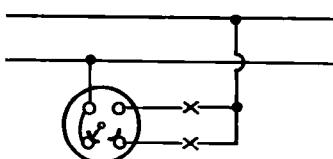
Απλός (μονοπολικός) διακόπτης.



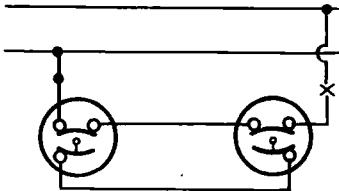
Απλός (διπολικός) διακόπτης.



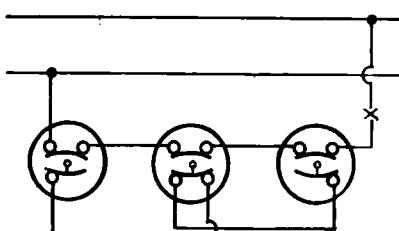
Διακόπτης διαδοχής (κομμιτατέρ).



Διακόπτης διαδοχής διπλής διακοπής.

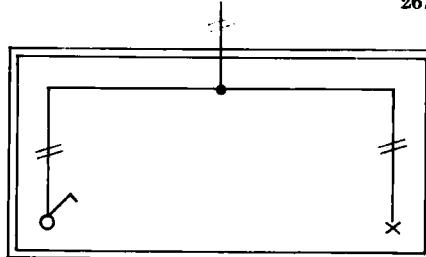
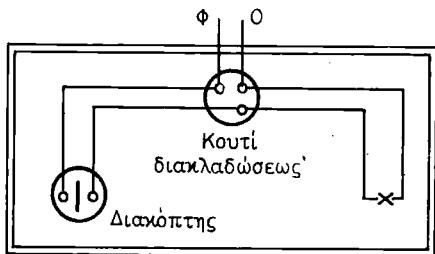


Διακόπτης εναλλαγής (αλλέ-ρετούρ).

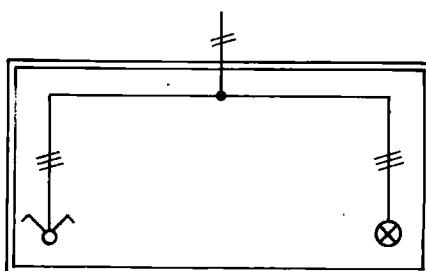
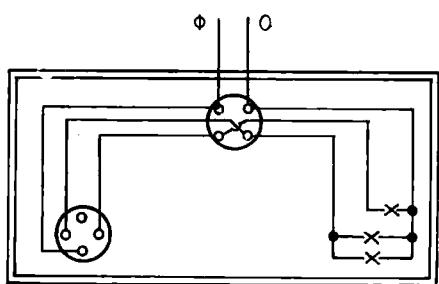


Ενδιάμεσος εναλλαγής.

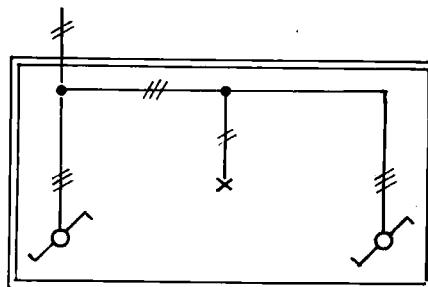
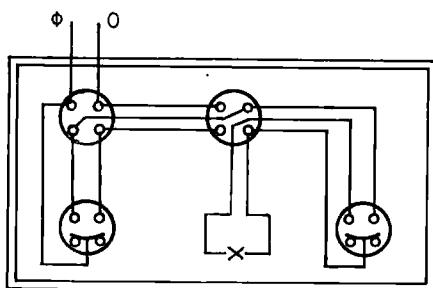
Σχ. 6.



Απλός διακόπτης



Διακόπτης διαδοχής



Διακόπτης εναλλαγής

Σχ. 7.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

1. Ηλεκτρολύτες – Ηλεκτρόλιυση – Νόμος Faraday	1
2. Ηλεκτρικά στοιχεία – Πόλωση των ηλεκτροδίων	2
3. Διάφοροι τύποι πρωτογενών ηλεκτρικών στοιχείων	4
4. Δευτερογενή στοιχεία (συσσωρευτές) – Λειτουργία συσσωρευτών μολύbdou	6
5. Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	9
6. Φόρτιση και εκφόρτιση συσσωρευτών	10
7. Ασθένειες και βλάβες συσσωρευτών μολύbdou	13
8. Συντήρηση των συσσωρευτών μολύbdou	16
9. Αλκαλικοί συσσωρευτές	17

