

**Σχήμα 4-36** (α) Τυπική ημιτονοειδής κυματομορφή εξόδου μίας διάταξης μονοκάναλου κωδικοποιητή. (β) Τυπικά σήματα σε ορθογωνισμό δικάναλου κωδικοποιητή.

ας την κεφαλή εκτύπωσης μιας ηλεκτρονικής γραφομηχανής ή ενός επεξεργαστή κειμένου. Η κεφαλή εκτύπωσης έχει 95 θέσεις χαρακτήρων στην περιφέρεια του, και ο κωδικοποιητής έχει 480 κύκλους. Άρα, υπάρχουν  $480 \times 4 = 1920$  διασταυρώσεις με το μηδενικό άξονα ανα περιστροφή. Για την κεφαλή εκτύπωσης 96 χαρακτήρων, αυτό αντιστοιχεί σε  $1920/96 = 20$  διασταυρώσεις με το μηδενικό άξονα ανα χαρακτήρα, δηλαδή, υπάρχουν 20 διασταυρώσεις με το μηδενικό άξονα μεταξύ δυο συνεχόμενων χαρακτήρων.

Ένας τρόπος μέτρησης της ταχύτητας της κεφαλής εκτύπωσης είναι η απαρίθμηση των παλμών που δημιουργούνται από ένα ηλεκτρονικό ρολόι οι οποίοι απαντώνται ανάμεσα σε διαδοχικές διασταυρώσεις με το μηδενικό άξονα των εξόδων του κωδικοποιητή. Ας υποθέσουμε πως χρησιμοποιείται ένα ρολόι 500-kHz, δηλαδή το ρολόι αυτό παράγει 500.000 παλμούς/δευτερόλεπτο. Αν ο μετρητής καταγράφει, ας πούμε 500 παλμούς ρολογιού καθώς ο κωδικοποιητής περιστρέφεται από μια διασταύρωση με το μηδενικό άξονα στην επόμενη, η ταχύτητα του άξονα είναι

$$\begin{aligned} \frac{500.000 \text{ παλμούς/sec}}{500 \text{ παλμούς/μηδενικό άξονα}} &= 1000 \text{ μηδενικοί άξονες/sec} \\ &= \frac{1000 \text{ μηδενικοί άξονες/sec}}{1920 \text{ μηδενικοί άξονες/στροφή}} \\ &= 0,52083 \text{ στρ./sec} = 31,25 \text{ rpm} \end{aligned} \quad (4-80)$$

Η διάταξη του κωδικοποιητή που περιγράφηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο ακριβούς θέσης της κεφαλής εκτύπωσης. Έστω η διασταύρωση με το μηδενικό άξονα Α των κυματομορφών του Σχ. 4-36 αντιστοιχεί στη θέση χαρακτήρα στην κεφαλή εκτύπωσης (η επόμενη θέση χαρακτήρα είναι 20 διασταυρώσεις με το μηδενικό άξονα μακριά) και το σημείο αντιστοιχεί σε ένα ευσταθές σημείο ισορροπίας. Ο προσεγγιστικός έλεγχος θέσης του συστήματος πρέπει πρώτα να οδηγήσει την κεφαλή εκτύπωσης σε θέση εντός 1 διασταύρωσης σε οποιαδήποτε πλευρά της θέσης Α· κατόπιν χρησιμοποιώντας την κλίση του ημιτόνου στη θέση Α, το σύστημα ελέγχου θα πρέπει γρήγορα να μηδενίσει το σφάλμα.

## ▶ 4-6 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΡ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Οι κινητήρες συνεχούς-ρεύματος (σρ) είναι από τους ευρύτερα χρησιμοποιούμενους «πρωτεργάτες» στη βιομηχανία σήμερα. Μερικά χρόνια



