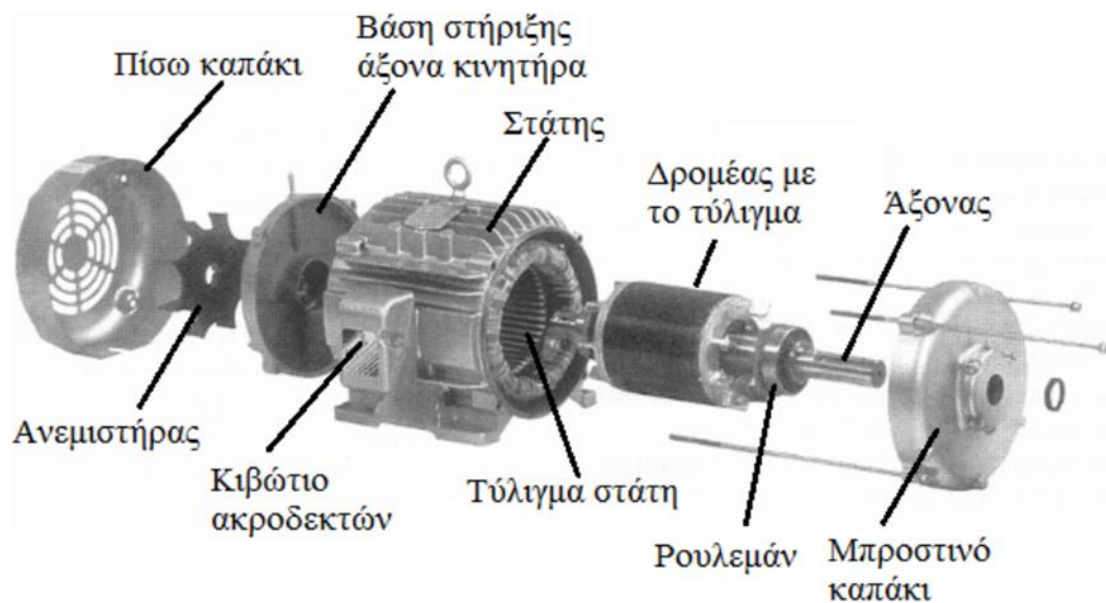


Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ
Σ.Τ.Ε.Φ.
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ **ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**



ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΡΑΪΣΑΣ ΠΕΤΡΟΣ
ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΚΩΤΣΙΝΗΣ ΑΛΚΗΣ , ΜΠΑΜΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην πτυχιακή εργασία που ακολουθεί γίνεται αναφορά στις επαγωγικές μηχανές που αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της τεχνολογίας και βρίσκουν εφαρμογές στο σύγχρονο τρόπο ζωής. Δίνεται βαρύτητα στον μονοφασικό κινητήρα με τελικό αποτέλεσμα την μελέτη ενός ασύγχρονου μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (απλού κλωβού).

Πειραιάς 2016

A. Κωτσίνης

Στ. Μπάμης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	7
1.1 Δημιουργία Στρεφόμενου Πεδίου	8
1.2 Στρεφόμενο Πεδίο από Διφασικό Ρεύμα	9
1.3 Ισχύς και Ροπή Στρέψης	12
2 ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	13
2.1 Η δομή των Επαγωγικών Κινητήρων	13
2.2 Βασικές Έννοιες στους Επαγωγικούς Κινητήρες	16
2.2.1 Η ανάπτυξη της Επαγόμενης Ροπής στους Επαγωγικούς Κινητήρες	16
2.2.2 Η έννοια της Ολίσθησης του Δρομέα	17
2.2.3 Η Ηλεκτρική Συχνότητα στο Δρομέα	18
2.2.4 Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα	18
2.3 Ισχύς και Ροπή στους Επαγωγικούς Κινητήρες	20
2.3.1 Απώλειες και Διάγραμμα Ροής Ισχύος	20
2.3.2 Χαρακτηριστική Ροπής Ταχύτητας των Επαγωγικών Κινητήρων	21
2.3.3 Μεταβολές της Χαρακτηριστικής Ροπής - Ταχύτητας στους Επαγωγικούς Κινητήρες.....	23
2.3.4 Ρύθμιση της Χαρακτηριστικής ενός Κινητήρα Βραχυκυκλωμένου Κλωβού	24
2.3.5 Κινητήρες με Βαθιές Εγκοπές και με Διπλό Δρομέα	26
2.3.6 Έλεγχος Ταχύτητας στους Επαγωγικούς Κινητήρες	27
2.3.7 Έλεγχος της Ταχύτητας Επαγωγικών Κινητήρων με Μεταβολή του Αριθμού των Πόλων.....	28
2.3.8 Έλεγχος της Ταχύτητας με Μεταβολή της Συχνότητας του Δικτύου	31
2.3.9 Έλεγχος της Ταχύτητας με Μεταβολή της Τάσης Τροφοδοσίας	31
2.3.10 Έλεγχος της Ταχύτητας με Μεταβολή της Αντίστασης Δρομέα	32
2.4 Προστασία του Κινητήρα	32
3 ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΙ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	33
3.1 Πως Λειτουργούν οι Μονοφασικοί Επαγωγικοί Κινητήρες	33
3.2 Μονοφασικοί Επαγωγικοί Κινητήρες	37
3.2.1 Μονοφασικός Κινητήρας με Βοηθητικό Τυλίγμα Αντίστασης	38
3.2.2 Κινητήρες με Πυκνωτές	39
3.2.3 Κινητήρας με Διαχωρισμένους Πόλους Υψηλής Ταχύτητας	41
3.2.4 Κινητήρας με Διαχωρισμένους Πόλους Χαμηλής Ταχύτητας	41
3.2.5 Βηματικοί Κινητήρες	43
3.2.6 Βηματικοί Κινητήρες για Μικρές Γωνίες Βήματος	45
3.2.7 Ηλεκτρονικός Κινητήρας	47
3.3 Εκκίνηση Επαγωγικών Μονοφασικών Κινητήρων	48
3.3.1 Διαχωρισμένα Τυλίγματα	48
3.3.2 Κινητήρες με Πυκνωτή Εκκίνησης	50
3.3.3 Κινητήρες Μόνιμου Πυκνωτή με Διαχωρισμένα Τυλίγματα και Κινητήρες με Πυκνωτή Εκκίνησης και Πυκνωτή Λειτουργίας	52
3.3.4 Κινητήρες με Βοηθητικούς Πόλους	54

3.4	Έλεγχος της Ταχύτητας των Μονοφασικών Επαγωγικών Κινητήρων	56
3.5	Ισοδύναμο Κύκλωμα ενός Μονοφασικού Επαγωγικού Κινητήρα	57
4	ΔΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ	58
4.1	Κατασκευαστικά Στοιχεία	58
4.2	Τυλίγματα Δρομέα	60
4.2.1	Δρομέας Χωρίς Αυλάκια	60
4.2.2	Δρομέας με Αυλάκια	61
4.2.3	Δρομέας Απλού Κλωβού	62
4.2.4	Δρομέας Διπλού Κλωβού	63
5	ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	65
5.1	Τρόποι Κατασκευής Ηλεκτρικών Μηχανών	65
5.2	Κατηγορίες Μονωτικών Υλικών	66
5.3	Συντήρηση και Έλεγχος των Ηλεκτρικών Μηχανών	67
5.4	Πινακίδα	68
6	ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	69
6.1	Τριφασικά Τυλίγματα	69
6.1.1	Τυλίγματα ενός Στρώματος	70
6.1.2	Τυλίγματα με δύο Στρώματα	71
6.1.3	Επιβραχυνόμενα Τυλίγματα με δύο Στρώματα	72
6.1.4	Τυλίγματα με Αλλαγή των Πόλων	73
6.2	Μονοφασικά τυλίγματα	74
7	ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑΤΗ Ε.Ρ	75
7.1	Συγκρότηση των Τυλιγμάτων του Στάτη	75
7.2	Χρησιμοποίηση των Τυλιγμάτων με Μάτσα και Μπάρες	75
7.3	Τιμή της Η.Ε.Δ	75
7.4	Είδη Τυλιγμάτων	76
7.5	Γεωμετρικές Ηλεκτρικές Μοίρες	76
7.6	Τύποι των Τυλιγμάτων του Στάτη	76
7.6.1	Τυλίγματα με Βήμα Ακέραιο και με Βήμα Σμικρμένο	77
7.6.2	Πλεονεκτήματα των Τυλιγμάτων με 2 Στρώσεις και με Βήμα Σμικρμένο	78
7.7	Συντελεστής Τυλιγματος , Συντελεστής Βήματος	78
7.7.1	Συντελεστής Κατανομής	80
7.7.2	Συντελεστής του Σμικρμένου Βήματος	80
8	ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΑ ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ	81
8.1	Τύποι Μονοφασικών Τυλιγμάτων	81
8.2	Συστήματα Συνδέσεων	84
8.2.1	Σύνδεση σε Σειρά	84
8.2.2	Σύνδεση Παράλληλη	84
8.2.3	Σύνδεση Μεικτή (Σειράς- Παράλληλη)	85
8.3	Μονοφασικοί Κινητήρες	86
8.4	Συντελεστής Κατανομής Kk	88
8.5	Χωρητικότητα Πυκνωτών Μονοφασικών Ασύγχρονων Κινητήρων	88
9	ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ	91
10	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΙΔΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ	92
10.1	Αντίσταση Μαγνητίσεως Ανά Φάση	92

10.2	Ισχύς και Διαστάσεις μιας Ηλεκτρικής Μηχανής	93
10.3	Οι Επαγωγικές Τάσεις (ΗΕΔ) στους Σύγχρονους Κινητήρες	94
10.4	Ειδική Μαγνητική Φόρτιση (Μέση Μαγνητική Επαγωγή)	94
10.5	Ειδική Ηλεκτρική Φόρτιση	95
11	ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΕΑ (ΑΠΛΟΥ ΚΛΩΒΟΥ) ΜΕ ΠΥΚΝΩΤΗ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟ ΔΙΑΚΟΠΤΗ	96
11.1	Σχεδιασμός μονοφασικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα κλασματικής ισχύος	96
11.2	Μελέτη Ασύγχρονου Μονοφασικού Επαγωγικού Κινητήρα	97
11.3	Κύριο Τύλιγμα	99
11.4	Τύλιγμα Εκκίνησης (Βοηθητικό Τύλιγμα)	100
11.5	Δρομέας	100
11.6	Υπολογισμός Πυκνωτή	101
11.7	Υπολογισμός Ολίσθησης S	101
11.8	Κύκλωμα του Κινητήρα	102
11.9	Τυλίγματα Στάτη σε Κυκλική Μορφή	103
11.10	Μονοφασικός Κινητήρα εν ώρα συναρμολόγησης	104
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ηλεκτρικές Μηχανές και Εφαρμογές τους.

Γενικά.

Ο άνθρωπος, για την ικανοποίηση των αναγκών του, χρησιμοποιεί ενέργεια σε διάφορες μορφές. Η πιο σημαντική απ'αυτές είναι η **ηλεκτρική ενέργεια**, που σήμερα χρησιμοποιείται παντού, στα σπίτια στα μαγαζιά, στα εργοστάσια, στα αγροκτήματα για φωτισμό, μαγείρεμα, για διασκέδαση, για κίνηση, για θέρμανση και για πολλές άλλες χρήσει. Η ηλεκτρική ενέργεια (Η.Ε) παράγεται βασικά σε μεγάλα εργοστάσια, που λέγονται **σταθμοί παραγωγής Η.Ε**, με ειδικές μηχανές που λέγονται **ηλεκτρικές γεννήτριες** ή απλά **γεννήτριες**. Για να δώσουν Η.Ε, οι γεννήτριες παίρνουν μηχανική ενέργεια (περιστροφική κίνηση) από άλλες **κινητήριες μηχανές**, όπως π.χ. οι **ατμοστρόβιλοι**, οι **υδροστρόβιλοι**, οι **αεριοστρόβιλοι** και οι **πετρελαιομηχανές** (Μ.Ε.Κ).

Για την κίνηση των διαφόρων συσκευών και μηχανημάτων χρησιμοποιούμε τους **ηλεκτρικούς κινητήρες** ή απλά **κινητήρες**. Οι κινητήρες παίρνουν ηλεκτρική ενέργεια και δίνουν μηχανική ενέργεια. Επίσης για την εύκολη και οικονομική χρήση της Η.Ε. χρησιμοποιούμε τους **στατούς μετασχηματιστές** ή απλά **μετασχηματιστές**, που μετασχηματίζουν τα βασικά ηλεκτρικά μεγέθη (τάση- ένταση), ενώ για τη μετατροπή εναλλασσομένου ρεύματος (που παράγεται στην πράξη) σε συνεχές ρεύμα χρησιμοποιούμε τους **ανορθωτές**. Κατασκευάζονται αλλά χρησιμοποιούνται σπάνια και ηλεκτρικές μηχανές που μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα (Ε.Ρ) σε συνεχές ρεύμα (Σ.Ρ) και αντίστροφα το Σ.Ρ. σε Ε.Ρ. όπως οι **στρεφόμενοι μετατροπείς** και τα **ζεύγη κινητήρα – γεννήτριας**.

Οι ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν τις κυριότερες διατάξεις, για την παραγωγή, τη μεταφορά και την αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γεννήτριες, οι κινητήρες και οι μετασχηματιστές είναι "πανταχού παρόντες" στη σύγχρονη ζωή. Στο **σύγχρονο σπίτι** οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι το βασικό εξάρτημα των περισσότερων οικιακών συσκευών. Βρίσκονται στα ψυγεία, στους καταψύκτες, στα πλυντήρια, στα μίξερ, στα συστήματα κλιματισμού, στους ανεμιστήρες κ.λπ. Στους **χώρους εργασίας** κινούν όλα σχεδόν τα εργαλεία. Το ίδιο ισχύει και για τους μετασχηματιστές, αλλά και για τις γεννήτριες, που σιγά- σιγά, εκτός απ'την παραγωγή Ηλ.Ενέργειας, μπαίνουν και στην καθημερινή μας ζωή (**τροφοδοτικά, ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη – φορητές ηλεκτρογεννήτριες**).

Γιατί όμως οι ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιούνται τόσο πολύ; **Η απάντηση είναι απλή:** Η ηλεκτρική ενέργεια είναι η πιο καθαρή και η πιο αποτελεσματική μορφή ενέργειας. Ένας ηλεκτροκινητήρας δεν αποβάλλει καυσαέρια ούτε χρειάζεται συνεχή τροφοδότηση με καύσιμο, όπως μια μηχανή εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ). Ακόμη η θερμότητα και η μηχανική ενέργεια μετατρέπονται σε ηλεκτρική μακριά απ'τον τόπο χρήσης τους, χωρίς προβλήματα ρύπανσης. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με αγωγούς κι έτσι μπορεί εύκολα και καθαρά να χρησιμοποιηθεί σ'όποιο χώρο θέλουμε. Στη διαδικασία μεταφοράς βοηθούν οι μετασχηματιστές, μειώνοντας τις απώλειες ενέργειας.

Σήμερα κατασκευάζονται ηλεκτρικές μηχανές με ονομαστική ισχύ, από μερικά χιλιοστά του βατ (mW) μέχρι και δύο χιλιάδες μεγαβάτ (2000 MW). Οι μικρότερες ηλεκτρικές μηχανές είναι κινητήρες λίγων χιλιοστών (π.χ. για κίνηση ηλεκτρικών ρολογιών και μικρών μηχανών γραφείου) και οι μεγαλύτερες είναι οι γεννήτριες των σταθμών παραγωγής Η.Ε. βάρους εκατοντάδων τόνων.

Είδη ηλεκτρικών μηχανών

Οι ηλεκτρικές μηχανές ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

α) στις ηλεκτρικές γεννήτριες ή απλά γεννήτριες.

β) στους ηλεκτρικούς κινητήρες ή απλά κινητήρες.

Οι ηλεκτρικές γεννήτριες είναι μηχανές οι οποίες παραλαμβάνουν μηχανική ενέργεια και αποδίδουν ηλεκτρική ενέργεια.

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι μηχανές οι οποίες παραλαμβάνουν ηλεκτρική ενέργεια και αποδίδουν μηχανική ενέργεια.

Ανάλογα με το είδος του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγουν οι γεννήτριες διακρίνονται σε γεννήτριες συνεχούς ρεύματος και σε γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος. Το ίδιο και οι κινητήρες, διακρίνονται σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος, όταν τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα, και κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όταν τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Μια ηλεκτρική γεννήτρια είναι δυνατόν να λειτουργήσει και ως κινητήρας, και αντίστροφα, ένας ηλεκτρικός κινητήρας είναι δυνατόν να λειτουργήσει και ως γεννήτρια. Για να δώσουν οι γεννήτριες ηλεκτρική ενέργεια, πρέπει, όπως αναφέραμε, να πάρουν περιστροφική κίνηση (μηχανική ενέργεια) από άλλες μηχανές, οι οποίες ονομάζονται κινητήριες μηχανές.

Τα είδη αυτών των μηχανών ανάλογα με την ενέργεια που χρησιμοποιούν ονομάζονται: ατμοστρόβιλοι ή υδροστρόβιλοι (θερμική ενέργεια καυσίμων ή υδραυλική ενέργεια του νερού - υδατόπτωση).

Άλλες κινητήριες μηχανές, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε μικρούς σχετικά σταθμούς παραγωγής, είναι οι αεριοστρόβιλοι και οι πετρελαιομηχανές ή μηχανές εσωτερικής καύσης.

Εκτός από τις γεννήτριες και τους κινητήρες υπάρχουν και άλλες ηλεκτρικές μηχανές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να μετατρέπουν το είδος ή τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού ρεύματος.

Οι μηχανές αυτές είναι:

α) οι μετασχηματιστές: παραλαμβάνουν ηλεκτρική ενέργεια από μια πηγή και την αποδίδουν σε μία ή περισσότερες καταναλώσεις. Δηλαδή, μετασχηματίζουν τους παράγοντες της ηλεκτρικής ισχύος, την τάση και την ένταση ($P = V \cdot I$).

β) οι στρεφόμενοι μετατροπείς και τα ζεύγη κινητήρα - γεννήτριας: χρησιμοποιούνται στην μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές και αντίστροφα.

γ) οι ανορθωτές: χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές.

1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Η ηλεκτρική μηχανή της μελέτης μας είναι ένας ασύγχρονος (ή επαγωγικός) κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού (ή δρομέα). Μια τέτοια μηχανή εντάσσεται αρχικά στη γενική κατηγορία των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι γεννήτριες που μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική, και κινητήρες που μετατρέπουν εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Τα ρεύματα και οι τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό των μηχανών αυτών είναι εναλλασσόμενα.

ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Σε μία ασύγχρονη (επαγωγική) ηλεκτρική μηχανή η τάση του δρομέα, η οποία με τη σειρά της παράγει το ρεύμα διέγερσης και το πεδίο του δρομέα, αναπτύσσεται εξ επαγωγής στο κύκλωμα διέγερσης, αντί να προσφέρεται σε αυτό με κάποια ηλεκτρική σύνδεση. Το ακίνητο μέρος της επαγωγικής μηχανής είναι ο στάτης και το περιστρεφόμενο ο δρομέας. Μεταξύ των δύο αυτών τμημάτων της μηχανής υπάρχει διάκενο μεγέθους της τάξεως κλασμάτων του χιλιοστού. Μόνο σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων κινητήρων μπορεί το μέγεθος του διακένου να φτάσει στη τάξη μερικών χιλιοστών.

ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ

Ο ασύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας είναι ο πιο κοινός τύπος κινητήρα λόγω της απλής κατασκευής του και της ευκολίας που παρουσιάζει στη λειτουργία του, καθώς δεν έχει ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης αλλά οι τάσεις και τα ρεύματα επάγονται στη διέγερσή του σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή. Καθώς τροφοδοτείται με ισχύ μόνο το κύκλωμα του στάτη του, ο επαγωγικός κινητήρας ονομάζεται και μηχανή απλής διέγερσης (singly excited), σε αντιδιαστολή με τις σύγχρονες μηχανές που ονομάζονται μηχανές διπλής διέγερσης (doubly excited). Στην πραγματικότητα ο επαγωγικός κινητήρας είναι ένας στρεφόμενος μετασχηματιστής. Όπως και σε έναν μετασχηματιστή, έτσι και στον επαγωγικό κινητήρα το πρωτεύον τύλιγμα (του στάτη) επάγει κάποια τάση στο δευτερεύον τύλιγμα (του δρομέα). Αντίθετα όμως απ' ό τι συμβαίνει σ' ένα μετασχηματιστή, η συχνότητα του δευτερεύοντος δεν είναι απαραίτητα ίση μ' αυτή του πρωτεύοντος. Ο επαγωγικός κινητήρας, στην κανονική λειτουργία, περιστρέφεται με ταχύτητα που πλησιάζει την σύγχρονη, χωρίς όμως ποτέ να την αποκτά. Θα πρέπει πάντα να υφίσταται κάποια σχετική κίνηση που να εξασφαλίζει την επαγωγή τάσης στο κύκλωμα διέγερσης. Συγκεκριμένα η σχετική κίνηση των 18 μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα ευθύνεται για την ανάπτυξη της επαγόμενης τάσης στο δρομέα. Αυτή η τάση με τη σειρά της παράγει κάποιο ρεύμα στο δρομέα του κινητήρα, το οποίο αλληλεπιδρώντας με το πεδίο του στάτη παράγει την επαγόμενη ροπή του κινητήρα

1.1 Δημιουργία Στρεφόμενου Πεδίου

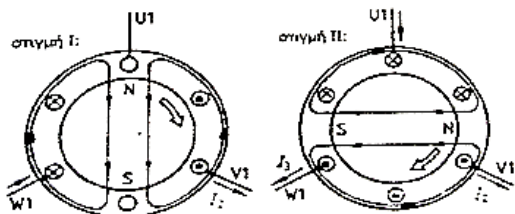
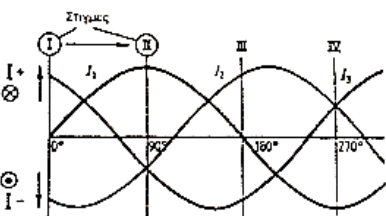
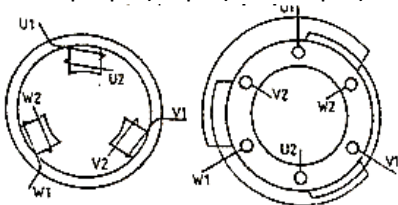
Όταν οι ραβδοφόροι μόνιμοι μαγνήτες ή οι ηλεκτρομαγνήτες περιστρέφονται γύρω από το σημείο του κέντρου βάρους τους, τότε δημιουργείται ένα στρεφόμενο πεδίο. Στις γεννήτριες το στρεφόμενο πεδίο του είδους αυτού δημιουργείται από τους μαγνητικούς δρομείς. Επίσης τρία πηνία μετατοπισμένα κατά 120° μεταξύ τους που διαρρέονται από τριφασικό ρεύμα δημιουργούν ένα στρεφόμενο πεδίο. Το τριφασικό ρεύμα παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής στρεφόμενων πεδίων και χωρίς μηχανική κίνηση.