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

Εισαγωγή

1.1 Είδη ηλεκτρικών μηχανών και κύρια χαρακτηριστικά αυτών	21
1.2 Χρήση και εφαρμογή των ηλεκτρικών μηχανών	22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

Ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος

2.1 Αρχή λειτουργίας των γεννητριών συνεχούς ρεύματος	24
2.2 Αρχή λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος.....	32
2.3 Αντιηλεκτρεργετική δύναμη	34
2.4 Δυνάμεις πεδήσεως στις γεννήτριες	35
2.5 Κατασκευή των μηχανών συνεχούς ρεύματος	36
2.6 Διέγερση των μηχανών συνεχούς ρεύματος	40
2.7 Τυλίγματα μηχανών συνεχούς ρεύματος	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος

3.1 Λειτουργία γεννήτριας χωρίς φορτίο	44
3.2 Λειτουργία γεννήτριας με φορτίο	46
3.3 Είδη γεννητριών συνεχούς ρεύματος	49
3.4 Ισχύς, απώλειες, βαθμός αποδόσεως γεννητριών	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

Κινητήρες συνεχούς ρεύματος

4.1 Εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος	59
4.2 Ροπή των κινητήρων συνεχούς ρεύματος	61
4.3 Λειτουργία κινητήρων με φορτίο	61
4.4 Ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων	64
4.5 Είδη κινητήρων συνεχούς ρεύματος	65
4.6 Μέθοδοι ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής κινητήρων συνεχούς ρεύματος	70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

Γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος

5.1 Είδη και χρήση γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος	75
5.2 Κατασκευή συγχρόνων γεννητριών ή εναλλακτήρων	76
5.3 Ψύξη των εναλλακτήρων	84
5.4 Παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος	85
5.5 Μονοφασικοί εναλλακτήρες	89
5.6 Τριφασικοί εναλλακτήρες	90
5.7 Τιμή ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως εναλλακτήρα	93
5.8 Μέθοδοι για ρύθμιση της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως εναλλακτήρα	94
5.9 Λειτουργία εναλλακτήρα χωρίς φορτίο	96
5.10 Λειτουργία εναλλακτήρα με φορτίο	97
5.11 Ισχύς, απώλειες και βαθμός αποδόσεως εναλλακτήρα	99

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

Μετασχηματιστές

6.1 Χρήση και είδη μετασχηματιστών	101
6.2 Κατασκευή μονοφασικών μετασχηματιστών	102
6.3 Κατασκευή τριφασικών μετασχηματιστών	105
6.4 Ψύξη μετασχηματιστών	106
6.5 Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστών	106
6.6 Λειτουργία των μετασχηματιστών χωρίς φορτίο – Σχέση μεταφοράς	110
6.7 Λειτουργία μετασχηματιστών με φορτίο	111
6.8 Σύνδεσμολογία των τυλίγμάτων μετασχηματιστών	117
6.9 Παράλληλη λειτουργία μετασχηματιστών	122
6.10 Αυτομετασχηματιστές	122
6.11 Ισχύς, απώλειες και βαθμός αποδόσεως μετασχηματιστών	125

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

Κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος – Σύγχρονοι κινητήρες

7.1 Είδη και τύποι κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος	127
7.2 Περιστρεφόμενα μαγνητικά πεδία. Σύγχρονη ταχύτητα	128
7.3 Τυλίγματα μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος	130
7.4 Κατασκευή των σύγχρονων κινητήρων	132
7.5 Αρχή λειτουργίας των σύγχρονων τριφασικών κινητήρων	132
7.6 Εκκίνηση των σύγχρονων κινητήρων	134
7.7 Λειτουργία των σύγχρονων κινητήρων	135
7.8 Χρήση των σύγχρονων κινητήρων	136