πριν, η πλειοψηφία των μικρών σερβοκινητήρων που χρησιμοποιούνταν για σκοπούς ελέγχου ήταν ερ. Στην πραγματικότητα, οι κινητήρες ερ είναι πιο δύσκολο να ελεγχθούν, ειδικά για έλεγχο θέσης και τα χαρακτηριστικά τους είναι αρκετά μη-γραμμικά, κάτι το οποίο κάνει την αναλυτική επεξεργασία πιο δύσκολη. Οι κινητήρες σρ, από την άλλη μεριά, είναι πιο ακριβοί, εξαιτίας των ψηκτρών τους και των μετατροπέων τους, και κινητήρες σρ μεταβλητών ροών είναι κατάλληλοι μόνο για συγκεκριμένους τύπους εφαρμογών ελέγχου. Πριν από την πλήρη ανάπτυξη της τεχνολογίας μόνιμου μαγνήτη, η ροπή ανά μονάδα όγκου ή βάρους ενός κινητήρα σρ με πεδίο μόνιμου μαγνήτη (MM) ήταν κάθε άλλο παρά η επιθυμητή. Σήμερα, με την ανάπτυξη των μαγνητικών υλικών σπάνιων γαιών, είναι δυνατόν να κατασκευάσουμε κινητήρες σρ MM πολύ υψηλής ροπής-ανά-όγκο σε λογικό κόστος. Επιπλέον, η εξέλιξη που έχει λάβει χώρα στην τεχνολογία ψηκτρών και μετατροπέων έχει κάνει περιττή τη συντήρηση αυτών των κατά τα άλλα φθαρτών στοιχείων. Οι εξελίξεις που έχουν συντελεστεί στα ηλεκτρονικά ισχύος έχουν κάνει του άψηκτους κινητήρες σρ αρκετά δημοφιλείς σε συστήματα ελέγχου υψηλής απόδοσης. Εξελιγμένες τεχνικές παραγωγής παράγουν επίσης κινητήρες σρ με στροφέα χωρίς σίδηρο που έχουν πολύ μικρή αδράνεια, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλό λόγο ροπής προς αδράνεια. Ιδιότητες μικρών χρονικών σταθερών έχουν ανοίξει το δρόμο για νέες εφαρμογές των κινητήρων σρ σε περιφερειακό εξοπλισμό υπολογιστών όπως οι οδηγοί ταινίας, οι εκτυπωτές, οι οδηγοί δίσκου και επεξεργαστές κειμένου καθώς και στις βιομηχανίες αυτοματισμού και εργαλειομηχανών.

#### 4-6-1 Βασικές Αρχές Λειτουργίας Κινητήρων ΣΡ

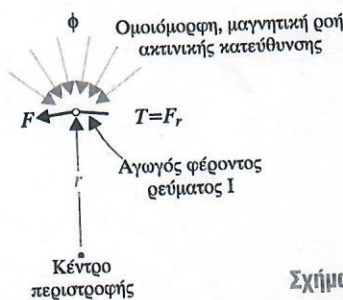
Ο κινητήρας σρ είναι βασικά ένας μετατροπέας ροπής ο οποίος μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Η ροπή που αναπτύσσεται στον άξονα του κινητήρα είναι ευθέως ανάλογη του πεδίου ροής και του ρεύματος οπλισμού. Όπως φαίνεται στο Σχ. 4-37, ένας αγωγός φέροντος ρεύματος είναι εγκατεστημένος σε ένα μαγνητικό πεδίο ροής  $\phi$  και ο αγωγός τοποθετείται σε απόσταση  $r$  από το κέντρο περιστροφής. Η σχέση που διέπει την αναπτυσσόμενη ροπή, τη ροή  $\phi$  και το ρεύμα  $i_a$  είναι

$$T_m = K_m \phi i_a \quad (4-81)$$

όπου  $T_m$  είναι η ροπή του κινητήρα (σε N-m),  $\phi$  η μαγνητική ροή (σε webers),  $i_a$  το ρεύμα οπλισμού (σε amperes) και  $K_m$  μια σταθερά αναλογίας.

Επιπρόσθετα στην αναπτυσσόμενη ροπή από τη διάταξη του Σχ. 4-37, όταν ο αγωγός κινείται μέσα στο μαγνητικό πεδίο, παράγεται μια τάση στα άκρα των ακροδεκτών του. Η τάση αυτή, η **αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη** (αηεδ), η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του





Σχήμα 4-37 Παραγωγή ροπής σε έναν κινητήρα σρ.

άξονα, αντιτίθεται της ροής του ρεύματος. Η σχέση μεταξύ της αηεδ και της ταχύτητας του κινητήρα είναι

$$e_b = K_m \phi \omega_m \quad (4-82)$$

όπου  $e_b$  υποδηλώνει την αηεδ (volts), και  $\omega_m$  η ταχύτητα του άξονα (rad/sec) του κινητήρα. Οι Εξ. (4-81) και (4-82) αποτελούν τη βάση της λειτουργίας του κινητήρα σρ.