Στην τεχνική εκτέλεση τα πηνία αυτά είναι κατανομημένα στην περιφέρεια του πακέτου ελασμάτων του στάτη (σχήμα 1). Οι πόλοι σχηματίζονται, όταν τα τυλίγματα διαρρέονται από ρεύμα. Επειδή τα ρεύματα στα τριφασικά τυλίγματα είναι μετατοπισμένα ως προς τη φάση κατά 120° , δημιουργείται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο (σχήμα 2). Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργείται, όταν στρέφεται ένας μαγνήτης ή όταν από ένα κυκλικά διατεταγμένου τριφασικού τυλίγματος διέρχεται τριφασικό ρεύμα.

Οι μηχανές, στις οποίες το μαγνητικό τριφασικό πεδίο έχει αποτελεσματική σημασία ότι λειτουργία τους, ονομάζονται μηχανές με στρεφόμενο πεδίο. Στους τριφασικούς κινητήρες γίνεται εκμετάλλευση του στρεφόμενου πεδίου του στάτη. Όταν ο δρομέας αναπτύσσει τον ίδιο αριθμό στροφών με το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, τότε η μηχανή ονομάζεται σύγχρονη μηχανή. Όταν το στρεφόμενο πεδίο του στάτη παράγεται από τρία τυλίγματα ή πηνία, τα οποία είναι κατά 120° μετατοπισμένα μεταξύ τους, τότε ο αριθμός στροφών του στρεφόμενου πεδίου εξαρτάται από την συχνότητα δικτύου και πιο συγκεκριμένα είναι ίσος με αυτή. Το στρεφόμενο πεδίο έχει έναν βόρειο και έναν νότιο πόλο, δηλαδή ένα ζεύγος πόλων. Όταν στον στάτη τοποθετηθούν έξι τυλίγματα μετατοπισμένα κατά 60° , τότε ο αριθμός των πόλων του στρεφόμενου πεδίου διπλασιάζεται, ο δε αριθμός στροφών του στρεφόμενου πεδίου υποδιπλασιάζεται, επειδή ο δρόμος από το ένα τύλιγμα μέχρι το άλλο γίνεται μισός. Ο αριθμός στροφών του στρεφόμενου πεδίου καθορίζεται από την συχνότητα του δικτύου και από τον αριθμό των πόλων του στρεφόμενου τυλίγματος.

Οι μαγνητικοί πόλοι εμφανίζονται πάντοτε ως ζεύγη και με αφορμή αυτό η ταχύτητα περιστροφής του στρεφόμενου πεδίου υπολογίζεται από τον αριθμό ζευγών πόλων.

Ο αριθμός στροφών ονομάζεται και συχνότητα περιστροφής.



Σχ.1 Δομή του στάτη για ένα διπολικό στρεφόμενο πεδίο α) με τρία κατά 120° μετατοπισμένα πηνία β) με τριφασικό τύλιγμα που είναι τοποθετημένο στο δέμα ελαστικών του στάτη .

I+ Ροή ρεύματος προς το τύλιγμα I- Ροή ρεύματος από το τύλιγμα

Σχ.2 Δημιουργία ενός διπολικού στρεφόμενου πεδίου στις στιγμές I και II.

$$[ns] = 1/s \quad ns = f/s$$

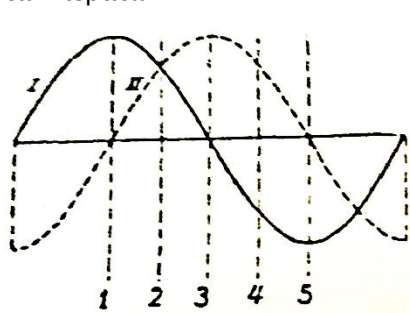
Ns αριθμός στροφών του στρεφόμενου πεδίου

f συχνότητα

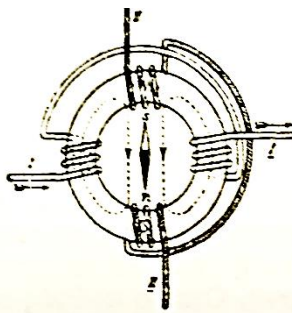
p αριθμός ζευγών πόλων

1.2 Στρεφόμενο Πεδίο από Διφασικό Ρεύμα

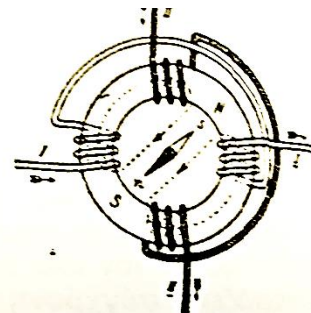
Μολονότι οι περισσότεροι κινητήρες στρεφόμενου πεδίου λειτουργούν με τριφασικό ρεύμα για να καταλάβουμε πιο εύκολα πως δημιουργείται το στρεφόμενο πεδίο, θα εξετάσουμε πρώτα πως μπορούμε να γεννήσουμε τέτοιο πεδίο με διφασικό ρεύμα. Το διφασικό ρεύμα δεν είναι τίποτα άλλο παρά δυο μονοφασικά ρεύματα μεταχρονισμένα μεταξύ τους κατά 90° (Σχ.3). Ας υποθέσουμε τώρα ότι στέλνουμε τα δύο εναλλασσόμενα ρεύματα I και II στο σταθερό επαγωγικό του Σχ.4, που έχει επάνω τα δύο λευκά διαρρέοντα από το ρεύμα I και τα γκριζα, από το ρεύμα II. Για να διακρίνουμε τις αρχές και τα πέρατα των δύο φάσεων, υπογραμμίσαμε τα διακριτικά I και II των περάτων.



Σχ.3



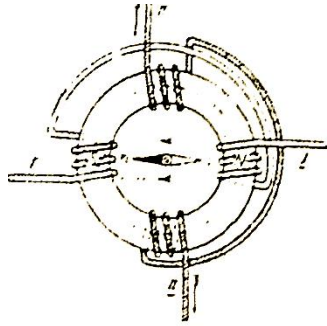
Σχ.4



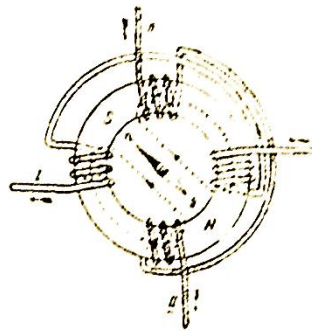
Σχ.5

Σε μία ορισμένη στιγμή, που καθορίζεται στο Σχ.3 με τη γραμμή 1, το ρεύμα I έχει τη μέγιστη τιμή του, ενώ το ρεύμα II τη μηδενική. Αυτήν ακριβώς τη στιγμή ο πυρήνας του στάτη θα μαγνητιστεί μόνο από τα δύο πηνία της φάσης I (Σχ.4). Τα δυο πηνία της φάσης II είναι τώρα νεκρά γιατί δεν διαρρέονται από ρεύμα. Τη φορά του ρεύματος στα πηνία της φάσης I τη δείχνουμε με βέλη, που το μήκος τους αντιπροσωπεύει περίπου και την τιμή του ρεύματος φορά των δυναμικών γραμμών του πεδίου, που δημιουργείται από τα πηνία της φάσης I βρίσκεται με τους γνωστούς κανόνες. Βλέπουμε λοιπόν πως τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται έτσι από τα δύο πηνία είναι αντίθετα μεταξύ τους. Και τα δύο έχουν προς τα επάνω τους βόρειους πόλους τους. Οι δυναμικές λοιπόν γραμμές αναγκάζονται να κλείσουν το κύκλωμα τους από τον αέρα και ακολουθούν τροχιές σαν αυτές που σχεδιάσαμε στο σχ.4 με στιγμινή γραμμή. Στο σημείο επομένως από όπου βγαίνουν από τον πυρήνα για να μπουν στον αέρα οι δυναμικές γραμμές, σχηματίζεται βόρειος πόλος (N), ενώ στο αντίθετο σημείο, εκεί όπου ξαναμπάνουν στον πυρήνα, νότιος πόλος (S). Ύστερα από τη χρονική στιγμή 1, το ρεύμα I αρχίζει να μικραίνει, ενώ το ρεύμα II αρχίζει να μεγαλώνει και μετά ένα όγδοο της περιόδου (όπως στο 2 του Σχ.3) και τα δύο ρεύματα είναι ίσα. Το Σχ.5 ανταποκρίνεται ακριβώς σ' αυτήν τη νέα χρονική στιγμή 2. Όπως βλέπουμε και τα βέλη που δείχνουν τα ρεύματα I και II σ' αυτό το σχήμα είναι ίσα. Παραδεχόμενοι τη φορά του ρεύματος στα πηνία της φάσης II όπως είναι αυτή που δείχνεται με τα βέλη στο σχήμα, διαπιστώνουμε ότι οι δυναμικές γραμμές των πεδίων που γεννιούνται από το αριστερό πηνίο της φάσης I κι από το επάνω πηνίο της φάσης II έχουν ίδια φορά, είναι όμως αντίθετες προς τις δυναμικές γραμμές που παράγονται από το δεξί πηνίο της φάσης I και το κάτω πηνίο της φάσης II. Οι πόλοι λοιπόν όπως άλλωστε δείχνει και το Σχ.5, μετατοπίστηκαν επάνω στον κυλινδρικό πυρήνα κατά ένα όγδοο της περιόδου και με κατεύθυνση ίδια με τη φορά περιστροφής των δεικτών του ρολογιού.

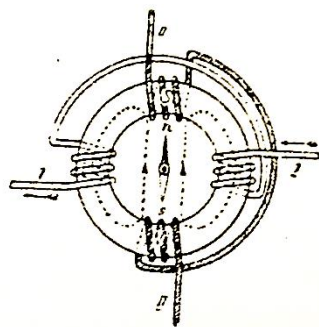
Έπειτα από ένα ακόμη όγδοο της περιόδου (γραμμή 3 Σχ.3) το ρεύμα I μηδενίζεται, ενώ το ρεύμα II παίρνει τη μέγιστη τιμή του. Απ' αυτό λοιπόν μονάχα παράγονται οι δυναμικές γραμμές στο Σχ.6. Οι τροχιές τους μας δείχνουν τώρα ότι οι πόλοι N και S μετατοπίστηκαν ακόμη πιο πέρα κατά ένα όγδοο πάλι της περιόδου προς την ίδια κατεύθυνση. Μετά ένα ακόμη όγδοο της περιόδου (γραμμή 4 Σχ.3) το ρεύμα I έχει αλλάξει τη φορά του. Το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται τώρα φαίνεται από το Σχ.7. Τέλος, ύστερα από ένα ακόμη όγδοο της περιόδου (γραμμή 5 Σχ.3), το πεδίο στο στάτη παίρνει τη θέση που δείχνει το Σχ.8.



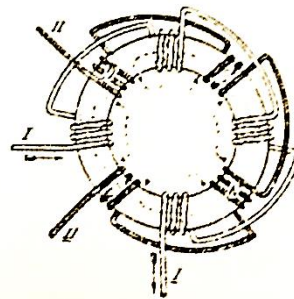
Σχ.6



Σχ.7



Σχ.8

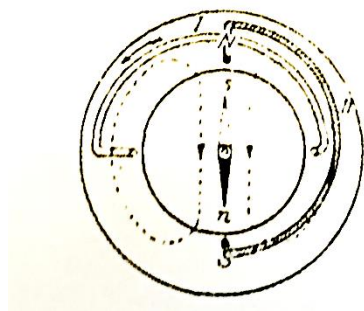


Σχ.9

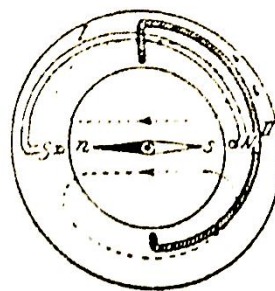
Βλέπουμε λοιπόν ότι το πεδίο που διαπερνά τον αέρα στο εσωτερικό του στάτη έχει κάνει κατά τη διάρκεια μισής περιόδου του ρεύματος μισή ακριβώς στροφή. Σε μια ολόκληρη, επομένως περίοδο αντιστοιχεί και μια στροφή του πεδίου. Αν υποθέσουμε πως η συχνότητα του ρεύματος είναι 50 περίοδοι, το περιστρεφόμενο πεδίο θα κάνει 50 στροφές στο 1", δηλαδή $50 \cdot 60 = 3000$ στροφές στο λεπτό. Την περιστροφή αυτού του πεδίου μπορούμε να την αντιληφθούμε αν βάλουμε στο εσωτερικό του στάτη μια μαγνητική βελόνα όπως δείχνουν τα προηγούμενα σχήματα, στρεπτή στον άξονα της. Βλέπουμε τότε τη βελόνα να περιστρέφεται και ένα κομμάτι όμως από αμαγνήτιστο σίδηρο στρεπτό σε άξονα, θα αρχίσει επίσης να περιστρέφεται, αν μπει στη θέση της μαγνητικής βελόνας, γιατί και το κομμάτι αυτό μαγνητίζεται με επίδραση και έτσι συμπεριφέρεται σαν τέλειος μαγνήτης. Στη διάταξη που εξετάσαμε παραπάνω (Σχ.4 έως 8) παρουσιάζονται πάντοτε και ταυτόχρονα, δύο μονάχα πόλοι στον πυρήνα του στάτη. Η διάταξη λοιπόν αυτή αντιστοιχεί με διπολική μηχανή. Για να δημιουργήσουμε τέσσερις πόλους, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τέσσερα πηνία σε κάθε φάση όπως δείχνει το Σχ.9. Οι πόλοι που σημειώθηκαν επάνω στον πυρήνα του στάτη, ανταποκρίνονται στη χρονική στιγμή 1 του Σχ. 3. Αυτή τη στιγμή το ρεύμα I βρίσκεται στη μέγιστη τιμή του, ενώ το ρεύμα II στη μηδενική. Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να κάνουμε κινητήρες με όσους πόλους θέλουμε. Αν ο κινητήρας έχει τέσσερις τέτοιους πόλους (τετραπολικός κινητήρας όπως στο Σχ.9), το στρεφόμενο πεδίο θα κάνει σε μια περίοδο του ρεύματος μισή στροφή και γενικά από όσο περισσότερους πόλους παράγεται το στρεφόμενο πεδίο, τόσο και οι στροφές του είναι λιγότερες για την συχνότητα του ρεύματος. Και εδώ λοιπόν οι στροφές κατά λεπτό του πεδίου δίνονται από τον τύπο:

$$N = (f \cdot 60) / p$$

Όπου f η συχνότητα του τροφοδοτικού ρεύματος και p, τα ζευγάρια των πόλων του στρεφόμενου πεδίου.



Σχ.10



Σχ.11

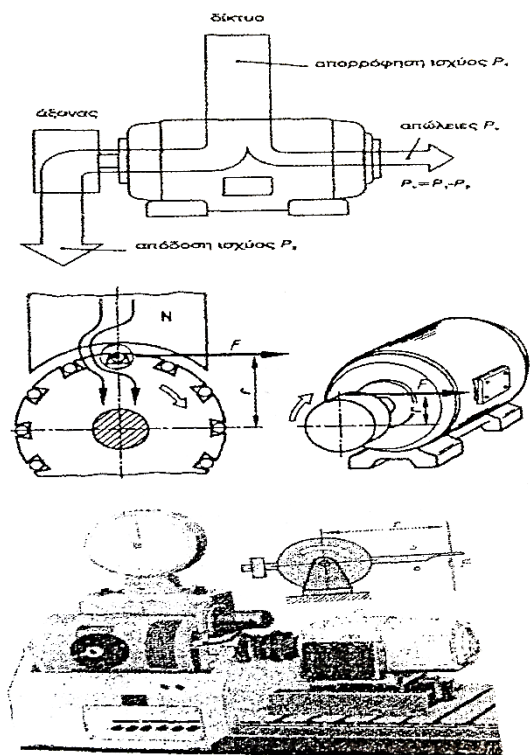
Ο στάτης πού είδαμε ως τώρα, είχε τύλιγμα σε σχήμα δακτυλίου. Προτιμήσαμε αυτό το σχήμα για να δείξουμε πιο καθαρά τη δημιουργία του στρεφόμενου πεδίου. Στην πράξη όμως ο στάτης έχει πάντοτε κυλινδρικό τύλιγμα. Το **Σχ.10** δείχνει ένα διπολικό κυλινδρικό τύλιγμα με την προϋπόθεση πώς έχουμε ένα αυλάκι κατά πόλο και φάση. Η φορά πού έχει το πεδίο στο σχήμα αυτό αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή 1. Πού το ρεύμα I παίρνει τη μέγιστη τιμή του (**Σχ.3**). Στο **Σχ.11** το ρεύμα I μηδενίζεται, ενώ το ρεύμα II φτάνει στη μέγιστη τιμή.

1.3 Ισχύς και ροπή Στρέψης

Οι κινητήρες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια, την οποία απορροφούν από το δίκτυο παροχής για τη λειτουργία τους σε μηχανική ενέργεια ενώ οι γεννήτριες μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Στη μηχανική δημιουργούνται από αυτό πραγματικές απώλειες που εμφανίζονται στη μορφή θερμότητας. Οι απώλειες οι οποίες δημιουργούνται από δινορεύματα και μαγνήτιση και απομαγνήτιση στο μαγνητικό υλικό, ονομάζονται απώλειες σιδήρου. Οι απώλειες που δημιουργούνται από το ρεύμα που διαρρέει τις ωμικές αντιστάσεις του τυλίγματος ονομάζονται απώλειες τυλίγματος. Έξωλλου δημιουργούνται απώλειες ανεμιστήρα καθώς και απώλειες τριβής στα έδρανα και στις ψήκτρες. Ένα μέτρο για τις δημιουργούμενες ολικές απώλειες είναι ο βαθμός απόδοσης(Σχ.3).

Ο βαθμός απόδοσης είναι ο λόγος της αποδιδόμενης ισχύος προς την απορροφούμενη ισχύ. Η απόδοση ισχύος P_2 ενός κινητήρα υπολογίζεται από την μέτρηση της ροπής στρέψης και του αριθμού στροφών. Η απορροφούμενη ισχύς P είναι η ισχύς που αφαιρείτε από το δίκτυο. Στους κινητήρες η ροπή στρέψης σχηματίζεται από τη δράση του μαγνητικού πεδίου του στάτη και του ρεύματος του δρομέα. Το ρεύμα που διέρχεται από το τύλιγμα του δρομέα παράγει γύρω από κάθε σπείρα ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο δημιουργεί στο μαγνητικό πεδίο του στάτη μία δύναμη P . Έτσι σχηματίζεται η ροπή στρέψης.

Από τη μέτρηση της δύναμης P στην περιφέρεια του δίσκου κίνησης του κινητήρα είναι δυνατός ο υπολογισμός της αποδιδόμενης ροπής στρέψης (Σχ.5) που έχει και τις ονομασίες γεννήτρια πέδησης ή ζυγός ισχύος, αποτελείται από μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, της οποίας ο στάτης εδρεύει εύστροφα γύρω από τον άξονα του δρομέα. Σε διέγερση πεδίου παράγεται στον στάτη μία ροπή η οποία αντιστέκεται στη ροπή κίνησης του κινητήρα (ανθιστάμενη ροπή). Η ροπή αυτή μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια του ζυγού. Η ηλεκτρική ενέργεια που δημιουργείται στη γεννήτρια πέδησης, μετατρέπεται σε θερμότητα στις αντιστάσεις φόρτισης. Ισορροπία μεταξύ της ροπής φόρτισης και της ροπής στρέψης του κινητήρα υπάρχει στην περίπτωση σταθερού αριθμού στροφών. Οι αριθμοί στροφών μετρούνται π.χ. με ταχυγεννήτριες. Ένας κινητήρας αποδίδει την ονομαστική του ισχύ και την ονομαστική του ροπή στον ονομαστικό αριθμό στροφών του.