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟΣ

Σύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες

8.1 Είδη ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων	138
8.2 Κατασκευή των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων	138
8.3 Αρχή λειτουργίας ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων	143
8.4 Διολίσθηση (ή ολίσθηση)	144
8.5 Τάση και ένταση του δρομέα	145
8.6 Ροπή των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων	149
8.7 Ισχύς ασύγχρονων κινητήρα	152
8.8 Τάση λειτουργίας ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων	154
8.9 Εκκίνηση τριφασικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα	155
8.10 Κινητήρες διπλούν κλωδούν	160
8.11 Κινητήρες με βαθιά αυλάκια	161
8.12 Εκκίνηση κινητήρων με δακτυλίδια	162
8.13 Ρύθμιση της ταχύτητας στους ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες	164
8.14 Άλλαγή της φοράς περιστροφής	166
8.15 Απώλειες, βαθμός αποδόσεως και συντελεστής ισχύος	167
8.16 Χρήσεις των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων	169

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ

Ασύγχρονοι μονοφασικοί κινητήρες

9.1 Γενικά	171
9.2 Μονοφασικοί κινητήρες αντιστάσεως	172
9.3 Μονοφασικοί κινητήρες με πυκνωτή	173
9.4 Μονοφασικοί κινητήρες με βραχυκυκλωμένες σπείρες στο στάτη	175
9.5 Ισχύς μονοφασικού κινητήρα	176

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ

Κινητήρες εναλλασσόμενου φεύματος με συλλέκτη

10.1 Γενικά	177
10.2 Μονοφασικοί κινητήρες σειράς	177
10.3 Κινητήρες Γιουνιβέρσαλ (Universal)	178
10.4 Κινητήρες αντιδράσεως	179
10.5 Τριφασικοί κινητήρες σειράς	180
10.6 Τριφασικοί κινητήρες διακλαδώσεως, με τροφοδότηση από το στάτη	182
10.7 Τριφασικοί κινητήρες διακλαδώσεως με τροφοδότηση από το δρομέα	182

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΔΕΚΑΤΟ

Μετατροπείς – Ανορθωτές

11.1 Γενικά	184
11.2 Ζεύγος κινητήρα – γεννήτριας	184
11.3 Στρεφόμενος μετατροπέας	185
11.4 Ανορθωτικά στοιχεία – Ηλεκτρική βαλβίδα	187
11.5 Ανορθωτικές διατάξεις μονοφασικές	187
11.6 Ανορθωτικές διατάξεις τριφασικές	190
11.7 Ανορθωτές με ημιαγωγούς	192

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

Ηλεκτρική πρόωση

1.1 Γενικά	199
1.2 Πρόωση με συνεχές ρεύμα.....	201
1.3 Πρόωση με εναλλασσόμενο ρεύμα	208
1.4 Χειρισμός και λειτουργία στροβιλοήλεκτρικής προώσεως	210

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

Συστήματα ανιχνεύσεως πυρκαϊάς

2.1 Γενικά	217
2.2 Ανιχνευτές καπνού.....	218
2.3 Σύστημα ανιχνεύσεως και κατασβέσεως πυρκαϊάς με ανιχνευτή καπνού	225
2.4 Σύστημα ανιχνεύσεως πυρκαϊάς με θερμοδιαφορικούς ανιχνευτές	227

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

Ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές στα πλοία

3.1 Ηλεκτροχημική διάβρωση.....	230
3.2 Καθοδική αντιδιαβρωτική προστασία	232
3.3 Τα μικρόφωνα	235
3.4 Το ακουστικό	239
3.5 Τηλεφωνικά συστήματα πλοίων	240
3.6 Ηλεκτρικά κυκλώματα γέφυρας	244
3.7 Συστήματα σημάνσεως γενικών βλαβών.....	246

ΜΕΡΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

1. Φωτομετρικά μεγέθη και μονάδες μετρήσεως.....	249
2. Νόμος της φωτομετρίας	250
3. Νόμος του Lambert.....	251
4. Ανάλιλαστ – Απορρόφηση – Διαφάνεια	252
5. Λαμπτήρες πυρακτώσεως	253
6. Λαμπτήρες φθορισμού	255
7. Άλλοι λαμπτήρες εκκενώσεως.....	257
8. Είδη φωτισμού	257
9. Χρήσεις των διαφόρων λαμπτήρων	259
10. Φωτισμός εσωτερικών χώρων	260
11. Υπολογισμός φωτισμού εξωτερικών χώρων.....	262
12. Φωτισμός λιμανιών.....	263
13. Φωτισμός δεξαμενών επισκευής πλοίων	265
14. Συνδεσμολογίες ηλεκτρικών κυκλωμάτων φωτισμού	266

COPYRIGHT ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