## 6-2 Βασικές Ταξινομήσεις των Κινητήρων ΣΡ Μόνιμου Μαγνήτη

Γενικά, το μαγνητικό πεδίο ενός κινητήρα σρ μπορεί να παραχθεί είτε από περιελίξεις πεδίου είτε από μόνιμους μαγνήτες. Εξαιτίας της δημοτικότητας των κινητήρων σρ MM σε εφαρμογές συστημάτων ελέγχου, θα επικεντρωθούμε σε αυτό τον τύπο κινητήρα.

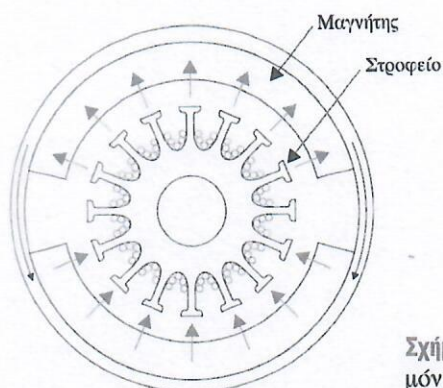
Οι κινητήρες σρ MM μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με το σχήμα μετατροπής του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές και την κατασκευή του οπλισμού. Συμβατικοί κινητήρες σρ έχουν μηχανικές ψήκτρες και μετατροπείς. Παρ' όλα αυτά, μια σημαντική κατηγορία κινητήρων σρ στους οποίους η μετατροπή γίνεται ηλεκτρονικά καλούνται **άψηκτροι σρ**.

Βάσει της κατασκευής του οπλισμού, οι κινητήρες σρ MM μπορούν να αναλυθούν σε τρεις τύπους: **κινητήρες πυρήνα σιδήρου, επιφανειακής περιέλιξης και κινητού πηνίου**.

### Κινητήρες ΣΡ MM Πυρήνα Σιδήρου

Η διάταξη στροφείου και στάτορα ενός κινητήρα σρ MM πυρήνα σιδήρου φαίνεται στο Σχ. 4-38. Το υλικό του μόνιμου μαγνήτη μπορεί να είναι φερρίτης βάρου, Alnico, ή ένα μίγμα υλικών σπάνιας γαίας. Η μαγνητική ροή που παράγεται από το μαγνήτη περνάει μέσα από μια ελασματοειδή κατασκευή στροφείου η οποία περιέχει αυλάκια. Οι αγωγοί του οπλισμού τοποθετούνται μέσα στα αυλάκια του στροφείου. Αυτός ο τύπος κινητήρα σρ χαρακτηρίζεται από σχετικά μεγάλη αδράνεια στροφείου (εφόσον το περιστρεφόμενο μέρος αποτελείται από τις περιελίξεις του οπλισμού), υψηλή αυτεπαγωγή, χαμηλό κόστος και μεγάλη αξιοπιστία.





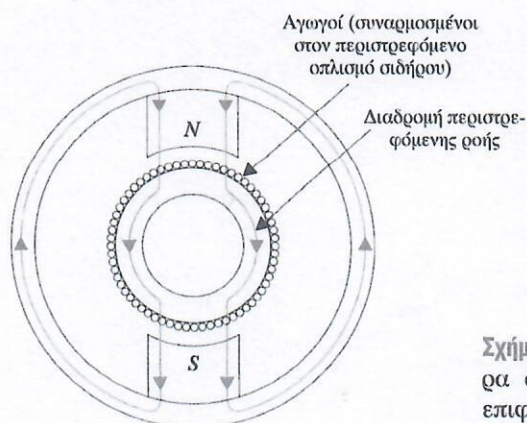
Σχήμα 4-38 Διατομή ενός κινητήρα σε μόνιμου μαγνήτη (ΜΜ) πυρήνα σιδήρου.