Σχ.3 Ροή ισχύος ενός ηλεκτροκινητήρα η βαθμός απόδοσης
 P_1 απορρόφηση ισχύος $\eta = P_2/P_1$
 P_2 απόδοση ισχύος

Σχ.4 Δημιουργία των ροπών στρέψης στον στάτη και στον δίσκο κίνησης (ώθησης) ενός κινητήρα
 M ροπή στρέψης
 P δύναμη
 R ακτίνα (βραχίονας) $M=Fr$

Σχ.5 Θέση ελέγχου (δοκιμής) του κινητήρα με τον ζυγό ισχύος

2 ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Μια μηχανή που κατασκευάζεται με τυλίγματα απόσβεσης, ονομάζεται επαγωγική μηχανή (induction machine). Αυτή η ονομασία οφείλεται στο γεγονός ότι σε μια επαγωγική μηχανή η τάση στο δρομέα (που παράγει το ρεύμα διέγερσης και το πεδίο του δρομέα) ουσιαστικά επάγεται στο κύκλωμα διέγερσης αντί να προσφέρεται σε αυτό με κάποια ηλεκτρική σύνδεση. Η ειδοποιός διαφορά ενός επαγωγικού κινητήρα είναι το γεγονός ότι για να κινηθεί δεν είναι απαραίτητο να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα διέγερσης.

Αν και η επαγωγική μηχανή μπορεί να λειτουργεί τόσο ως γεννήτρια όσο και ως κινητήρας, τα μειονεκτήματα στην περίπτωση που λειτουργεί ως γεννήτρια είναι πάρα πολλά κι έτσι σπανία χρησιμοποιείται μ' αυτόν τον τρόπο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όλες οι επαγωγικές μηχανές να αναφέρονται ως επαγωγικοί κινητήρες.

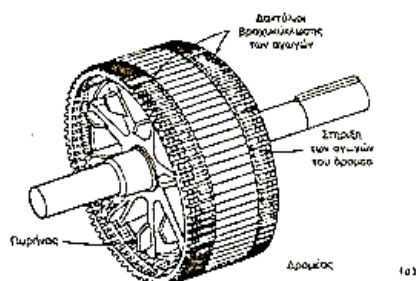
2.1 Η δομή των Επαγωγικών Κινητήρων

Ένας επαγωγικός κινητήρας έχει τον ίδιο στάτη με μια σύγχρονη μηχανή, ενώ ο δρομέας του έχει διαφορετική δομή. Ένας τυπικός στάτης φαίνεται στο **Σχ.1**. Αυτός δείχνει (και στην πραγματικότητα) εντελώς όμοιος με το στάτη μιας μηχανής. Οι τύποι των δρομέων που τοποθετούνται στο εσωτερικό του στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα είναι δύο. Ο ένας απ' αυτούς ονομάζεται δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel-case rotor) και ο άλλος δακτυλιοφόρος δρομέας (wound rotor).



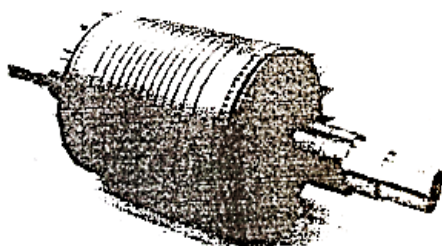
Σχήμα 1:

Ο στάτης ενός επαγωγικού κινητήρα όπου φαίνονται τα τυλίγματα του στάτη



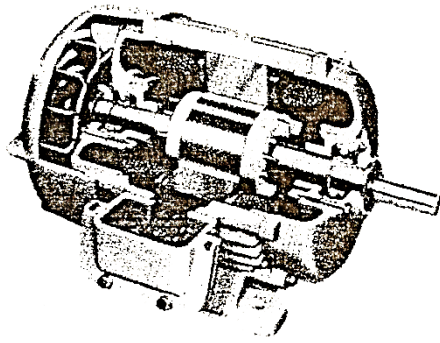
Σχήμα 2(α):

Σχεδιασμός ενός δρομέα κλωβού



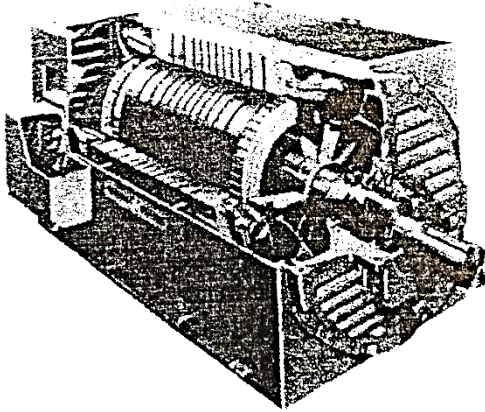
Σχήμα 2(β):

Τυπικός δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού



Σχήμα 3(α):

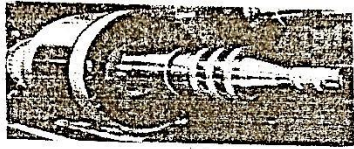
Ένας μικρός επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού σε τομή.
(Magna Tek, inc.)



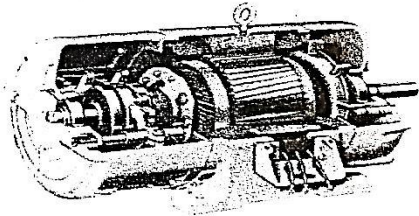
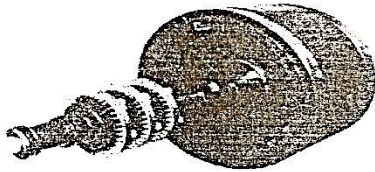
Σχήμα 3(β):

Ένας επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού μεγάλου μεγέθους

Τα Σχ.2 και 3 δείχνουν τους δύο τύπους των δρομέων ενός επαγωγικού κινητήρα. Ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού αποτελείται από μια σειρά αγώγιμων ράβδων που είναι τοποθετημένες σε αυλάκια της επιφάνειας του δρομέα και βραχυκυκλωμένες στα δυο άκρα τους μέσω μεγάλων δακτυλίων (shorting rings). Ο τύπος δρομέα είναι ο δακτυλιοφόρος δρομέας, που διαθέτει ολοκληρωμένο τριφασικό τυλίγμα, το οποίο είναι τοποθετημένο, ώστε να αποτελεί το κατοπτρικό είδωλο του τυλίγματος του στάτη. Οι τρεις φάσεις ενός τέτοιου τυλίγματος συνδέονται συνήθως σε αστέρα, ενώ τα άκρα των αγωγών συνδέονται σε δακτυλίους. Έτσι τα ρεύματα στο δακτυλιοφόρο δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα μπορούν να μετρηθούν στις ψήκτρες κι ακόμη είναι δυνατή η σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα της διέγερσης. Η τελευταία δυνατότητα δίνει το πλεονέκτημα επεξεργασίας της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα. Το Σχ.4 δείχνει δύο δακτυλιοφόρους δρομείς, ενώ το Σχ.5 έναν πλήρη κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα.



(α)



Σχήμα 4:

Τυπικοί δακτυλιοφόροι δρομείς επαγωγικών κινητήρων. Φαίνονται οι δακτύλιοι και οι ράβδοι που συνδέουν τα τυλίγματα του δρομέα με τους δακτύλιους

Σχήμα 5:

Ένας κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα σε τομή που φαίνονται οι ψήκτρες και οι δακτύλιοι

2.2 Βασικές Έννοιες στους Επαγωγικούς Κινητήρες

Η λειτουργία των επαγωγικών κινητήρων είναι βασικά η ίδια με τη λειτουργία των τυλιγμάτων απόσβεσης στις σύγχρονες μηχανές. Παρακάτω αναλύεται και πάλι αυτή η λειτουργία και περιγράφονται κάποιες σημαντικές ιδιότητες των επαγωγικών κινητήρων.

2.2.1 Η Ανάπτυξη της Επαγόμενης Ροπής στους Επαγωγικούς Κινητήρες

Το Σχ.6 δείχνει έναν επαγωγικό κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού. Στο στάτη της μηχανής εφαρμόζεται τριφασικό σύστημα τάσεων με αποτέλεσμα οι αγωγοί του στάτη να διαρρέονται από τριφασικό σύστημα ρευμάτων. Αυτά τα ρεύματα παράγουν το πεδίο του στάτη B_s που περιστρέφεται με ανθρωπολογιακή φορά και με ταχύτητα:

$$n_{sync}=120f_c/P$$

όπου f_c είναι η συχνότητα του συστήματος σε Hz και P ο αριθμός των πόλων της μηχανής. Το μαγνητικό πεδίο B_s καθώς διέρχεται πάνω από τους αγωγούς του δρομέα επάγει κάποια τάση στα άκρα τους.

Η τάση εξ' επαγωγής στα άκρα ενός συγκεκριμένου αγωγού του δρομέα δίνεται από την εξίσωση:

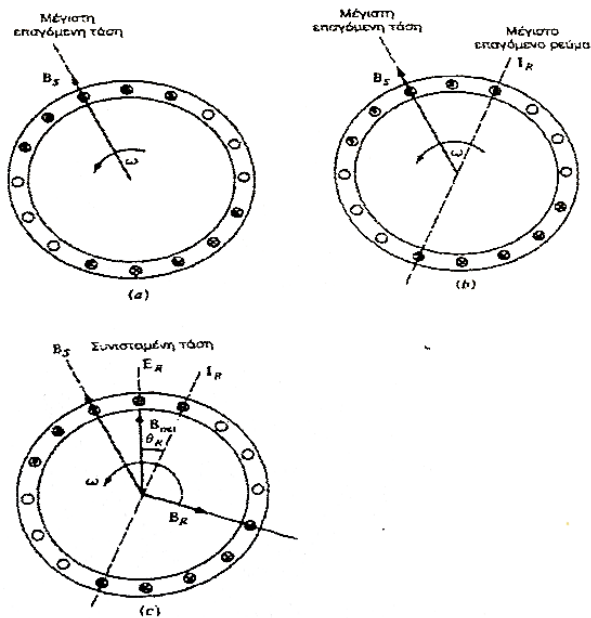
$$e_{ind}=(u \times B)l$$

όπου u η σχετική ταχύτητα των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο B και l το μήκος του αγωγού του δρομέα. Η τάση στα άκρα των αγωγών του δρομέα προκαλείται από τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Η σχετική ταχύτητα των αγωγών του επάνω μέρους του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο έχει φορά προς τα δεξιά κι έτσι η τάση που επάγεται στα άκρα αυτών των αγωγών έχει φορά προς το έξω μέρος της σελίδας. Αντίθετα η τάση στους αγωγούς του κάτω μέρους του δρομέα έχει φορά προς τη σελίδα. Αυτό σημαίνει πως το ρεύμα στους πάνω αγωγούς έχει φορά απ' τη σελίδα προς τα έξω, ενώ στους κάτω αγωγούς έχει φορά προς τη σελίδα. Όμως, επειδή οι αγωγοί του δρομέα συνθέτουν ένα επαγωγικό φορτίο, η μέγιστη τιμή του ρεύματος του δρομέα καθυστερεί σε σχέση με τη μέγιστη τιμή της τάσης του (Σχ.6β). Το ρεύμα του δρομέα προκαλεί το αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο του δρομέα B_r . Τελικά, επειδή η επαγόμενη ροπή στη μηχανή δίνεται από τη σχέση:

$$T_{ind} = k B_r B_s$$

η φορά της θα είναι ανθρωπολογιακή. Αυτό σημαίνει ότι ο δρομέας του κινητήρα επιταχύνεται κατά την ανθρωπολογιακή φορά.

Όμως υπάρχει κάποιο πεπερασμένο πάνω όριο για την ταχύτητα του δρομέα. Αν η ταχύτητα του δρομέα ήταν ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα, δεν θα υπήρχε σχετική κίνηση των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη και δεν θα αναπτυσσόταν τάση εξ επαγωγής στα άκρα τους. Αν η τάση e_{ind} ήταν μηδενική, οι αγωγοί του δρομέα δεν θα διαρρέονταν από ρεύμα και δεν θα αναπτυσσόταν μαγνητικό πεδίο στο δρομέα. Όμως σ' αυτήν την περίπτωση η επαγόμενη ροπή θα ήταν μηδενική και θα επακολουθούσε επιβράδυνση του δρομέα λόγω των απωλειών τριβής. Τελικά ένας επαγωγικός κινητήρας μπορεί να περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, αλλά δεν είναι ποτέ δυνατό να περιστρέφεται με ταχύτητα ακριβώς ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα.



ΣΧΗΜΑ 6

Η ανάπτυξη της επαγωγικής ροπής σ' έναν επαγωγικό κινητήρα (α) Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη B_s παράγει την τάση εξ επαγωγής στις ράβδους του δρομέα, (β) Η τάση εξ επαγωγής παράγει κάποιο ρεύμα στο δρομέα που έπεται της τάσης εξαιτίας της αυτεπαγωγής που παρουσιάζει ο δρομέας, (γ) Το ρεύμα του δρομέα παράγει το μαγνητικό πεδίο του δρομέα B_r , που έπεται του ρεύματος κατά 90° και σε συνδυασμό με το B_{net} παράγουν την ανθρωρολογιακή ροπή στο εσωτερικό της μηχανής.

2.2.2 Η Έννοια της Ολίσθησης του Δρομέα

Η τάση που επάγεται σε κάποιον από τους αγωγούς του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα εξαρτάται από τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Όμως, επειδή η συμπεριφορά ενός επαγωγικού κινητήρα εξαρτάται βασικά από τις τάσεις και τα ρεύματα στο δρομέα, είναι λογικό να γίνεται συχνά λόγος για την παραπάνω σχετική ταχύτητα. Δύο είναι συνήθως τα μεγέθη που περιγράφουν τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Το πρώτο απ' αυτά είναι η ταχύτητα ολίσθησης (slip speed) που ορίζεται ως η διαφορά της ταχύτητας το δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα:

$$n_{slip} = n_{sync} - n_m$$

όπου n_{slip} η ταχύτητα ολίσθησης της μηχανής, n_{sync} η ταχύτητα των μαγνητικών πεδίων, n_m η μηχανική ταχύτητα του άξονα της μηχανής. Το δεύτερο μέγεθος με το οποίο εκφράζεται η σχετική κίνηση είναι η ολίσθηση (slip) και ουσιαστικά πρόκειται για τη σχετική ταχύτητα εκφρασμένη σε εκατοστιαία ή σε ανά μονάδα (per unit) βάση. Έτσι η ολίσθηση ορίζεται από τη σχέση:

$$s = [n_{slip}/n_{sync}](\times 100\%)$$

$$s = [(n_{sync} - n_m)/n_{sync}](\times 100\%)$$

Αυτή η εξίσωση μπορεί επίσης να εκφραστεί και μέσω της γωνιακής ταχύτητας (rad/sec)

$$S = [(\omega_{sync} - \omega_m)/\omega_{sync}](\times 100\%)$$

Σημειώνεται ότι αν ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, είναι $s=0$, ενώ αν ο δρομέας είναι ακίνητος είναι $s=1$. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση η τιμή της ολίσθησης μεταβάλλεται μεταξύ αυτών των δύο ορίων.

Ακόμη η ταχύτητα περιστροφής του άξονα της μηχανής μπορεί να εκφραστεί μέσω της ολίσθησης και της σύγχρονης ταχύτητας. Η λύση των δύο τελευταίων εξισώσεων ως προς τη μηχανική ταχύτητα οδηγεί στις εξισώσεις:

$$n_m = (1-s) n_{sync}$$

$$\text{ή} \quad \omega_m = (1-s) \omega_{sync}$$

Αυτές οι σχέσεις είναι πολύ σημαντικές κατά την εξαγωγή των εξισώσεων για την επαγόμενη ροπή και την ισχύ ενός επαγωγικού κινητήρα.

2.2.3 Η Ηλεκτρική Συχνότητα στο Δρομέα

Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί με τάσεις και ρεύματα εξ επαγωγής στο δρομέα της και γι' αυτό το λόγο συνήθως ονομάζεται στρεφόμενος μετασχηματιστής. Όπως σ' ένα μετασχηματιστή, το πρωτεύον τύλιγμα (του στάτη) επάγει κάποια τάση στο δευτερεύον τύλιγμα (του δρομέα). Αντίθετα όμως απ' ότι συμβαίνει σ' ένα μετασχηματιστή, η συχνότητα του δευτερεύοντος δεν είναι απαραίτητα ίση μ' αυτή του πρωτεύοντος.

Αν ο δρομέας της μηχανής είναι ακίνητος, τότε η συχνότητά του είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη. Όμως αν ο δρομέας κινείται με τη σύγχρονη ταχύτητα, η συχνότητα της τάσης στο δρομέα θα είναι μηδενική. Ποιά θα είναι η συχνότητα στο δρομέα για οποιαδήποτε άλλη ενδιάμεση τιμή της ταχύτητάς του.

Όταν $n_m = 0$ rpm η συχνότητα στο δρομέα είναι $f_r = f_e$ και η ολίσθηση $s = 1$. Όταν $n_m = n_{sync}$, η συχνότητα στο δρομέα είναι $f_r = 0$ Hz και η ολίσθηση είναι $s = 0$. Για κάθε άλλη ενδιάμεση τιμή της ταχύτητας του δρομέα η συχνότητα στο δρομέα είναι ανάλογη της διαφοράς της ταχύτητας του πεδίου του στάτη n_{sync} με την ταχύτητα του δρομέα n . Επειδή η ολίσθηση ορίζεται από την εξίσωση:

$$s = (n_{sync} - n_m) / n_{sync}$$

η συχνότητα στο δρομέα είναι δυνατόν να γραφεί ως:

$$f_r = s f_e$$

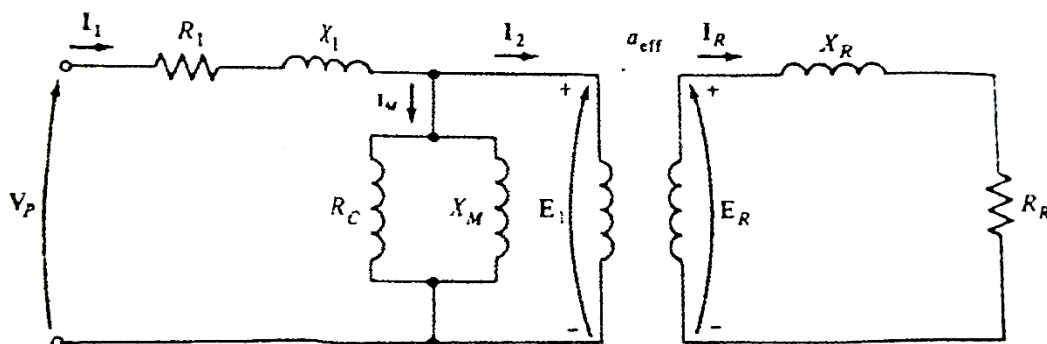
Οι διάφορες μορφές που μπορεί να πάρει η παραπάνω εξίσωση είναι μερικές φορές πολύ χρήσιμες. Από τις παραπάνω προκύπτει:

$$f_r = (n_{sync} / n_m) p / 120$$

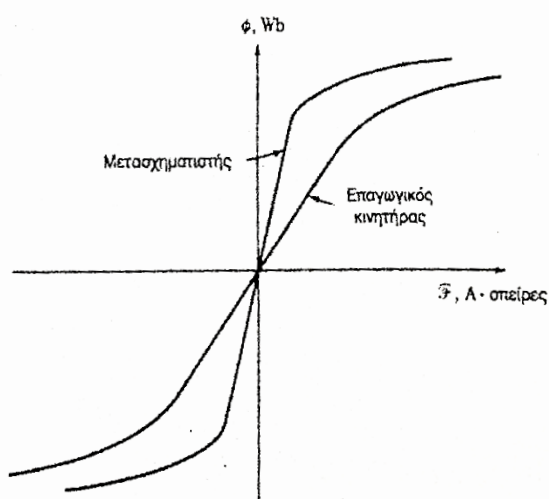
2.2.4 Το Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα

Η λειτουργία του κινητήρα βασίζεται στις τάσεις και τα ρεύματα που παράγονται εξ επαγωγής στο δρομέα και οφείλονται στο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Επειδή κατά την παραγωγή των τάσεων και των ρευμάτων ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί εντελώς όμοια μ' έναν μετασχηματιστή, το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα θα μοιάζει αρκετά μ' αυτό του μετασχηματιστή. Ο επαγωγικός κινητήρας ονομάζεται και μηχανή απλής διέγερσης (singly excited – σε αντιδιαστολή με τις σύγχρονες μηχανές που ονομάζονται διπλής διέγερσης, doubly excited), επειδή τροφοδοτείται με ισχύ μόνο το κύκλωμα του στάτη του. Επειδή ο επαγωγικός κινητήρας δεν διαθέτει ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης στο ισοδύναμο κύκλωμα του δεν υπάρχει εσωτερική πηγή τάσης, όμοια με την εσωτερική τάση E_A των σύγχρονων μηχανών.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα είναι δυνατό να εξαχθεί, αν είναι γνωστή η λειτουργία των μετασχηματιστών και οι κανόνες που διέπουν τη μεταβολή της συχνότητας στο δρομέα με τη μεταβολή της ταχύτητας της περιστροφής ενός επαγωγικού κινητήρα. Εδώ η ανάπτυξη του ισοδύναμου κυκλώματος ενός επαγωγικού κινητήρα ξεκινά με το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή και κατόπιν λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της συχνότητας στο δρομέα και κάποια άλλα παραπλήσια φαινόμενα.



ΣΧΗΜΑ 7: Το ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή σ' έναν επαγωγικό κινητήρα, όπου ο στάτης συνδέεται με το δρομέα μέσω ενός ιδανικού μετασχηματιστή λόγω μετασχηματισμού a_{eff}



ΣΧΗΜΑ 8
Η καμπύλη μαγνήτισης ενός Επαγωγικού κινητήρα σε σύγκριση μ' αυτή ενός μετασχηματιστή

Σε κάθε μετασχηματιστή που διαθέτει σιδηρομαγνητικό πυρήνα, η μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής εξαρτάται από το ολοκλήρωμα της εφαρμοζόμενης τάσης E . Στο **Σχ.8** η γραφική παράσταση της μαγνητεγερτικής δύναμης ως προς τη μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής (καμπύλη μαγνήτισης) συγκρίνεται με την αντίστοιχη καμπύλη ενός μετασχηματιστή ισχύος. Φαίνεται καθαρά πως η κλίση της καμπύλης μαγνήτισης του επαγωγικού κινητήρα είναι πολύ λιγότερο απότομη απ' αυτή ενός καλά σχεδιασμένου μετασχηματιστή. Αυτό συμβαίνει επειδή στη μηχανή υπάρχει κάποιο διάκενο που αυξάνει τη μαγνητική αντίσταση κατά τη διαδρομή της ροής, πράγμα που μειώνει την ποιότητα της σύζευξης μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Όσο μεγαλύτερη μαγνητική αντίσταση παρουσιάζει το διάκενο της μηχανής, τόσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα μαγνήτισης που απαιτείται για την εξασφάλιση μιας δεδομένης ροής. Έτσι η αντίσταση μαγνήτισης X_M θα έχει πολύ μικρότερη τιμή (ή διαφορετικά η επιδεκτικότητα B_M θα έχει πολύ μεγαλύτερη τιμή) απ' αυτήν ενός συνηθισμένου μετασχηματιστή.

Η εσωτερική τάση στο στάτη της μηχανής E συνδέεται με την τάση του δευτερεύοντος E_R μέσω του μετασχηματιστή με κάποιον ενεργό λόγο μετασχηματισμού a_{eff} . Στον επαγωγικό κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα είναι εύκολος ο προσδιορισμός του λόγου μετασχηματισμού a_{eff} . Αυτός είναι ίσος με τον αριθμό των αγωγών ανά φάση του στάτη προς τον αριθμό των αγωγών ανά φάση του δρομέα επί τους συντελεστές βήματος και κατανομής. Όμως στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού, του οποίου ο δρομέας δεν διαθέτει συγκεκριμένο αριθμό αγωγών, είναι μάλλον δύσκολος ο ακριβής προσδιορισμός του a_{eff} . Πάντως και στις δύο περιπτώσεις ορίζεται ο λόγος μετασχηματισμού του κινητήρα.

2.3 Ισχύς και Ροπή στους επαγωγικούς Κινητήρες

Οι σχέσεις για την ισχύ και τη ροπή των επαγωγικών κινητήρων είναι σχετικά διαφορετικές απ' αυτές των σύγχρονων μηχανών που αναλύθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια, επειδή οι επαγωγικοί κινητήρες είναι μηχανές απλής διέγερσης. Σ' αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι σχέσεις που διέπουν την ισχύ και τη ροπή των επαγωγικών κινητήρων.

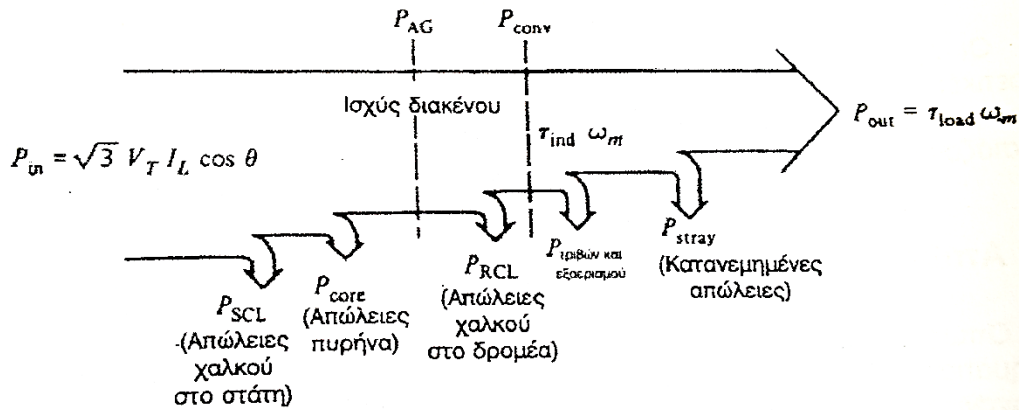
2.3.1 Απώλειες και Διάγραμμα Ροής Ισχύος

Όπως αναφέρθηκε, ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί ως στρεφόμενος μετασχηματιστής. Η είσοδος του είναι κάποιο τριφασικό σύστημα τάσεων και ρευμάτων. Σ' έναν κανονικό μετασχηματιστή η ηλεκτρική ισχύς εξόδου είναι η ισχύς στο δευτερεύον τύλιγμα. Στον επαγωγικό κινητήρα το δευτερεύον τύλιγμα (ο δρομέας) είναι βραχυκυκλωμένο κι έτσι δεν εμφανίζεται ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της μηχανής. Αντίθετα η ισχύς εξόδου του κινητήρα είναι μηχανική. Η σχέση ανάμεσα στην ηλεκτρική ισχύ εισόδου και στην μηχανική ισχύ εξόδου ενός επαγωγικού κινητήρα παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής ισχύος του **Σχ. 9**.

Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου στον κινητήρα P_{in} έχει τη μορφή τριφασικού συστήματος τάσεων και ρευμάτων. Το πρώτο είδος απωλειών που υπολογίζεται στον κινητήρα είναι οι θερμικές (I^2R) απώλειες στο τύλιγμα του στάτη (απώλειες χαλκού στο στάτη). Κατόπιν κάποιο ποσό ισχύος χάνεται με τη μορφή απωλειών υστέρησης και απωλειών εξαιτίας των δινορευμάτων στο στάτη (P_{core}). Η ισχύς που απομένει, μεταφέρεται στο δρομέα της μηχανής περνώντας από το διάκενο που υπάρχει μεταξύ του στάτη και του δρομέα. Αυτή η ισχύς ονομάζεται ισχύς διακένου (air-gap power) P_{ag} της μηχανής. Ένα μέρος της ισχύος που μεταφέρεται στο δρομέα χάνεται με τη μορφή θερμικών (I^2R) απωλειών στα τυλίγματα του δρομέα (απώλειες χαλκού στο δρομέα -RCL), ενώ η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή (P_{conv}). Από αυτή την ισχύ αφαιρούνται τελικά οι απώλειες τριβής και εξαερισμού $P_{f\&w}$, καθώς και οι καταναμημένες απώλειες P_{misc} . Το υπόλοιπο ποσό της μηχανικής ισχύος αποτελεί την ισχύ εξόδου P_{out} της μηχανής.

Οι απώλειες πυρήνα δεν εμφανίζονται πάντα στο σημείο του διαγράμματος που φαίνεται στο **Σχ. 9**. Η φύση των απωλειών πυρήνα κάνει κάπως αυθαίρετη την επιλογή του σημείου στο οποίο πρόκειται να υπολογιστούν. Στην πραγματικότητα οι απώλειες πυρήνα ενός επαγωγικού κινητήρα προέρχονται κατά ένα μέρος από το κύκλωμα του στάτη και κατά ένα μέρος από το κύκλωμα του δρομέα. Επειδή ο κινητήρας συνήθως περιστρέφεται με ταχύτητα που είναι πολύ κοντά στη σύγχρονη, η σχετική ταχύτητα των μαγνητικών πεδίων είναι πολύ μικρή κι έτσι οι απώλειες πυρήνα στο δρομέα είναι πολύ λίγες σε σχέση με τις αντίστοιχες απώλειες στο στάτη. Έτσι, επειδή το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών πυρήνα προέρχεται από το κύκλωμα του στάτη, οι συνολικές απώλειες πυρήνα συνήθως προστίθενται στο σημείο του διαγράμματος που φαίνεται στο **Σχ.9**. Στο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα αυτές οι απώλειες αντιστοιχίζονται στην αντίσταση K_c (ή στην αγωγιμότητα G_c). Στην περίπτωση που οι απώλειες πυρήνα δίνονται με κάποια αριθμητική τιμή (πχ X Watt) και όχι με την τιμή κάποιου ηλεκτρικού στοιχείου, αυτές προστίθενται στις μηχανικές απώλειες της μηχανής και αφαιρούνται σ' εκείνο το σημείο του διαγράμματος ροής ισχύος που αφαιρούνται και οι μηχανικές απώλειες.

Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες τριβών, εξαερισμού και οι καταναμημένες απώλειες. Από την άλλη όσο μεγαλύτερη (πιο κοντά στην n_{sync}) είναι η ταχύτητα του κινητήρα, τόσο λιγότερες είναι οι απώλειες πυρήνα. Αυτές οι τρεις κατηγορίες απωλειών συνήθως προστίθενται μεταξύ τους και ονομάζονται απώλειες περιστροφής (rotational losses). Οι συνολικές απώλειες περιστροφής ενός επαγωγικού κινητήρα συνήθως θεωρούνται σταθερές καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα.



ΣΧΗΜΑ 9 Διαχωρισμός των απωλειών χαλκού στο δρομέα και της ισχύος που μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική στο εσωτερικό του επαγωγικού κινητήρα.

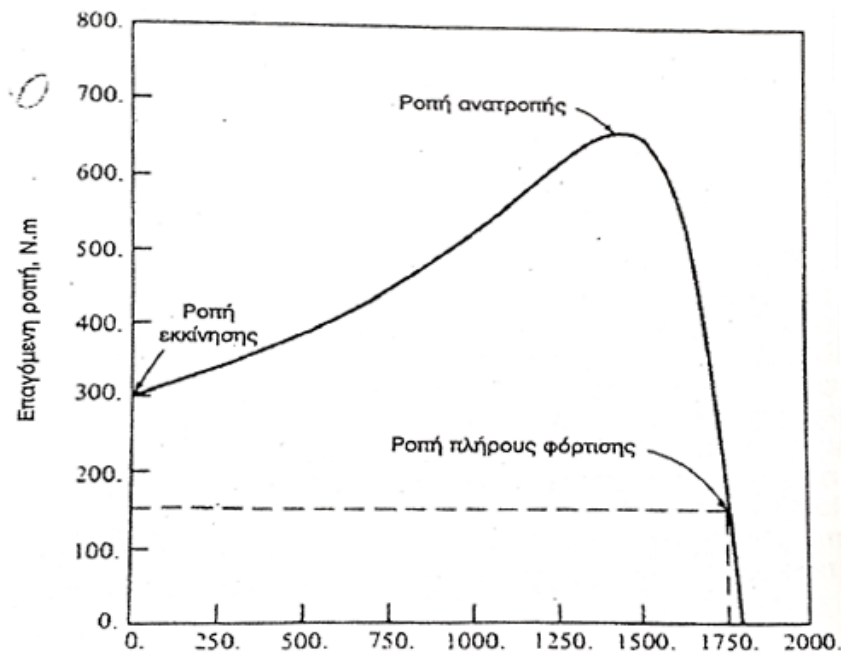
Ένα μέρος της ισχύος που μεταφέρεται μέσω του διάκενου του επαγωγικού κινητήρα καταναλώνεται στις απώλειες χαλκού του δρομέα, ενώ το υπόλοιπο μέρος της μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ, που κινεί τον άξονα της μηχανής. Είναι δυνατός ο διαχωρισμός των δύο τμημάτων της ισχύος διακένου και η αντιστοίχιση τους σε ξεχωριστά στοιχεία του ισοδύναμου κυκλώματος.

Οι απώλειες χαλκού στο δρομέα είναι ίσες με την ισχύ που θα καταναλώνονταν σε μια αντίσταση R_2 . Η διαφορά τους είναι η ισχύς P_{conv} , η οποία με τη σειρά της είναι ίση με την ισχύ που καταναλώνει η αντίσταση:

$$R_{conv} = (R_2/s) - R_2$$

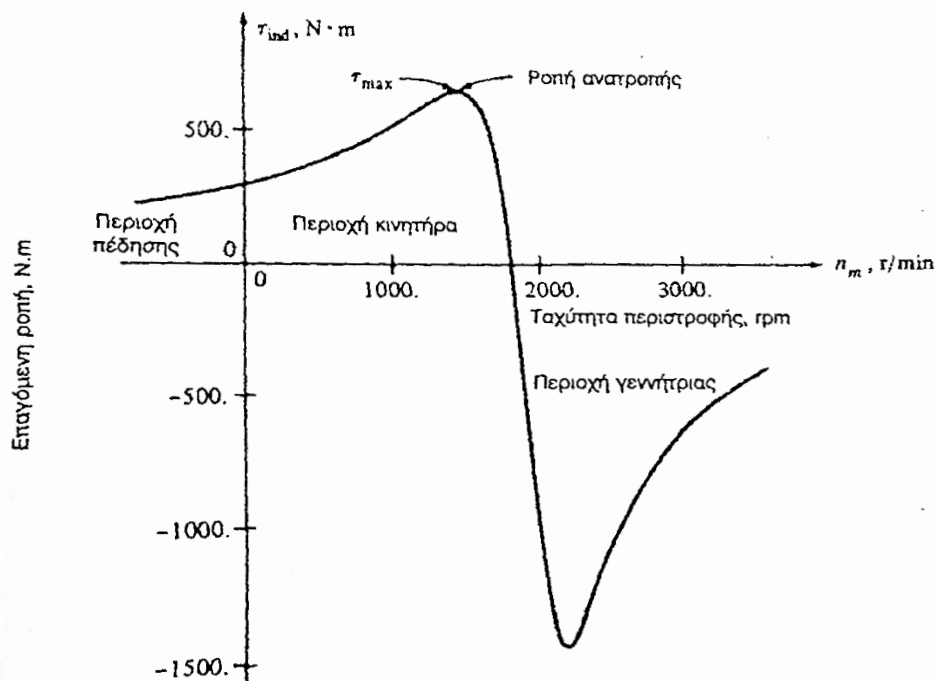
$$R_{conv} = R_2[(1-s)/s]$$

2.3.2 Χαρακτηριστική Ροπής Ταχύτητας των Επαγωγικών Κινητήρων



ΣΧΗΜΑ 10 Η χαρακτηριστική ροπής- ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα

1. Η επαγόμενη ροπή του επαγωγικού κινητήρα είναι ίση με μηδέν στη σύγχρονη ταχύτητα. Το γεγονός αυτό έχει αναλυθεί στα προηγούμενα.
 2. Μεταξύ των σημείων λειτουργίας χωρίς φορτίο και υπό πλήρες φορτίο η καμπύλη ροπής – ταχύτητας είναι σχεδόν γραμμική. Σ' αυτή την περιοχή η αντίσταση του δρομέα είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίδραση του κι έτσι το ρεύμα του δρομέα, το μαγνητικό πεδίο του δρομέα και η επαγόμενη ροπή αυξάνονται γραμμικά με την αύξηση της ολίσθησης.
 3. Υπάρχει μια μέγιστη επιτρεπτή ροπή που είναι αδύνατο να ξεπεραστεί. Αυτή η ροπή ονομάζεται ροπή ανατροπής ή ροπή κατάρρευσης (pullout-breakdown torque) και είναι δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή του κινητήρα κατά την πλήρη φόρτιση. Η επόμενη ενότητα αυτού του κεφαλαίου περιλαμβάνει μια μέθοδο υπολογισμού της ροπής ανατροπής.
 4. Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα είναι λίγο μεγαλύτερη από τη ροπή κατά την πλήρη φόρτιση. Έτσι ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να ξεκινήσει με οποιοδήποτε από τα φορτία που είναι ικανός να κινήσει στη λειτουργία υπό πλήρη ισχύ.
 5. Ας σημειωθεί ότι η ροπή του κινητήρα για μια δεδομένη τιμή της ολίσθησης μεταβάλλεται με το τετράγωνο της τάσης εισόδου. Το γεγονός αυτό είναι πολύ χρήσιμο σε μια από τις τεχνικές ελέγχου της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, η οποία θα αναλυθεί στα επόμενα.
 6. Αν ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα περιστρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από τη σύγχρονη ταχύτητα, η φορά περιστροφής της επαγόμενης ροπής αντιστρέφεται, με αποτέλεσμα η μηχανή να λειτουργεί ως γεννήτρια μετατρέποντας μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική.
- Περιγραφή των επαγωγικών μηχανών ως γεννήτριες θα δοθεί αργότερα.



ΣΧΗΜΑ 11 Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, όπου φαίνονται και οι διευρυμένες περιοχές λειτουργίας (περιοχή πέδησης και περιοχή επαγωγικής γεννήτριας).

7. Αν η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό του, η επαγόμενη ροπή θα σταματήσει τον κινητήρα και θα προσπαθήσει να τον περιστρέψει προς την αντίθετη φορά. Όμως, επειδή η φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων στον επαγωγικό κινητήρα μπορεί να πραγματοποιηθεί πολύ απλά με την αντιμετάθεση των συνδέσεων σε δύο από τις τρεις φάσεις του, η παραπάνω παρατήρηση είναι δυνατό να χρησιμοποιείται με σκοπό το απότομο σταμάτημα του κινητήρα. Η αντιμετάθεση των συνδέσεων σε δύο από τις τρεις φάσεις του κινητήρα ονομάζεται ακραία πέδηση (plugging).

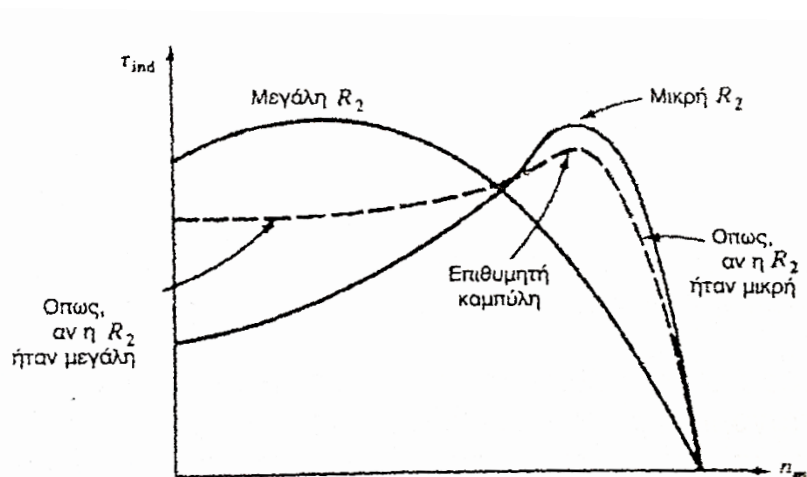
2.3.3 Μεταβολές της Χαρακτηριστικής Ροπής-Ταχύτητας στους Επαγωγικούς Κινητήρες

Ένας κινητήρας με μεγάλη αντίσταση δρομέα παρουσιάζει ικανοποιητική ροπή εκκίνησης αλλά η απόδοσή του είναι πολύ μικρή στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Αντίθετα ένας κινητήρας με μικρή αντίσταση στο δρομέα παρουσιάζει μικρή ροπή εκκίνησης και μικρό ρεύμα εκκίνησης, αλλά η απόδοση του στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας είναι αρκετά υψηλή. Ένας σχεδιαστής επαγωγικών κινητήρων είναι συνήθως αναγκασμένος να επιλέξει ανάμεσα στις δύο αλληλοσυγκρουόμενες απαιτήσεις για μεγάλη ροπή εκκίνησης και ικανοποιητική απόδοση.

Μια πιθανή λύση είναι η χρήση του κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα σε συνδυασμό με την εισαγωγή μιας αντίστασης στο δρομέα της μηχανής κατά την εκκίνηση. Η εξωτερική αντίσταση είναι δυνατό να απομακρύνεται εντελώς κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας με σκοπό την αύξηση της απόδοσης. Δυστυχώς οι κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα είναι οι πιο δαπανηροί, απαιτούν πιο συχνή συντήρηση και πιο πολύπλοκα κυκλώματα αυτόματου ελέγχου απ' ότι οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού. Επίσης πολλές φορές είναι σημαντική η ολική απομόνωση (σφράγισμα) του κινητήρα, όταν αυτός πρόκειται να τοποθετηθεί σε επικίνδυνο ή εκρηκτικό περιβάλλον. Όμως αυτό μπορεί να γίνει εύκολα με τη χρήση των κινητήρων που περιλαμβάνουν όλο το δρομέα στο εσωτερικό τους. Θα ήταν πολύ βολικό αν υπήρχε κάποιος τρόπος εισαγωγής μιας εξωτερικής αντίστασης στο δρομέα κατά την εκκίνηση και απομάκρυνσής της στην κανονική λειτουργία, χωρίς τη χρήση δακτυλίων και χωρίς την παρέμβαση χειροκίνητου ή ηλεκτρικού ελέγχου.