### Κινητήρες ΣΡ Επιφανειακής Περιέλιξης

Το Σχ. 4-39 δείχνει την κατασκευή του στροφείου ενός κινητήρα σε ΜΜ επιφανειακής περιέλιξης. Οι αγωγοί του οπλισμού είναι συναρμωσμένοι στην επιφάνεια μια κυλινδρικής κατασκευής στροφείου, η οποία είναι φτιαγμένη από δίσκους ελασμάτων συνδεδεμένους στον άξονα του κινητήρα. Εφόσον δε χρησιμοποιούνται αυλάκια στο στροφείο σε αυτή την κατασκευή, ο οπλισμός δεν παρουσιάζει φαινόμενο «οδόντωσης». Οι αγωγοί αποθέτονται στο κενό αέρος μεταξύ του στροφείου και του πεδίου (ΜΜ), έτσι ο τύπος αυτός του κινητήρα έχει μικρότερη αυτεπαγωγή απ' αυτόν της κατασκευής πυρήνα σιδήρου.

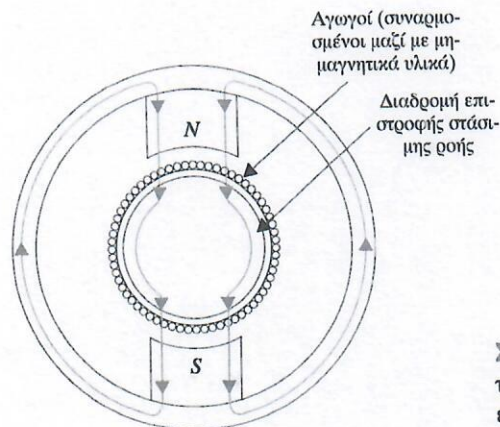
### Κινητήρες ΣΡ Κινητού Πηνίου

Οι κινητήρες κινητού πηνίου είναι σχεδιασμένοι για να έχουν πολύ μικρές ροπές αδράνειας και πολύ μικρή αυτεπαγωγή οπλισμού. Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας τους αγωγούς του οπλισμού στο κενό αέρος μεταξύ μιας διαδρομής επιστροφής στάσιμης ροής και της κατασκευής (ΜΜ), όπως φαίνεται στο Σχ. 4-40. Σε αυτή την περίπτωση, η κατασκευή του αγωγού υποστηρίζεται από μη-μαγνητικό υλικό – συνή-



Σχήμα 4-39 Διατομή ενός κινητήρα σε μόνιμου μαγνήτη (ΜΜ) επιφανειακής περιέλιξης.



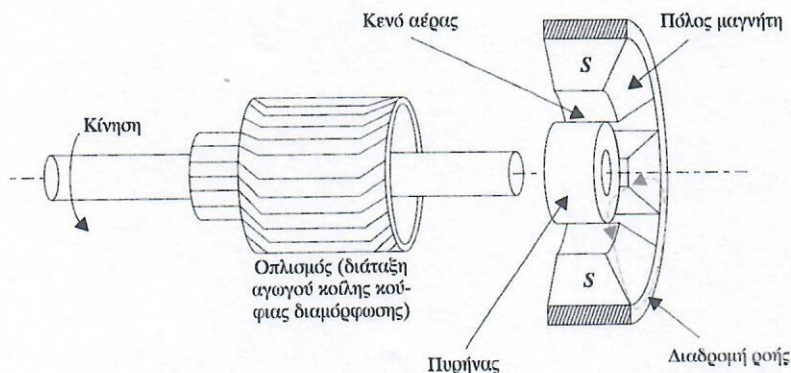


Σχήμα 4-40 Διατομή ενός κινητήρα σε μόνιμου μαγνήτη (MM) επιφανειακής περιέλιξης.

θως εποξικές ρητίνες ή φαϊμπεργκλάς – διαμορφώνοντας έναν κούφιο κύλινδρο. Το ένα άκρο του κυλίνδρου διαμορφώνει μία πλήμνη, η οποία προσδένεται στον άξονα του κινητήρα. Η διατομή ενός τέτοιου κινητήρα φαίνεται στο Σχ.4-41. Εφόσον όλα τα περιττά στοιχεία έχουν αφαιρεθεί από τον οπλισμό του κινητήρα κινητού πηνίου, η ροπή αδράνειας του είναι πολύ μικρή. Εφόσον οι αγωγοί στον οπλισμό του κινητού πηνίου δεν είναι σε άμεση επαφή με σίδηρο, η αυτεπαγωγή του κινητήρα είναι πολύ χαμηλή, και τιμές μικρότερες των  $100 \mu\text{H}$  είναι συνηθισμένες για κινητήρα τέτοιου τύπου. Είναι οι ιδιότητες της χαμηλής αδράνειας και της χαμηλής αυτεπαγωγής που κάνουν τον κινητήρα κινητού πηνίου μια από τις καλύτερες επιλογές ενεργοποιητή για συστήματα ελέγχου υψηλής απόδοσης.