Στο **Σχ.12** περιγράφεται η ζητούμενη χαρακτηριστική ενός κινητήρα. Εδώ φαίνονται οι χαρακτηριστικές δύο κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα, ο ένας από τους οποίους παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση και ο άλλος μικρή. Για τις υψηλές τιμές της ολίσθησης ο ζητούμενος κινητήρας θα πρέπει να συμπεριφέρεται όπως ο κινητήρας που έχει μεγάλη αντίσταση στο δακτυλιοφόρο δρομέα. Για τις χαμηλές τιμές της ολίσθησης θα πρέπει να συμπεριφέρεται όπως ο κινητήρας με μικρή αντίσταση στο δακτυλιοφόρο δρομέα.

Ευτυχώς τα παραπάνω αποτελέσματα είναι δυνατό να επιτευχθούν κατά το σχεδιασμό του επαγωγικού κινητήρα με την κατάλληλη εκμετάλλευση της αντίδρασης διαρροής.



ΣΧΗΜΑ 12 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας στην οποία συνδυάζονται τα αποτελέσματα μιας μεγάλης σε μικρές ταχύτητες (μεγάλη ολίσθηση) με τα αποτελέσματα μιας μικρής αντίστασης σε μεγάλες (μικρή ολίσθηση).

2.3.4 Ρύθμιση της Χαρακτηριστικής ενός Κινητήρα Βραχυκυκλωμένου Κλωβού

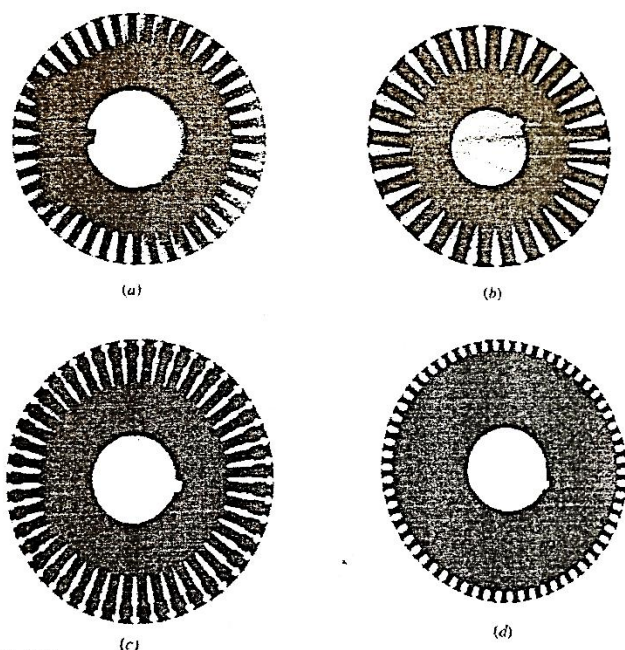
Στο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα η αντίδραση X_2 εκφράζει την ανοιγμένη τιμή της αντίδρασης διαρροής (leakage reactance) του δρομέα. Ως γνωστό η αντίδραση διαρροής είναι η αντίδραση που οφείλεται στις γραμμές της μαγνητικής ροής του δρομέα για τις οποίες δεν υφίσταται σύζευξη με το τύλιγμα του στάτη. Γενικά, όσο πιο απομακρυσμένη από το στάτη είναι η ράβδος ή το τμήμα της ράβδου του δρομέα, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίδραση διαρροής της ράβδου, αφού το ποσοστό μαγνητικής ροής της ράβδου που φθάνει στο στάτη είναι μικρότερο. Έτσι, αν οι ράβδοι του δρομέα είναι τοποθετημένες κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, θα παρουσιάζουν μικρή ροή διαρροής και η αντίδραση X_2 στο ισοδύναμο κύκλωμα θα έχει μικρή τιμή. Αντίθετα, αν οι ράβδοι του δρομέα τοποθετηθούν βαθύτερα στην επιφάνειά του, θα παρουσιάζουν ροή διαρροής μεγαλύτερη και η αντίδραση X_2 θα είναι μεγαλύτερη.

Στο **Σχ.13α**, για παράδειγμα φαίνεται η φωτογραφία του δυναμοελάσματος ενός δρομέα και μπορεί να παρατηρηθεί η διατομή των ράβδων στον δρομέα. Εδώ οι ράβδοι είναι αρκετά μεγάλες και τοποθετούνται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα. Μια τέτοια σχεδίαση παρουσιάζει μικρή αντίσταση (λόγω της μεγάλης διατομής των ράβδων) και μικρή αντίδραση διαρροής X_2 (λόγω της θέσης των ράβδων στο στάτη). Αφού η αντίσταση του δρομέα είναι μικρή, η ροπή ανατροπής εμφανίζεται σε μια ταχύτητα πολύ κοντά στη σύγχρονη και ο κινητήρας είναι πολύ αποδοτικός. Ας σημειωθεί ότι:

$$P_{\text{conv}}=(1-s)P_{\text{AG}}$$

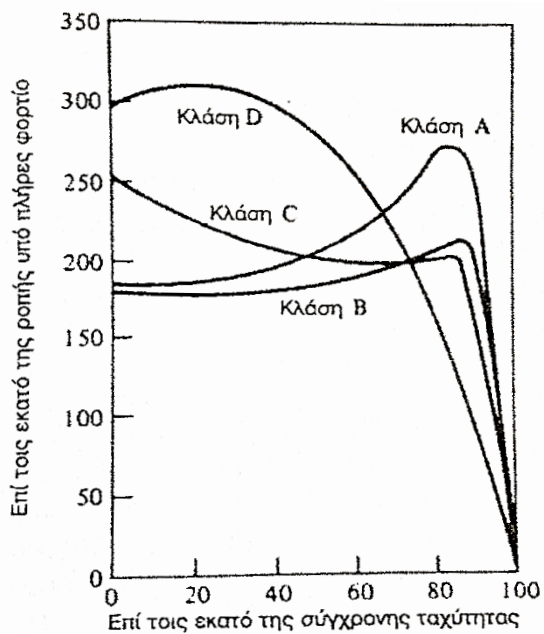
δηλαδή, πολύ μικρό ποσοστό της ισχύος διακένου χάνεται πάνω στην αντίσταση του δρομέα. Όμως, επειδή η R_2 είναι μικρή, η ροπή εκκίνησης του κινητήρα θα είναι μικρή και το ρεύμα εκκίνησης θα είναι μεγάλο. Αυτή η μέθοδος σχεδιασμού ονομάστηκε από την NEMA κλάση σχεδίασης A. Ένας τέτοιος κινητήρας είναι λίγο πολύ ένας τυπικός επαγωγικός κινητήρας με χαρακτηριστικά σχεδόν όμοια μ' αυτά του κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα που δεν διαθέτει εξωτερική πρόσθετη αντίσταση. Στο **Σχ.10** φαίνεται η χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας ενός τέτοιου κινητήρα.

Στο **Σχ.13δ**, φαίνεται η διατομή του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα που διαθέτει μικρές ράβδους τοποθετημένες κοντά στην επιφάνεια του δρομέα. Επειδή η διατομή των ράβδων είναι μικρή, η αντίσταση του δρομέα είναι σχετικά μεγάλη. Ακόμη, επειδή οι ράβδοι βρίσκονται κοντά στο στάτη, η αντίδραση διαρροής του δρομέα είναι και πάλι μικρή. Αυτός ο κινητήρας μοιάζει με επαγωγικό κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα που διαθέτει κάποια πρόσθετη εξωτερική αντίσταση. Λόγω της μεγάλης αντίστασης του δρομέα, η ροπή ανατροπής του συγκεκριμένου κινητήρα εμφανίζεται σε κάποιο σημείο με μεγάλη ολίσθηση, ενώ η ροπή εκκίνησής του είναι αρκετά υψηλή. Ο κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού που διαθέτει την παραπάνω δομή ονομάστηκε από τη NEMA κινητήρας κλάσης D. Στο **Σχ.14** φαίνεται η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας αυτού του κινητήρα.



ΣΧΗΜΑ 13

Τα δυναμοελάσματα που σχηματίζουν τους δρομείς των τυπικών επαγωγικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου κλωβού, στα οποία φαίνονται οι διατομές των ράβδων του δρομέα (α) Κλάση σχεδίασης A της NEMA-μεγάλες ράβδοι κοντά στην επιφάνεια (β) Κλάση σχεδίασης B της NEMA-μεγάλες ράβδοι βαθιά στο δρομέα (γ) Κλάση σχεδίασης C της NEMA-δρομέας διπλού κλωβού (δ) Κλάση σχεδίασης D της NEMA - μικρές ράβδοι κοντά στην επιφάνεια.



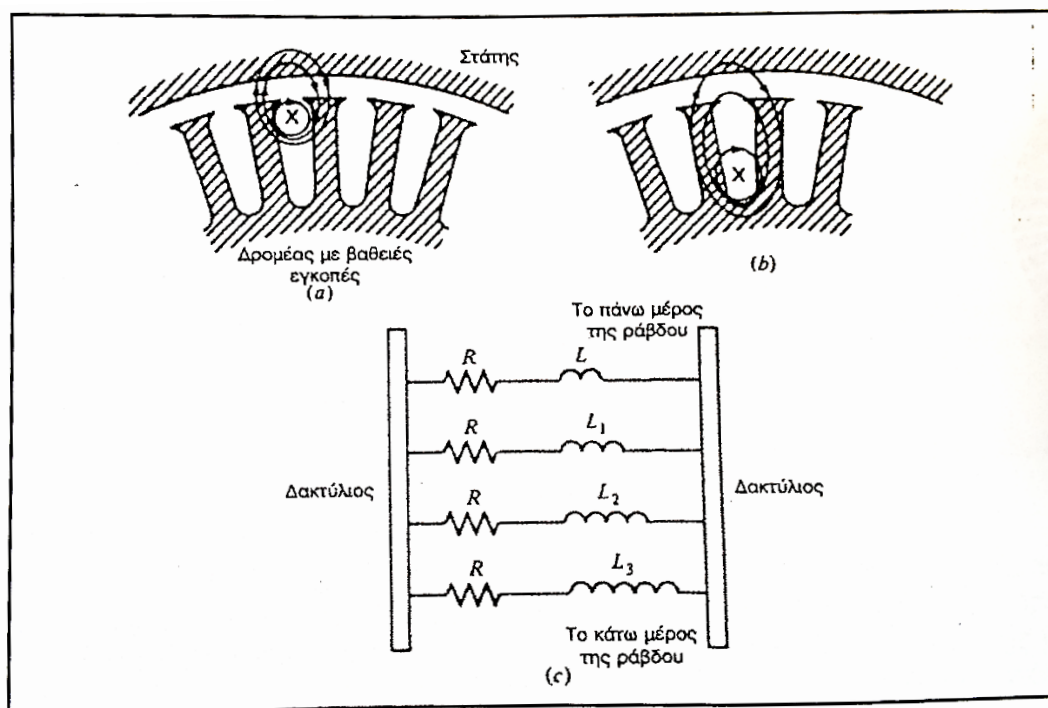
ΣΧΗΜΑ 14

Τυπικές χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας για διαφορετικής σχεδίασης δρομείς.

2.3.5 Κινητήρες με Βαθείς Εγκοπές και με Διπλό Δρομέα

Οι δύο προηγούμενες μέθοδοι σχεδιασμού του δρομέα είναι σχεδόν όμοιες με το δακτυλιοφόρο δρομέα που παρουσιάζει σταθερή αντίσταση. Πως όμως είναι δυνατή η σχεδίαση ενός δρομέα με μεταβλητή αντίσταση που να συνδυάζει τη μεγάλη ροπή και το μικρό ρεύμα εκκίνησης της κλάσης O με τη χαμηλή ολίσθηση στην κανονική λειτουργία και την υψηλή απόδοση της κλάσης A ;

Η υλοποίηση της μεταβλητής αντίστασης δρομέα είναι δυνατή με τις μεθόδους βαθιών εγκοπών του **Σχ.15**. Στο **Σχ.15α** φαίνεται το ρεύμα που διαρρέει το πάνω μέρος της ράβδου. Επειδή το ρεύμα αυτής της περιοχής είναι ισχυρά συζευγμένο με το στάτη, η αυτεπαγωγή διαρροής είναι μικρή. Στο **Σχ.15β** φαίνεται το ρεύμα που διαρρέει το μέρος της ράβδου που βρίσκεται βαθιά στην εγκοπή. Εδώ η αυτεπαγωγή διαρροής είναι μεγαλύτερη. Επειδή όλα τα μέρη της ράβδου είναι συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους, η συνολική ράβδος αντιπροσωπεύεται από μια σειρά παράλληλων ηλεκτρικών κυκλωμάτων από τα οποία τα πάνω κυκλώματα έχουν μικρότερη αυτεπαγωγή και τα κάτω κυκλώματα μεγαλύτερη (**Σχ.15γ**).



ΣΧΗΜΑ 15 Η ροή διαρροής σ' ένα δρομέα βαθιών εγκοπών. (α) Για το ρεύμα του δρομέα στην κορυφή της ράβδου η ροή διαρροής προς το στάτη είναι μικρή και η αυτεπαγωγή διαρροής είναι επίσης μικρή (β) Για το ρεύμα του δρομέα στο βάθος της ράβδου η ροή διαρροής προς το στάτη είναι μεγάλη και η αυτεπαγωγή διαρροής είναι επίσης μεγάλη (γ) Το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα της ράβδου συναρτησει του βάθους του δρομέα.

Όταν η ολίσθηση είναι χαμηλή, η συχνότητα στο δρομέα είναι μικρή και οι αντιδράσεις όλων των παράλληλων διαδρομών της ράβδου είναι μικρές σε σχέση με τις αντιστάσεις τους. Οι σύνθετες αντιστάσεις όλων των τμημάτων της ράβδου είναι σχεδόν ίσες μεταξύ τους κι έτσι το ρεύμα διαρρέει τη ράβδο ομοιόμορφα. Μ' αυτόν τον τρόπο η διατομή της ράβδου είναι μεγάλη με αποτέλεσμα η μικρή αντίσταση δρομέα να προσφέρει στον κινητήρα ικανοποιητική απόδοση στη λειτουργία με χαμηλή ολίσθηση. Στη λειτουργία με υψηλή ολίσθηση (στις συνθήκες εκκίνησης) οι αντιδράσεις είναι μεγάλες σε σχέση με τις αντιστάσεις της ράβδου κι έτσι όλο το ρεύμα αναγκάζεται να διαρρέει τα τμήματα της ράβδου που έχουν μικρή αντίδραση και βρίσκονται κοντά στο στάτη. Τώρα, επειδή η ενεργός διατομή των ράβδων είναι μικρότερη, η αντίσταση του δρομέα είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι στην προηγούμενη περίπτωση. Ο κινητήρας που παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση δρομέα κατά την εκκίνηση, έχει σχετικά μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης και σχετικά μικρότερο ρεύμα εκκίνησης απ' ό,τι ο κινητήρας κλάσης A. Μια τυπική χαρακτηριστική ροπή-ταχύτητας αυτού του είδους, που φαίνεται στο **Σχ.14**, παρουσιάζουν οι κινητήρες κλάσης B.

Η διατομή ενός διαφορετικού δρομέα διπλού κλωβού φαίνεται στο **Σχ.13γ**. Αυτός αποτελείται από ένα σύνολο ράβδων μεγάλης διατομής και μικρής αντίστασης που τοποθετούνται βαθιά στο δρομέα και από ένα άλλο σύνολο ράβδων μικρής διατομής και μεγάλης αντίστασης τοποθετημένο στην επιφάνεια του δρομέα. Η συγκεκριμένη σχεδίαση είναι παρόμοια μ' αυτή του δρομέα βαθιών εγκοπών, μόνο που η διαφορά μεταξύ των καταστάσεων χαμηλής και υψηλής ολίσθησης έχει γίνει εντονότερη. Κατά την εκκίνηση ενεργοποιούνται μόνο οι ράβδοι μικρής διατομής με αποτέλεσμα η αντίσταση του δρομέα να είναι αρκετά μεγάλη. Αυτή η μεγάλη αντίσταση προκαλεί ροπή εκκίνησης. Όμως στις ταχύτητες της κανονικής λειτουργίας και τα δύο σύνολα των ράβδων είναι ενεργοποιημένα με αποτέλεσμα η αντίσταση να είναι μικρή, όση σχεδόν η αντίσταση του δρομέα βαθιών εγκοπών. Οι δρομείς διπλού κλωβού αυτού του είδους χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των κινητήρων κλάσης B και C. Οι πιθανές χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας ενός τέτοιου δρομέα φαίνονται στο **Σχ.14** με τις χαρακτηριστικές κλάσης B και C.

Οι επαγωγικοί κινητήρες διπλού κλωβού έχουν το μειονέκτημα ότι είναι ακριβότεροι από τους άλλους κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, αλλά φυσικά είναι φθηνότεροι από τους κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα. Επίσης παρουσιάζουν μερικές από τις σημαντικότερες ιδιότητες των κινητήρων δακτυλιοφόρου δρομέα (μεγάλη ροπή και μικρό ρεύμα εκκίνησης από τη μια και ικανοποιητική απόδοση από την άλλη) με μικρότερο κόστος και χωρίς την απαίτηση συχνής συντήρησης δακτυλίων και ψηκτρών.

2.3.6 Έλεγχος Ταχύτητας στους Επαγωγικούς Κινητήρες

Μέχρι την εμφάνιση των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρονικής οδήγησης οι επαγωγικοί κινητήρες δεν αποτελούσαν γενικά καλή επιλογή για εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας. Το κανονικό εύρος λειτουργίας ενός τυπικού επαγωγικού κινητήρα (κλάσης A,B και O) περιορίζεται κάτω από 5% για την ολίσθηση, ενώ η μεταβολή της ταχύτητας πέρα απ' αυτό το εύρος είναι σχεδόν ανάλογη του φορτίου που εφαρμόζεται στον άξονα του κινητήρα. Ακόμη κι αν η ολίσθηση έπαιρνε τη μεγαλύτερη τιμή, η απόδοση του κινητήρα θα έπεφτε πολύ χαμηλά, αφού οι απώλειες χαλκού στο δρομέα είναι ανάλογες με την ολίσθηση.

Στην πραγματικότητα υπάρχουν δύο μόνο τεχνικές με τις οποίες είναι δυνατό να ρυθμιστεί η ταχύτητα των επαγωγικών κινητήρων. Στην πρώτη μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα, που είναι η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα, αφού η ταχύτητα του άξονα παραμένει πάντα κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα n_{sync} . Στην άλλη τεχνική μεταβάλλεται η ολίσθηση του κινητήρα για ένα δεδομένο φορτίο. Πιο κάτω οι δύο αυτές μέθοδοι παρουσιάζονται με πιο πολλές λεπτομέρειες.

Η σύγχρονη ταχύτητα του επαγωγικού κινητήρα δίνεται από τη σχέση:

$$N_{sync}=120f_e/p$$

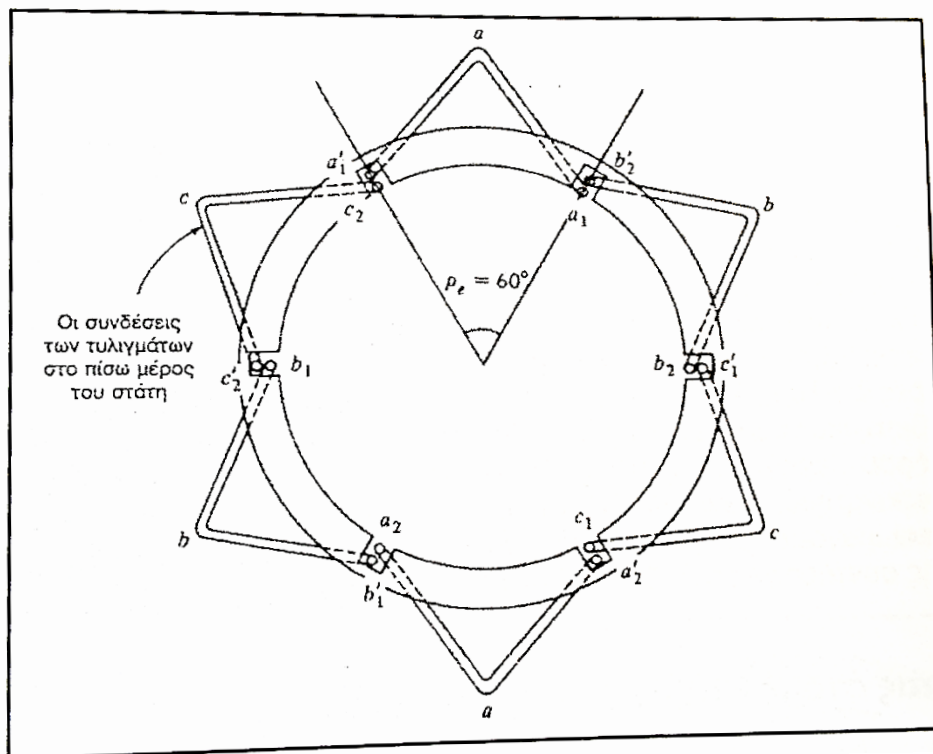
κι έτσι οι μόνοι τρόποι μεταβολής της σύγχρονης ταχύτητας είναι: **(1)** η ρύθμιση της ηλεκτρικής ισχύος και **(2)** η μεταβολή του αριθμού των πόλων της μηχανής. Ο έλεγχος της ολίσθησης πραγματοποιείται με μεταβολή της αντίστασης του δρομέα ή της τάσης εισόδου στον κινητήρα. Η καθεμία από αυτές τις τεχνικές περιγράφεται στα επόμενα.

2.3.7 Έλεγχος της Ταχύτητας Επαγωγικών Κινητήρων με Μεταβολή του Αριθμού των Πόλων

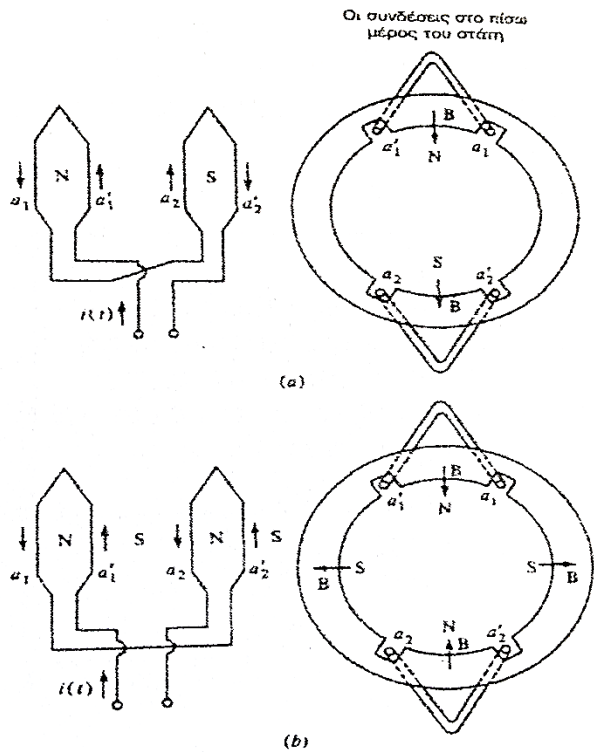
Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι αλλαγής του αριθμού των πόλων ενός επαγωγικού κινητήρα:

1. Η μέθοδος των διαδοχικών πόλων
2. Πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη
3. Διαμόρφωση πλάτους του πόλου (PAM)

Η μέθοδος των διαδοχικών πόλων (consequent poles) είναι μια παλιά μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας, που αρχικά αναπτύχθηκε το 1897. Στηρίζεται στο γεγονός ότι ο αριθμός πόλων του τυλίγματος στο στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα είναι εύκολο να μεταβληθεί μ' ένα παράγοντα 2 προς 1 με κάποιες απλές αλλαγές στις συνδέσεις των συστάδων. Το **Σχ.16** δείχνει έναν απλό στάτη επαγωγικού κινητήρα δύο πόλων, κατάλληλο για αλλαγή των πόλων. Ας σημειωθεί ότι οι ξεχωριστές συστάδες παρουσιάζουν πολύ μικρό βήμα (60° ως 90°). Στο **Σχ.17** φαίνεται η φάση α του τυλίγματος για να δοθεί περισσότερη έμφαση σε κάποιες λεπτομέρειες.



ΣΧΗΜΑ 16 Το τύλιγμα ενός στάτη δύο πόλων που πρόκειται να υποστεί αλλαγή του αριθμού των πόλων. Ας σημειωθεί το μικρό βήμα δρομέα των τυλιγμάτων.



ΣΧΗΜΑ 17

Η μια φάση ενός τυλίγματος στο οποίο θα γίνει αλλαγή των πόλων, (α) Στη δομή με δύο πόλους η μία συστάδα υλοποιεί τον ένα πόλο και η άλλη τον δεύτερο πόλο. (β) Όταν αντιστρέφεται η σύνδεση της μιας συστάδας, οι δύο συστάδες υλοποιούν βόρειους πόλους και η μαγνητική ροή επιστρέφει στο στάτη από τα σημεία που βρίσκονται ανάμεσα στις συστάδες. Οι νότιοι πόλοι ονομάζονται διαδοχικοί πόλοι και το τυλίγμα είναι πια τυλίγμα τεσσάρων πόλων.

Το **Σχ.17α** δείχνει τα ρεύματα στη φάση α του τυλίγματος και σε κάποια χρονική στιγμή της κανονικής λειτουργίας. Ας σημειωθεί οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου εξέρχονται από το στάτη στην επάνω ομάδα φάσης (βόρειος πόλος) και εισέρχονται στο στάτη στην κάτω ομάδα φάσης (νότιος πόλος). Έτσι αυτό το τυλίγμα παράγει δύο πόλους στο στάτη.

Ας υποθεθεί τώρα ότι η κατεύθυνση του ρεύματος στην κάτω ομάδα φάσης του στάτη αντιστρέφεται (**Σχ. 17β**). Τότε οι γραμμές του πεδίου θα εξέρχονται από το στάτη και στην επάνω και στην κάτω ομάδα φάσης – κάθε ομάδα παράγει ένα βόρειο μαγνητικό πόλο. Η μαγνητική ροή θα πρέπει να επιστρέφει στο στάτη της μηχανής ανάμεσα από τις δύο ομάδες φάσης δημιουργώντας ένα ζεύγος διαδοχικών νότιων μαγνητικών πόλων. Εδώ φαίνεται ότι ο στάτης διαθέτει πια τέσσερις μαγνητικούς πόλους – διπλάσιο αριθμό από πριν. Ο δρομέας ενός τέτοιου κινητήρα είναι βραχυκυκλωμένου κλωβού, επειδή σ' αυτό το δρομέα επάγονται πάντα τόσοι πόλοι, όσοι ακριβώς εμφανίζονται στο στάτη κι έτσι μπορεί να προσαρμόζεται κάθε φορά που ο αριθμός των πόλων μεταβάλλεται.

Όταν η συνδεσμολογία του κινητήρα μεταβάλλεται και οι πόλοι του από δύο γίνονται τέσσερις, η μέγιστη ροπή του μπορεί να παραμείνει η ίδια (συνδεσμολογία σταθερής ροπής), να μειωθεί στο μισό (συνδεσμολογία ροπής με το νόμο του τετραγώνου) ή να διπλασιαστεί (συνδεσμολογία σταθερής ισχύος εξόδου), ανάλογα με τον τρόπο που αναδιοργανώνονται τα τυλίγματα του στάτη.

Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου μεταβολής της ταχύτητας με δύο διαδοχικούς πόλους είναι ότι οι ταχύτητες θα πρέπει να έχουν λόγο 2 προς 1. Ο παραδοσιακός τρόπος υπέρβασης αυτού του περιορισμού είναι η εισαγωγή πολλαπλών τυλιγμάτων στο στάτη (multiple stator windings) με διαφορετικό αριθμό πόλων το καθένα και η ενεργοποίηση ενός από αυτά κάθε φορά. Για παράδειγμα ένας κινητήρας μπορεί να διαθέτει δύο ομάδες τυλιγμάτων στο στάτη με δύο και έξι πόλους η κάθε μια. Έτσι η σύγχρονη ταχύτητά του σ' ένα σύστημα ισχύος των 60HZ μπορεί να μεταβάλλεται από τις 1200 rpm ως τις 1800 rpm με την απλή σύνδεση μιας ή της άλλης ομάδας τυλιγμάτων. Δυστυχώς τα πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη αυξάνουν το κόστος του κινητήρα και χρησιμοποιούνται μόνο όταν είναι τελείως απαραίτητα.

Με το συνδυασμό της μεθόδου των διαδοχικών πόλων και της μεθόδου των πολλαπλών τυλιγμάτων είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένας κινητήρας τεσσάρων ταχυτήτων. Για παράδειγμα

με δύο ξεχωριστά τυλίγματα τεσσάρων και έξι πόλων είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένας επαγωγικός κινητήρας που λειτουργώντας στα 60Hz να περιστρέφεται με ταχύτητες 600, 900, 1200 και 1800 rpm.

Το 1957 αναπτύχθηκε μια καινούρια τεχνική μεταβολής του αριθμού των πόλων από τον G.H.Rawcliffe του πανεπιστημίου του Bristol της Αγγλίας. Αυτή η νέα μέθοδος ονομάστηκε διαμόρφωση πλάτους του πόλου (pole amplitude modulation - PAM). Η μέθοδος PAM είναι ένας τρόπος παραγωγής πολλαπλών πόλων με το ίδιο τυλίγμα του στάτη, όπου επιτυγχάνονται αριθμοί πόλων με διαφορετικό λόγο από 2 προς 1. Στο **Σχ.18** φαίνονται οι τυπικοί λόγοι των πόλων που επιτυγχάνονται με τη μέθοδο PAM. Η αλλαγή του αριθμού των πόλων ενός τυλίγματος γίνεται απλά με τη μεταβολή των συνδέσεων σε έξι άκρα με τον ίδιο τρόπο που αυτή γίνεται και στη μέθοδο των διαδοχικών πόλων. Για την κατασκευή ενός κινητήρα που να λειτουργεί σε δύο ταχύτητες κοντινές μεταξύ τους προτιμάται πάντα η διαμόρφωση πλάτους του πόλου από τη μέθοδο των πολλαπλών τυλιγμάτων, επειδή έχει κόστος ίσο με τα τρία τέταρτα του κόστους των δύο ξεχωριστών τυλιγμάτων.

Pole ratio	Synchronous speeds, r/min	
	At 50 Hz	At 60 Hz
2 : 8	3000/750	3600/900
4 : 6	1500/1000	1800/1200
4 : 10	1500/600	1800/720
6 : 8	1000/750	1200/900
6 : 10	1000/600	1200/720
8 : 10	750/600	900/720
8 : 12	750/500	900/600
10 : 12	600/500	720/600

ΣΧΗΜΑ 18

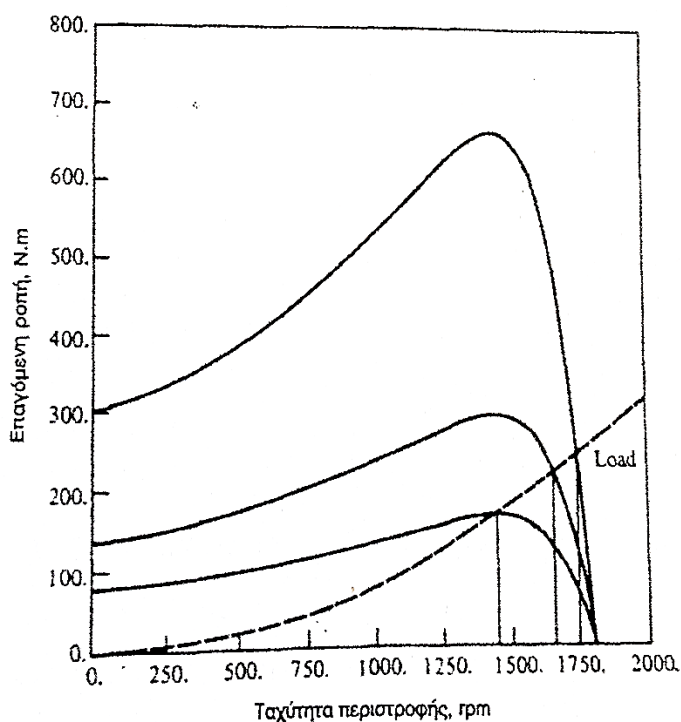
Οι τυπικοί λόγοι αριθμού των πόλων που πραγματοποιούνται με τη διαμόρφωση πλάτους του πόλου και οι αντίστοιχοι λόγοι σύγχρονων ταχυτήτων.

2.3.8 Έλεγχος της Ταχύτητας με Μεταβολή της Συχνότητας του Δικτύου

Αν η συχνότητα που εφαρμόζεται στο στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα μεταβληθεί, ο ρυθμός περιστροφής των μαγνητικών του πεδίων n_{sync} μεταβάλλεται ανάλογα με τη μεταβολή της ηλεκτρικής συχνότητας ενώ το σημείο λειτουργίας χωρίς φορτίο στην καμπύλη ροπής ταχύτητας μεταβάλλεται επίσης. Η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα στις ονομαστικές συνθήκες είναι γνωστή ως βασική ταχύτητα (base speed). Με τον έλεγχο μεταβλητής συχνότητας η ταχύτητα του κινητήρα είναι δυνατό να ρυθμίζεται πάνω και κάτω από τη βασική ταχύτητα. Μια προσεκτικά σχεδιασμένη συσκευή οδήγησης επαγωγικού κινητήρα με μεταβλητή συχνότητα μπορεί να είναι ιδιαίτερα ευέλικτη. Η ρύθμιση της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα μπορεί να ξεκινά από ένα εύρος τιμών, 5% της βασικής ταχύτητας και να φθάνει σε τιμές διπλάσιες της βασικής. Όμως είναι σημαντικό να καθοριστούν κάποια όρια για την τάση και τη ροπή του κινητήρα κατά τη μεταβολή της ταχύτητάς του, ώστε η λειτουργία του να είναι ασφαλής. Όταν ο κινητήρας περιστρέφεται με ταχύτητες μικρότερες της βασικής, θα πρέπει η τάση που εφαρμόζεται στο στάτη του κινητήρα να περιορίζεται με σκοπό να είναι ασφαλής η λειτουργία του. Η τάση εισόδου στο στάτη θα πρέπει να μειώνεται γραμμικά με τη μείωση της συχνότητας. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται υποβιβασμός (derating) της τάσης. Αν δεν ακολουθείται αυτή η διαδικασία, ο χάλυβας του στάτη οδηγείται σε κορεσμό και το ρεύμα μαγνήτισης του κινητήρα μπορεί να πάρει εξαιρετικά μεγάλες τιμές.

2.3.9 Έλεγχος της Ταχύτητας με Μεταβολή της Τάσης Τροφοδοσίας

Η ροπή που αναπτύσσει ένας επαγωγικός κινητήρας εξαρτάται από το τετράγωνο της εφαρμοζόμενης τάσης. Αν το φορτίο του κινητήρα διαθέτει χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας όμοια με αυτή του **ΣΧ.19**, η ταχύτητα του είναι δυνατό να ρυθμίζεται σ' ένα περιορισμένο εύρος τιμών με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας. Αυτή η μέθοδος ελέγχου χρησιμοποιείται συνήθως στους μικρούς κινητήρες που κινούν ανεμιστήρες.

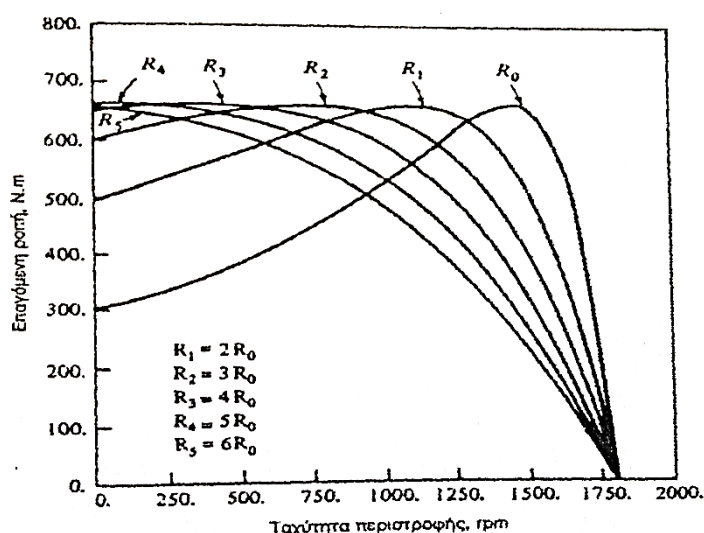


ΣΧΗΜΑ 19

Ρύθμιση της ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα με έλεγχο της τάσης εισόδου.

2.3.10 Έλεγχος της Ταχύτητας με Μεταβολή της Αντίστασης Δρομέα

Στους επαγωγικούς κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα είναι δυνατή η μεταβολή της μορφής της χαρακτηριστικής ροπής - ταχύτητας με την εισαγωγή πρόσθετων αντιστάσεων στο κύκλωμα δρομέα της μηχανής. Οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας που παράγονται φαίνονται στο **Σχ. 20**. Αν η χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας του φορτίου είναι όμοια με αυτή του σχήματος, τότε η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα μεταβάλλει την ταχύτητα της λειτουργίας του κινητήρα. Όμως η εισαγωγή πρόσθετων αντιστάσεων στο κύκλωμα δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα μειώνει σημαντικά την απόδοση της μηχανής. Έτσι μια τέτοια μέθοδος μεταβολής της ταχύτητας χρησιμοποιείται μόνο για σύντομες περιόδους λόγω των προβλημάτων απόδοσης που δημιουργεί.



ΣΧΗΜΑ 20

Ρύθμιση της ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα με μεταβολή της αντίστασης του δρομέα.

2.4 Προστασία του Κινητήρα

Η συσκευή οδήγησης του επαγωγικού κινητήρα περιλαμβάνει ποικίλες ιδιότητες που έχουν σκοπό την προστασία του κινητήρα που συνδέεται στη συσκευή οδήγησης. Η συσκευή μπορεί να ανιχνεύσει ισχυρά μόνιμα ρεύματα (περίπτωση υπερφόρτισης), ισχυρά στιγμιαία ρεύματα, καταστάσεις υπερτάσεων και καταστάσεις μειωμένης τάσης. Σε κάθε μία από τις προηγούμενες περιπτώσεις η συσκευή οδήγησης διακόπτει τη λειτουργία του κινητήρα.

Συσκευές οδήγησης επαγωγικών κινητήρων όπως οι προηγούμενες είναι τόσο ευέλικτες και αξιόπιστες στις μέρες μας που οι επαγωγικοί κινητήρες σε πολλές εφαρμογές όπου απαιτούνται μεγάλοι εύρους μεταβολές της ταχύτητας, άρχισαν να αντικαθιστούν του κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

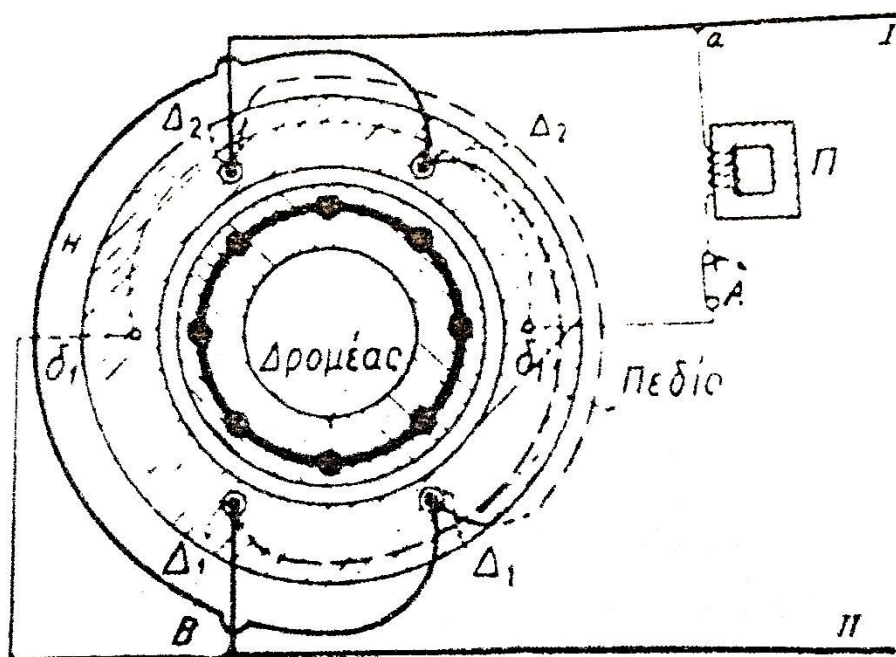
3. ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΙ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

3.1 Πως Λειτουργούν οι Μονοφασικοί Επαγωγικοί Κινητήρες

Αν κόψουμε τη μία φάση ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα κατά τη λειτουργία του, παρουσιάζεται το αξιοσημείωτο φαινόμενο ο κινητήρας να εξακολουθεί να εργάζεται. Σ' αυτή την περίπτωση ο κινητήρας μας παρέχει φυσικά λιγότερη ισχύ. Απ' αυτό το φαινόμενο όμως βγάζουμε το συμπέρασμα ότι αν θέλουμε να πάρουμε κίνηση από ένα εναλλασσόμενο ρεύμα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μονοφασικούς ασύγχρονους κινητήρες όμοιους με τους πολυφασικούς. Αυτοί όμως οι μονοφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες δεν μπορούν να ξεκινήσουν μόνοι τους γιατί με ένα μονοφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα μπορούμε να πετύχουμε στρεφόμενο πεδίο, αλλά μονάχα εναλλασσόμενο πεδίο. Οι κινητήρες λοιπόν αυτοί χρησιμοποιούν για την εκκίνησή τους, που πρέπει να γίνεται πάντοτε δίχως φορτίο, ένα βοηθητικό τύλιγμα που ξεσυνδέεται από το κύκλωμα όταν ο κινητήρας ξεκινήσει.