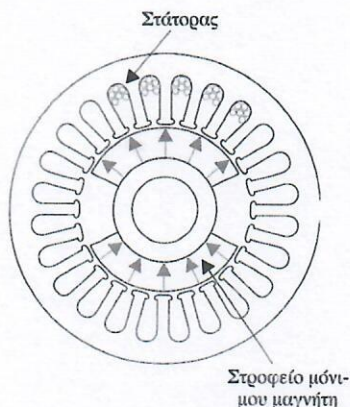
#### Άψηκτροι Κινητήρες ΣΡ

Οι άψηκτροι κινητήρες σε διαφέρουν από τους προαναφερθέντες κινητήρες σε ότι χρησιμοποιούν ηλεκτρική (παρά μηχανική) μετατροπή του ρεύματος οπλισμού. Η πιο κοινή διάταξη άψηκτρων κινητήρων σε – ειδικά για εφαρμογές αυξητικής κίνησης – είναι αυτή



Σχήμα 4-41 Διατομή πλάγιας όψης ενός κινητήρα σε κινητού πηνίου.





Σχήμα 4-42· Διατομή ενός άψηκτροι κινητήρα σε μόνιμου μαγνήτη (MM) πυρήνα σιδήρου.

κατά την οποία το στροφέιο αποτελείται από μαγνήτες και ενίσχυση «αντι-σιδήρου», και του οποίου οι περιελίξεις μετατροπής είναι τοποθετημένες εξωτερικά των περιστρεφόμενων μερών, όπως φαίνεται στο Σχ. 4-42. Συγκρινόμενη με τους συμβατικούς κινητήρες σε, όπως αυτόν που φαίνεται στο Σχ. 4-38, είναι μια αντίστροφη διάταξη. Ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή, άψηκτροι κινητήρες σε μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν χρειάζεται μικρή ροπή αδράνειας, όπως ο οδηγός της ακίδας σε οδηγούς δίσκων υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιούνται στους υπολογιστές.

#### 4-6-3 Μαθηματική Μοντελοποίηση Κινητήρων ΣΡ ΜΜ

Εφόσον οι κινητήρες σε χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα συστήματα ελέγχου, είναι αναγκαία η δημιουργία μαθηματικών μοντέλων κινητήρων σε εφαρμογών ελέγχου για αναλυτικούς σκοπούς. Χρησιμοποιούμε το ισοδύναμο κυκλωματικό διάγραμμα του Σχ. 4-43 για να αναπαραστήσουμε έναν κινητήρα σε ΜΜ. Ο οπλισμός μοντελοποιείται σαν ένα κύκλωμα αντίστασης  $R_a$  συνδεδεμένης σε σειρά με μια αυτεπαγωγή  $L_a$  και μια πηγή τάσης  $e_b$  που αντιπροσωπεύει την αηεδ (αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη) στον οπλισμό όταν το στροφέιο περιστρέφεται. Οι μεταβλητές και οι παράμετροι του κινητήρα ορίζονται ως ακολούθως:

$i_a(t)$ = ρεύμα οπλισμού	$L_a$ = αυτεπαγωγή οπλισμού
$R_a$ = αντίσταση οπλισμού	$e_a(t)$ = εφαρμοζόμενη τάση
$e_b(t)$ = αηεδ	$K_b$ = σταθερά αηεδ
$T_L(t)$ = ροπή φορτίου	$\phi$ = μαγνητική ροή στο κενό αέρος
$T_m(t)$ = ροπή κινητήρα	$\omega_m(t)$ = γωνιακή ταχύτητα στροφείου
$\theta_m(t)$ = μετατόπιση στροφείου	$J_m$ = αδράνεια στροφείου
$K_i$ = σταθερά ροπής	$B_m$ = σταθερά ιξώδους τριβής