Ο δρομέας ενός ασύγχρονου μονοφασικού κινητήρα κατασκευάζεται όπως και οι δρομείς των τριφασικών κινητήρων. Μπορεί επομένως να κατασκευαστεί σαν δρομέας με κλωβό ή σαν δρομέας με τρία τυλίγματα, με δακτυλίους και εκκινήτη. Η λειτουργία του ασύγχρονου μονοφασικού κινητήρα εξηγείται στο **Σχ.1**. Σ' αυτό βλέπουμε ότι ο στάτης του κινητήρα αποτελείται από δύο τυλίγματα. Το σχεδιασμένο με παχιά γραμμή είναι το κύριο τύλιγμα. Το άλλο με λεπτή είναι το βοηθητικό.

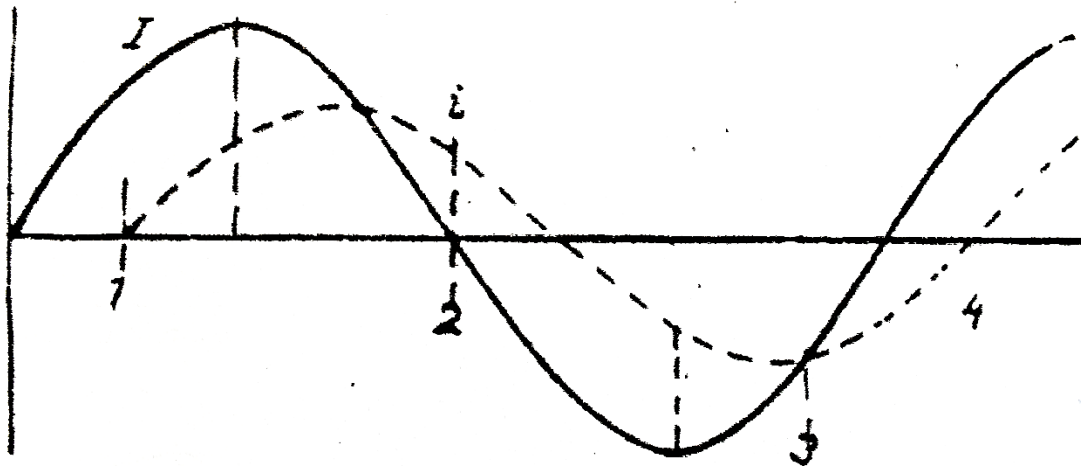
Το βοηθητικό τύλιγμα σχηματίζει με το κύριο μια ηλεκτρική γωνία 90° και είναι καμωμένο από λεπτό σύρμα. Γι' αυτό πρέπει να συνδέεται μονάχα κατά το βραχύ χρονικό διάστημα της εκκίνησης του κινητήρα κι αμέσως να αποσυνδέεται, αν δε θέλουμε να καεί. Στη σειρά με το βοηθητικό τύλιγμα συνδέουμε ένα πηνίο Π. Έτσι αυξάνουμε την αυτεπαγωγή του βοηθητικού τυλίγματος και προκαλούμε βραδυπορία του ρεύματος, που διαρρέει το τύλιγμα, σχετικά με την τροφοδοτική τάση και με το ρεύμα του κύριου τυλίγματος. Στο **Σχ.2** φαίνονται τα δύο ρεύματα και ο μεταξύ τους μεταχρονισμός. Η καμπύλη I παριστάνει κύριο ρεύμα και η καμπύλη i το βοηθητικό.



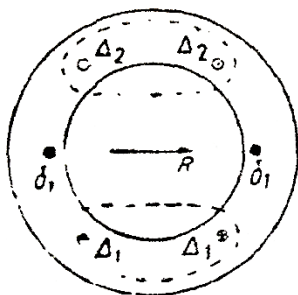
ΣΧΗΜΑ 1

Με τα δύο αυτά ρεύματα δημιουργείται ένα στρεφόμενο πεδίο που βάζει μπρος τον κινητήρα. Με τη βοήθεια των σχημάτων 2 έως 5 θα εξηγήσουμε πως γεννιέται αυτό το στρεφόμενο πεδίο.

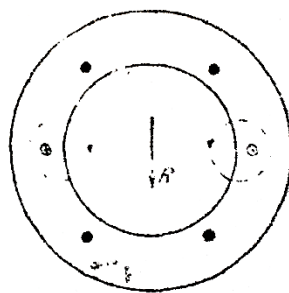
Κατά τη χρονική στιγμή, που αντιστοιχεί στο 1 του **Σχ.2**, το ρεύμα i στο βοηθητικό τύλιγμα είναι μηδέν. Λειτουργεί επομένως μονάχα το κύριο τύλιγμα με τους αγωγούς $\Delta_1, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_2$ και το πεδίο έχει τη φορά K , όπως φαίνεται στο **Σχ.3**. Κατά τη χρονική στιγμή 2 το ρεύμα I στο κύριο τύλιγμα είναι μηδέν. Επιδρά λοιπόν μονάχα το βοηθητικό τύλιγμα. Το ρεύμα όμως στον αγωγό δ_1 , επειδή αυτός συνδεόταν με τον αγωγό Δ , όπως δείχνει το **Σχ.1**, πρέπει να κατευθύνεται όπως κατευθυνόταν πριν στον αγωγό Δ_1 το ρεύμα I , γιατί στη χρονική στιγμή 1 (**Σχ.2**) το ρεύμα I ήταν θετικό και τη χρονική στιγμή 2 το i έχει ακριβώς την ίδια επίσης φορά. Το πεδίο λοιπόν έχει τη φορά R , όπως φαίνεται στο **Σχ.4**. Η ένταση όμως αυτού του πεδίου είναι μικρότερη από την ένταση του πεδίου κατά τη χρονική στιγμή 1, γιατί το βοηθητικό τύλιγμα έχει λιγότερες σπείρες. Η ένταση επομένως του πεδίου δεν κρατιέται σταθερή, όπως στην περίπτωση του στρεφόμενου πεδίου που γεννιέται απ' το τριφασικό ρεύμα, αλλά παρουσιάζει διακυμάνσεις. Το πεδίο δεν είναι «κυκλικό», αλλά «ελλειπτικό». Κατά τη χρονική στιγμή 3 (**Σχ.2**) τα ρεύματα I και i έχουν την ίδια φορά και την ίδια τιμή. Παίρνουμε λοιπόν από αυτά το συνιστάμενο πεδίο K του **Σχ.5**. Κατά τη χρονική στιγμή 4 ξαναπαρουσιάζονται τα όσα είπαμε για τη στιγμή 1.



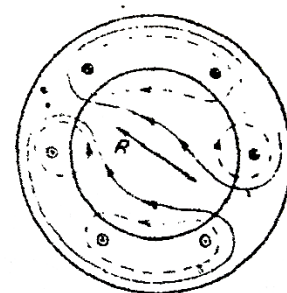
Σχήμα 2



Σχ.3



Σχ.4



Σχ.5

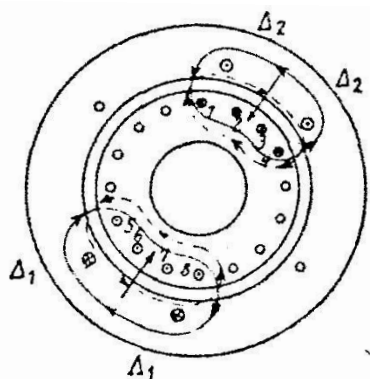
Στο **Σχ.2** τα σημεία 1,2,3 διαφέρουν μεταξύ τους κατά ίσα χρονικά διαστήματα. Εξετάζοντας όμως τα σχήματα **3-5**, διαπιστώνουμε ότι το πεδίο R, όταν έρχεται από τη θέση που έχει στο **Σχ.3**, στη θέση του **Σχ. 4**, περιστρέφεται ταχύτερα απ' όσο περιστρέφεται όταν πάει από τη θέση που έχει στο **Σχ.4** στη θέση του **Σχ.5**.

Η περιστροφή του γίνεται ακόμη ταχύτερη όταν πάει από τη θέση που έχει στο **Σχ.5** στη θέση που αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή 4 του **Σχ.2**, που είναι ίδια με τη θέση που παίρνει κατά τη στιγμή 1. Από αυτήν τη διαπίστωση συνάγουμε ότι το στρεφόμενο αυτό πεδίο δεν αλλάζει μονάχα την ένταση του, αλλά και την ταχύτητά του κατά τη διάρκεια μιας στροφής. Επομένως ο ασύγχρονος μονοφασικός κινητήρας μπορεί να ξεκινήσει μονάχα με πολύ μικρό φορτίο ή καλύτερα με δίχως φορτίο, γιατί η επίδραση του κυμαινόμενου και ακανόνιστα στρεφόμενου πεδίου, που γεννιέται με τη συνδρομή του βοηθητικού τυλίγματος, είναι πολύ ασθενέστερη από την επίδραση του ομοιόμορφου και τελείως ομαλά στρεφόμενου πεδίου των τριφασικών κινητήρων.

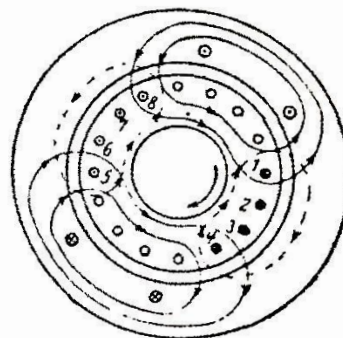
Από τα **Σχ.3 – 4** καταλαβαίνουμε εύκολα ότι η φορά περιστροφής του στρεφόμενου πεδίου αναστρέφεται αν το ρεύμα αναστραφεί στους αγωγούς δ1 (**Σχ.1**) του βοηθητικού τυλίγματος. Η αναστροφή μπορεί να γίνει αν συνδέσουμε τον αγωγό δ1, με το σημείο α, αντί με το Β και τον αγωγό α με τον αγωγό ΙΙ της γραμμής, αντί με τον Ι. Τότε το στρεφόμενο πεδίο αναστρέφεται και ο δρομέας του κινητήρα γυρνά φυσικά ανάποδα, γιατί η περιστροφή του δρομέα εξαρτάται και σ' αυτήν την περίπτωση από την επίδραση του στρεφόμενου πεδίου επάνω στο πεδίο που γεννιέται από το ρεύμα του δρομέα.

Όταν ο δρομέας αρχίσει να περιστρέφεται και η ταχύτητα του φτάσει ορισμένη τιμή, μπορούμε να ξεσυνδέσουμε το βοηθητικό τύλιγμα. Η αποσύνδεση του βοηθητικού τυλίγματος γίνεται με το διακόπτη Α (**Σχ.1**). Ο δρομέας τότε εξακολουθεί να περιστρέφεται και μπορεί φυσικά και να φορτωθεί, όχι όμως και να υπερφορτωθεί. Αυτοί οι κινητήρες λοιπόν δεν κάνουν για τη λειτουργία ανυψωτικών μηχανημάτων και οχημάτων. Σε τέτοιες περιπτώσεις μεταχειριζόμαστε τους κινητήρες με συλλέκτη.

Μας απομένει τώρα να δούμε πώς ο δρομέας, αφού ξεκινήσει με το βοηθητικό τύλιγμα, εξακολουθεί έπειτα να περιστρέφεται μονάχα με την επίδραση του κύριου τυλίγματος του στάτη. Σ' αυτή την εξέταση θα μας βοηθήσουν τα σχήματα **6** και **7**. Το **Σχ.7** μας δείχνει πώς παρουσιάζεται το εναλλασσόμενο πεδίο. Το πεδίο δημιουργείται από τους αγωγούς Δ2,Δ2 και Δ1,Δ1 και οι δυναμικές του γραμμές σχεδιασμένες στο σχήμα με ολόκληρη γραμμή, κόβουν τους αγωγούς 1,2,3,4 και 5,6,7,8 του δρομέα κατά την κατεύθυνση των βελών, δηλαδή προς το κέντρο του δρομέα. Αν ο δρομέας ήταν σταματημένος, το πεδίο που γεννούν τα επαγόμενα σε αυτόν ρεύματα, σχεδιασμένο με γραμμούλες στο **Σχ.6**, θα είχε κατεύθυνση ακριβώς αντίθετη από την κατεύθυνση του κύριου πεδίου. Το πεδίο, όμως, χρειάζεται για να δημιουργηθεί χρόνο. Το ίδιο γίνεται και με το ρεύμα στο δρομέα. Και αυτό χρειάζεται χρόνο για να γεννηθεί. Αν λοιπόν στο **Σχ.6** ο δρομέας περιστρέφεται τόσο γρήγορα, ώστε οι αγωγοί του 1,2,3 και 4 να προφταίνουν να βρεθούν στη θέση που δείχνει το **Σχ.7**, ενώ ακόμη διαρρέονται από ρεύμα και αν το πεδίο βρίσκεται σε όλη του την ένταση, όπως σχεδιάστηκε, τότε παρουσιάζεται η μετατόπιση του πεδίου κι ο δρομέας περιστρέφεται.



Σχ.6



Σχ.7

Αν περιστραφεί ο δρομέας πέρα από τη θέση που έχει στο **Σχ.7**, το πεδίο εξαφανίζεται πάλι. Τότε οι αγωγοί 1,2,3,4 φτάνοντας στη θέση που κατέχουν στο **Σχ.6** οι αγωγοί 5,6,7,8 διαρρέονται πάλι από το ίδιο ρεύμα όπως και πριν και η περιστροφή του δρομέα εξακολουθεί κατά την ίδια φορά. Το πεδίο εξαφανίζεται και ξαναπαρουσιάζεται αντίθετο γιατί τώρα αναστράφηκε το ρεύμα στους αγωγούς Δ1, Δ1 και Δ2,Δ2. Στο μεταξύ όμως οι αγωγοί 1,2,3,4 έρχονται προς τη θέση που είχαν οι αγωγοί 5,6,7,8 στα **Σχ.6** και παίρνουν κι αυτοί από το αντίθετο πεδίο αντίθετο ρεύμα, που εξακολουθεί να τους διαρρέει κι όταν φτάσουν στη θέση που αναφέραμε. Επειδή όμως και το πεδίο τώρα έχει αντίθετη φορά, η φορά της ώθησης που δίνεται στο δρομέα είναι ίδια όπως και πριν κι έτσι εξακολουθεί αυτός να περιστρέφεται με την επίδραση του απλού εναλλασσόμενου πεδίου.

Από τα πιο πάνω καταλαβαίνουμε επίσης ότι στο δρομέα επάνω επιδρά η μεγαλύτερη δύναμη μόνον όταν η μετατόπιση του πεδίου, που προκαλεί την περιστροφή του δρομέα, παρουσιάζεται μ' όλη της τη δύναμη. Αυτό γίνεται όταν ο δρομέας γυρνά τόσο γρήγορά, ώστε οι αγωγοί 1,2,3 και 4 να φτάνουν στη θέση που δείχνει το **Σχ.7**, όταν το κύριο πεδίο παίρνει τη μέγιστη τιμή του.

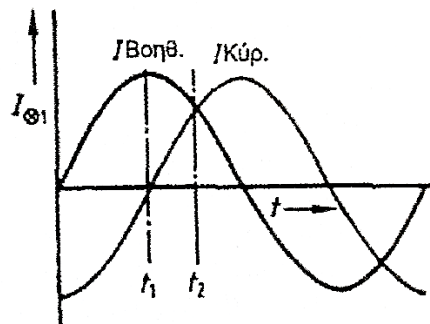
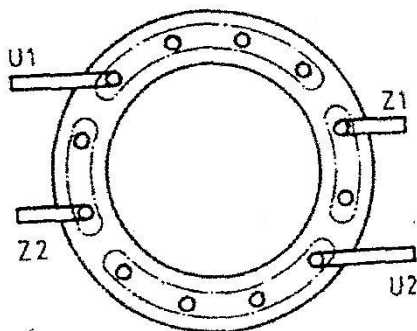
Κατά το χρονικό λοιπόν διάστημα που χρειάζεται το ρεύμα του στάτη για να φτάσει από τη μηδενική στη μέγιστη τιμή του, πρέπει και ο δρομέας του διπολικού κινητήρα των **Σχ.1, 6** να κάνει ένα τέταρτο στροφής. Επομένως, σ' ένα διπολικό κινητήρα πρέπει ο δρομέας για να μας δώσει τη μέγιστη ισχύ, να κάνει σε δύο εναλλαγές (μια περίοδο) του ρεύματος του στάτη, μίαν ολόκληρη στροφή. Αλλά και αργότερα κάπως να περιστρέφεται αυτός και τόσο που οι αγωγοί του μόλις να πλησιάζουν στις θέσεις που προαναφέραμε, όταν το κύριο πεδίο έχει τη μέγιστη έντασή του, εξασκείται πάλι στους αγωγούς του μια δύναμη. Ωστόσο η ταχύτητα του δρομέα δεν επιτρέπεται να πέσει κάτω από ορισμένα όρια, γιατί αλλιώς ο κινητήρας σταματά.

Οι στροφές λοιπόν του ασύγχρονου μονοφασικού κινητήρα εξαρτώνται, όπως και στον ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα, από τη συχνότητα του τροφοδοτικού ρεύματος. Δηλαδή σε μια περίοδο του ρεύματος αυτού θα κάνει αν είναι διπολικός μια στροφή. Αν είναι τετραπολικός μισή στροφή κ.ο.κ.

3.2 Μονοφασικοί Επαγωγικοί Κινητήρες

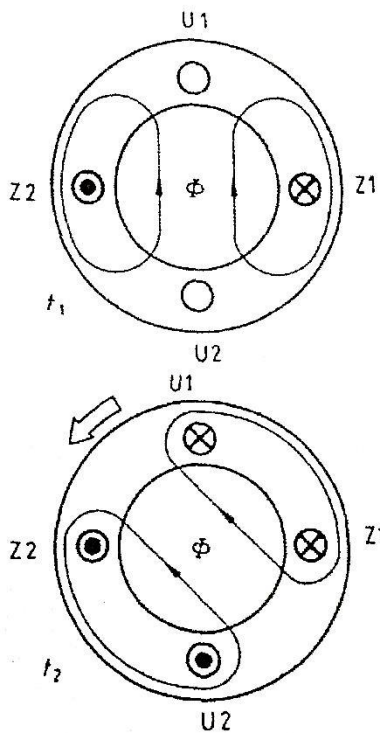
Οι κινητήρες αυτοί έχουν ένα στάτη στον πυρήνα του οποίου τοποθετούνται δύο τυλίγματα. Ως δρομέας χρησιμοποιείται η μορφή κλωβού. Το κύριο τύλιγμα τοποθετείται στα 2/3 των αυλακιών του στατη και έχει τις ονομασίες επαφών U_1, U_2 . Το βοηθητικό τύλιγμα τοποθετείται στο 1/3 των αυλακιών και έχει μετατόπιση στο χώρο κατά 90° (Σχ.8). Προϋπόθεση για τη δημιουργία του στρεφόμενου πεδίου στον στάτη είναι η χρονική μετατόπιση του ρεύματος στο βοηθητικό τύλιγμα σε σχέση με το ρεύμα που διαρρέει το κύριο τύλιγμα (Σχ.9). Τα εναλλασσόμενα πεδία που δημιουργούνται στο κύριο και στο βοηθητικό τύλιγμα, είναι τότε μεταξύ τους χωροχρονικά μετατοπισμένα και σχηματίζουν ένα κοινό στερφεμένο πεδίο (Σχ.10). Το στρεφόμενο πεδίο προκαλεί την εκκίνηση χωρίς βοηθητικά μέσα (αυτοεκκίνηση).

Οι μονοφασικοί επαγωγικοί κινητήρες εκκινούν από μόνοι τους. Ο αριθμός των στροφών του στρεφόμενου πεδίου προκύπτει όπως και στους τριφασικούς κινητήρες από τον αριθμό των πόλων και από τη συχνότητα του δικτύου. Το Σχ.10 δείχνει το σχηματισμό του στρεφόμενου πεδίου στις στιγμές 1 και 2 σε ρεύμα του τυλίγματος όπως στο Σχ.9. Η μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων του κύριου και του βοηθητικού τυλίγματος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός πυκνωτή, μιας ωμικής αντίστασης ή μιας αυξημένης επαγωγής βοηθητικού τυλίγματος. Τα στρεφόμενα πεδία που δημιουργούνται, έχουν ελλειπτική μορφή (Σχ.12.8). Όταν μια χωρητικότητα, μια πραγματική αντίσταση ή μια επαγωγή παρεμβάλλεται στο βοηθητικό τύλιγμα ενός μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα, τότε δημιουργείται στρεφόμενο πεδίο. Οι μονοφασικοί κινητήρες με επαγωγές χρησιμοποιούνται σπάνια λόγω της χαμηλής ροπής εκκίνησης.



Σχ.8: Τυλίγματα σε μονοφασικούς κινητήρες επαγωγής
 U_1-U_2 : Κύριο τύλιγμα
 Z_1-Z_2 : Βοηθητικό τύλ.

Σχ.9: Μετατόπιση φάσης των ρευμάτων στο κύριο και βοηθητικό τύλιγμα



Σχήμα 10 Στρεφόμενο πεδίο του στάτη στις στιγμές t

3.2.1 Μονοφασικός Κινητήρας με Βοηθητικό Τύλιγμα Αντίστασης

Η δημιουργία του στρεφόμενου πεδίου επιτυγχάνεται αν στο βοηθητικό τύλιγμα παρεμβληθεί μια ωμική αντίσταση. Η τιμή της ωμικής αντίστασης επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση σύρματος αντίστασης. Το βοηθητικό τύλιγμα συνήθως κατασκευάζεται ως **δίμιτο τύλιγμα**. Κατά την κατασκευή αυτού το 1/3 του αριθμού των σπειρών τυλίγεται αντίρροπα. Στο δίμιτο βοηθητικό τύλιγμα το επαγωγικό αποτέλεσμα αναιρείται μερικώς ενώ η πραγματική αντίσταση διατηρείται.

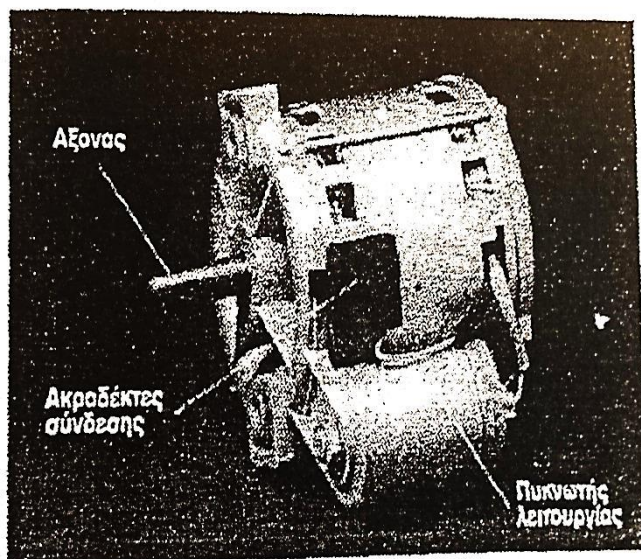
Το βοηθητικό τύλιγμα αντίστασης πρέπει μετά από την εκκίνηση του κινητήρα να αποσυνδέεται για να αποφεύγεται η θερμική υπερφόρτισή του. Αυτό γίνεται πχ με τη χρησιμοποίηση ενός φυγοκεντρικού διακόπτη. Ο κινητήρας μετά από την αποσύνδεση αυτή λειτουργεί όπως ο στροφαλοφόρος κινητήρας. Ο κινητήρας με βοηθητικό τύλιγμα αντίστασης κατασκευάζεται για ονομαστική ισχύ μέχρι 300W. Η ροπή εκκίνησης είναι περίπου ίση με την ονομαστική ροπή. Οι κινητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε χαμηλή συχνότητα ζεύξης/ απόζευξης, π.χ. σε συμπιεστές ψυγείων και σε κινητήρες για καυστήρες.

3.2.2 Κινητήρες με πυκνωτές

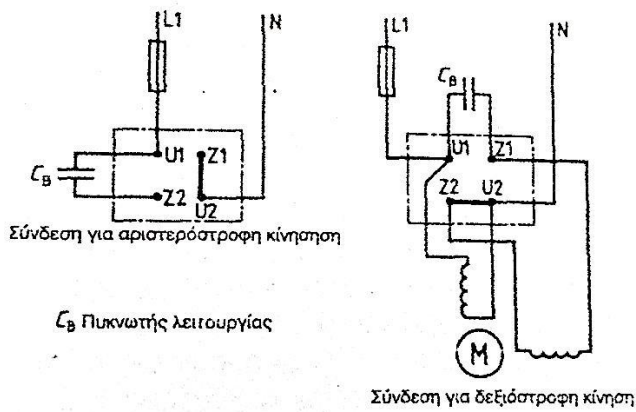
Στον κινητήρα με πυκνωτές η απαραίτητη μετατόπιση φάσης για τη δημιουργία του στρεφόμενου πεδίου μεταξύ των ρευμάτων του κύριου και του βοηθητικού τυλίγματος επιτυγχάνεται με τη σύνδεση ενός πυκνωτή σε σειρά στο βοηθητικό τύλιγμα. Ο πυκνωτής εφαρμόζεται συνήθως στο περίβλημα του κινητήρα (Σχ.11). Όταν το βοηθητικό τύλιγμα είναι αδιαίρετο, τότε ο πυκνωτής παρεμβάλλεται μπροστά στο βοηθητικό τύλιγμα (Σχ.12). Σε διαιρεμένο βοηθητικό τύλιγμα παρεμβάλλεται μεταξύ δύο τμημάτων. Η μεταβολή της φοράς περιστροφής του κινητήρα αυτού πραγματοποιείται αν το ρεύμα στο βοηθητικό κύκλωμα αλλάξει πολικότητα. Αυτό γίνεται με αλλαγή των συνδέσεων του πυκνωτή στο κιβώτιο των ακροδεκτών του κινητήρα.

Ο κινητήρας με τη χρησιμοποίηση ενός πυκνωτή εκκίνησης C_A και ενός πυκνωτή λειτουργίας C_B αναπτύσσει μια υψηλή ροπή κατά τη στιγμή εκκίνησής του (Σχ.13). Η ροπή εκκίνησης μπορεί μέσω της χωρητικότητας των δύο πυκνωτών να αυξηθεί δύο μέχρι τρεις φορές της ονομαστικής ροπής (Σχ.11). Ο κινητήρας αυτός έχει τη δυνατότητα να εκκινηθεί και με φορτίο. Με την επίτευξη της κανονικής λειτουργίας η χωρητικότητα εκκίνησης αποσυνδέεται ώστε να παραμένει μόνο χωρητικότητα λειτουργίας στο κύκλωμα. Η αποσύνδεση είναι απαραίτητη, επειδή η υψηλή ολική χωρητικότητα των πυκνωτών (εκκίνησης και λειτουργίας) προκαλεί στο βοηθητικό τύλιγμα υψηλό ρεύμα. Αυτό σημαίνει υπερθέρμανση του κινητήρα κατά τη μόνιμη λειτουργία. Η αποσύνδεση γίνεται με θερμικούς ηλεκτρονόμους ή με ηλεκτρονόμους που η λειτουργία του εξαρτάται από την τιμή του ρεύματος ή όπως στο Σχ.13 με φυγοκεντρικούς διακόπτες. Με την αποσύνδεση της ολικής χωρητικότητας η συμπεριφορά λειτουργίας αντιστοιχεί σ' αυτήν ενός στροφαλοφόρου κινητήρα.

Οι πυκνωτές εκκίνησης αποσυνδέονται μόλις ο κινητήρας αποκτήσει την κανονική λειτουργία του. Ο πυκνωτής λειτουργίας πρέπει ανά KW ισχύος του κινητήρα να έχει μια άεργη ισχύ 1,3 Kvar. Για τη χωρητικότητα του πυκνωτή εκκίνησης εκλέγεται συνήθως τριπλή τιμή του πυκνωτή λειτουργίας. Ο πυκνωτής και η επαγωγή του βοηθητικού πηνίου σχηματίζουν έναν ταλαντωτή σειράς. Για το λόγο αυτό η τάση του πυκνωτή είναι μεγαλύτερη από την τάση του δικτύου. Η μέγιστη τάση στον πυκνωτή εμφανίζεται σε λειτουργία του κινητήρα χωρίς φορτίο. Ο πυκνωτής του κινητήρα με πυκνωτή (πυκνωτές) πρέπει να υπολογίζεται για τη μέγιστη εμφανιζόμενη τάση. Κινητήρες με πυκνωτή σε ονομαστικές ισχύεις της τάξης των 2KW χρησιμοποιούνται σε οικιακά μηχανήματα, σε εργαλειομηχανές και σε μηχανήματα οικοδομής, π.χ. ψυγεία και πλυντήρια.

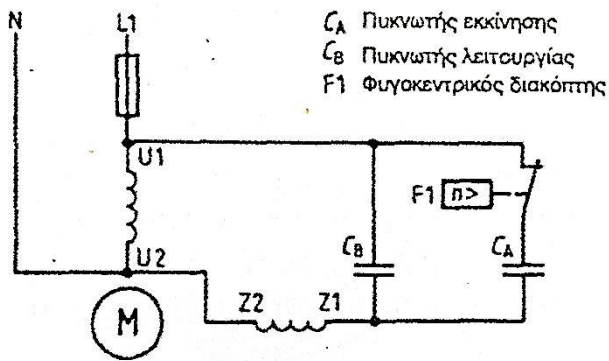


ΣΧΗΜΑ.11 Πυκνωτής λειτουργίας μονοφασικού κινητήρα



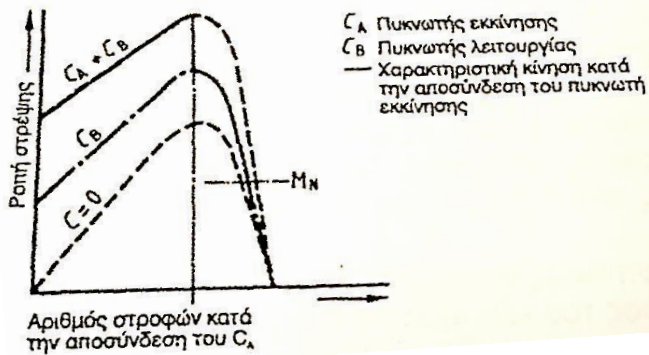
ΣΧΗΜΑ.12

Σύνδεση σε μη διαιρεμένο βοηθητικό τύλιγμα



ΣΧΗΜΑ.13

Κινητήρας με πυκνωτές εκκίνησης και λειτουργίας



ΣΧΗΜΑ.14 Χαρακτηριστικές καμπύλες της

ροπής στρέψης κινητήρα με πυκνωτή

3.2.3 Κινητήρας με Διαχωρισμένους Πόλους Υψηλής Ταχύτητας

Ο στάτης του κινητήρα αυτού (Σχ.15) έχει χαρακτηριστικούς πόλους από τους οποίους αποσπάται ένα μικρότερο τμήμα με τη δημιουργία μιας εγκοπής. Γύρω από αυτόν τον διαχωρισμένο πόλο βρίσκεται ένα βραχυκυκλωμένο τύλιγμα (Σχ.16). Το βραχυκυκλωμένο τύλιγμα διαπερνάται από ένα μόνο μέρος των δυναμικών γραμμών, που παράγει το τύλιγμα του στατή. Από το γεγονός αυτό δημιουργείται μια μεγάλη σκέδαση μεταξύ του ρεύματος στο τύλιγμα του στατή και του ρεύματος στο βραχυκυκλωμένο τύλιγμα εμφανίζεται μια μετατόπιση φάσης. Τα δύο ρεύματα που είναι μετατοπισμένα ως προς τη φάση παράγουν ένα μαγνητικό πεδίο, του οποίου οι μαγνητικοί πόλοι περνούν διαδοχικά από τους εξής πόλους του στατή: κύριος πόλος 1, διαχωρισμένος πόλος 1, κύριος πόλος 2, κλπ. Αυτό το ανομοιόμορφο στρεφόμενο πεδίο περιστρέφει έναν βραχυκυκλωμένο δρομέα. Όταν ο δρομέας κατασκευάζεται από σκληρό μαγνητικό υλικό (**δρομέας υστέρησης**), τότε οι κινητήρες αυτοί κινούνται μετά από την εκκίνηση ως σύγχρονοι κινητήρες.

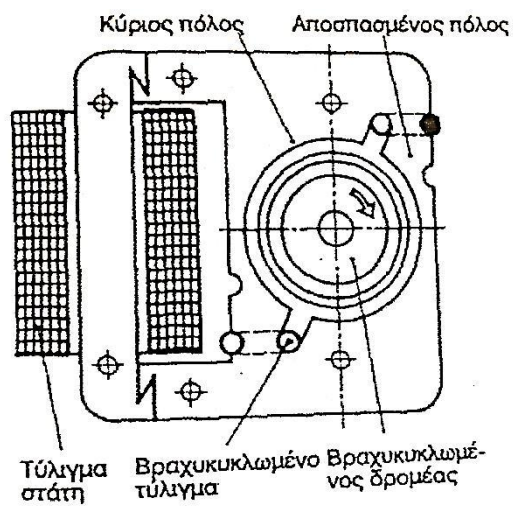
Η φορά περιστροφής των κινητήρων με διαχωρισμένους πόλους είναι από τον κύριο προς τον διαχωρισμένο πόλο. Η φορά περιστροφής καθορίζεται από τη διάταξη των πόλων και δεν μεταβάλλεται ηλεκτρικά. Οι κινητήρες με διαχωρισμένους πόλους είναι ανθεκτικοί και κατασκευάζονται με χαμηλό κόστος. Λόγω του χαμηλού βαθμού απόδοσης τους που είναι περίπου 30% κατασκευάζονται για μικρή ισχύ της τάξης των 300 W. Χρησιμοποιούνται σε ανεμιστήρες θέρμανσης αντλίες υγρών μιγμάτων και σε φυγοκεντρικούς διαχωριστές. Ως σύγχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται π.χ. σε χειριστικούς μηχανισμούς προγραμμάτων.

3.2.4 Κινητήρας με Διαχωρισμένους Πόλους Χαμηλής Ταχύτητας

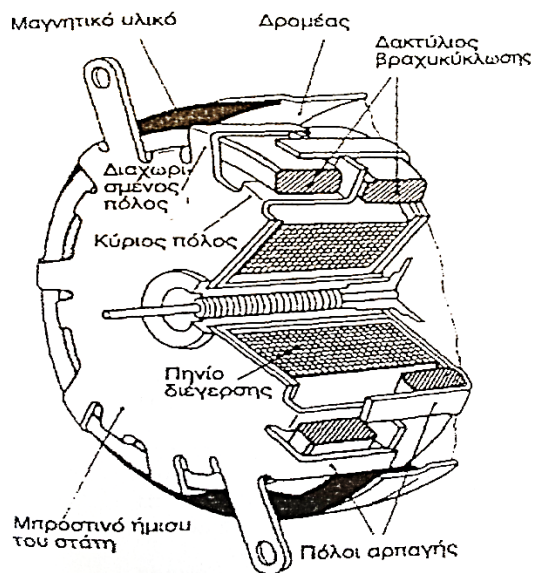
Οι αργοί κινητήρες με αποσπασμένο πόλο έχουν π.χ. 10 ή 16 πόλους και έναν αντίστοιχο χαμηλό αριθμό στροφών. Συνήθως κατασκευάζονται ως εξωτερικοί δρομείς (Σχ.17). Στην περίπτωση αυτή ο δρομέας αποτελείται από ένα κυκλικό πηνίο διέγερσης και από δύο τμήματα του στατή που κατασκευάζονται από χαλύβδινες λαμαρίνες, οι οποίες λειτουργούν ως **πόλοι αρπαγής**. Η πολικότητα των πόλων του ενός τμήματος του στατή είναι κάθε φορά η ίδια επειδή καθορίζεται από το μαγνητικό πεδίο του πηνίου διέγερσης. Κάθε δεύτερος πόλος λειτουργεί ως διαχωρισμένος πόλος. Γύρω απ' όλους τους διαχωρισμένους πόλους ενός τμήματος του στατή βρίσκεται ένας κοινός δακτύλιος βραχυκυκλώσεως ο οποίος προκαλεί την απαραίτητη μετατόπιση φάσης μεταξύ των μαγνητικών ροπών στους διαχωρισμένους πόλους και στους κύριους πόλους. Από το γεγονός αυτό δημιουργείται το στρεφόμενο πεδίο. Ο δρομέας σε μορφή δοχείου σκεπάζει τους πόλους. Στην εσωτερική του πλευρά υπάρχει ένας δακτύλιος από σκληρό μαγνητικό υλικό. Το στρεφόμενο πεδίο του στατή επάγει στο δακτύλιο το δρομέα δινορρεύματα, τα οποία προκαλούν την ασύγχρονη εκκίνηση του δρομέα. Στο μαγνητικό υλικό του δρομέα σχηματίζονται τώρα μέσω του στρεφόμενου πεδίου οι χαρακτηριστικοί πόλοι. Έτσι ο δρομέας αρχίζει να περιστρέφεται με τον αριθμό στροφών του στρεφόμενου πεδίου. Οι αργοί κινητήρες με διαχωρισμένους πόλους είναι ασύγχρονοι μονοφασικοί. Οι σύγχρονοι κινητήρες με διαχωρισμένους πόλους έχουν ισχύ από 1W μέχρι 3W. Χρησιμοποιούνται π.χ. για ρολόγια, σε ελέγχους προγραμμάτων, χρονοδιακόπτες, καταγραφικά και ελέγχους (ρυθμίσεις).



ΣΧΗΜΑ 15
Κινητήρας με διαχωρισμένους πόλους



ΣΧΗΜΑ 16
Κινητήρες με διαχωρισμένους πόλους σε ασύμμετρη εκτέλεση (διπολικός)



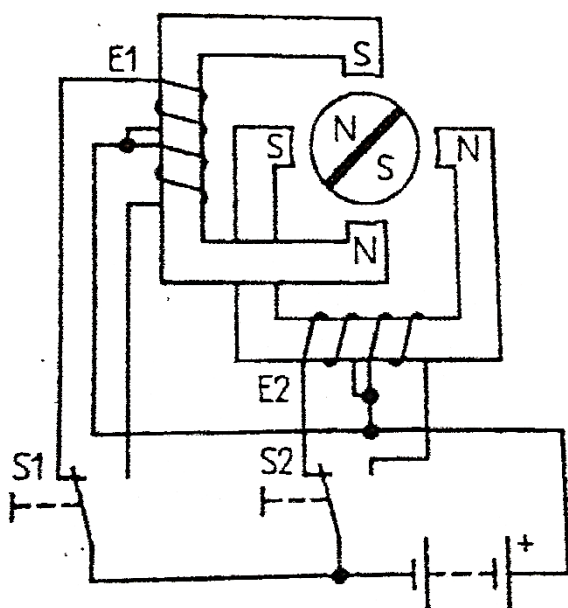
ΣΧΗΜΑ 17
Σύγχρονος κινητήρας με διαχωρισμένους πόλους (20 πόλοι)

3.2.5 Βηματικοί Κινητήρες

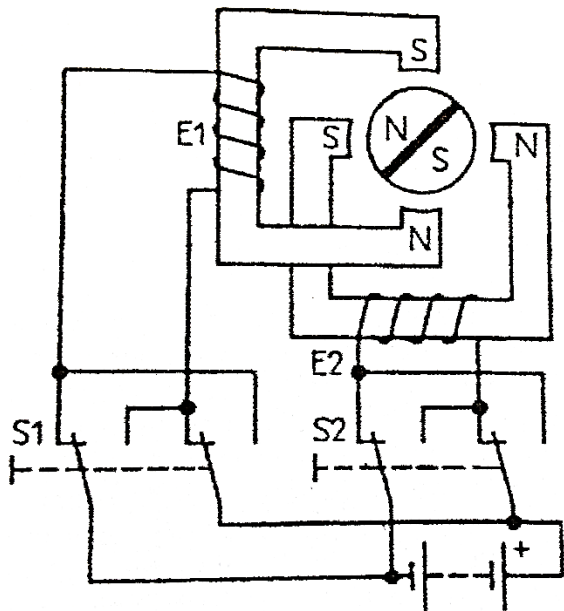
Τα τυλίγματα συνεχούς ρεύματος, τα οποία βρίσκονται στον στάτη ενός κινητήρα έχουν τη δυνατότητα να ελέγχονται από παλμούς συνεχούς ρεύματος εναλλασσόμενης πολικότητας. Όταν η φορά του ρεύματος αλλάζει στα διάφορα τυλίγματα, τότε επέρχεται και η αλλαγή των πόλων. Όταν η αλλαγή των πόλων γίνεται διαδοχικά με την ίδια φορά, τότε δημιουργείται ένα στρεφόμενο πεδίο, το οποίο μεταβάλλει την κατάσταση του βηματικά συναρτήσει της ταχύτητας των παλμών ή με καθορισμένη ισόποση ταχύτητα περιστροφής. Ένας δρομέας με μόνιμο μαγνήτη συμμορφώνεται κάθε φορά στην πολικότητα του πεδίου του στάτη.

Ο δρομέας ενός βηματικού κινητήρα διεγείρεται έτσι ώστε να κινείται βηματικά ή με ομαλή ταχύτητα περιστροφής. Οι βηματικοί κινητήρες κατασκευάζονται ως μονοφασικοί ή ως πολυφασικοί. Η πολικότητα των πόλων του στάτη αλλάζει με δύο τρόπους. Μιλάμε για μονοπολική λειτουργία, όταν το κάθε τύλιγμα που διεγείρει αποτελείται από δύο πηνία (Σχ.18). Κάθε πηνίο παράγει μια καθορισμένη φορά μαγνητική ροή. Η μεταγωγή των πηνίων γίνεται με τη χρησιμοποίηση των αντίστοιχων διακοπών και έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της πολικότητας. Όταν το τύλιγμα διέγερσης αποτελείται από ένα πηνίο, του οποίου η φορά ρεύματος μεταβάλλεται συνεχώς ως προς την αλλαγή των πόλων, τότε ομιλούμε για διπολική λειτουργία (Σχ.19). Στο παράδειγμα ενός διφασικού βηματικού κινητήρα εξηγούμε τον διπολικό τρόπο λειτουργίας στη θέση του διακόπτη, η οποία φαίνεται στο Σχ.19. Ο μαγνητικός δρομέας παίρνει μια θέση σύμφωνα με την κοινή δημιουργία του βόρειου και νότιου πόλου των τυλιγμάτων διέγερσης E1 και E2. Όταν χειρίζεται ο διακόπτης S2 (Σχ.20), τότε αλλάζει η πολικότητα του τυλιγματος διέγερσης E2. Ο δρομέας ακολουθεί το νέο σχηματισμό των πόλων στα τυλίγματα διέγερσης και περιστρέφεται κατά 90° όπως ο δείκτης του ρολογιού.

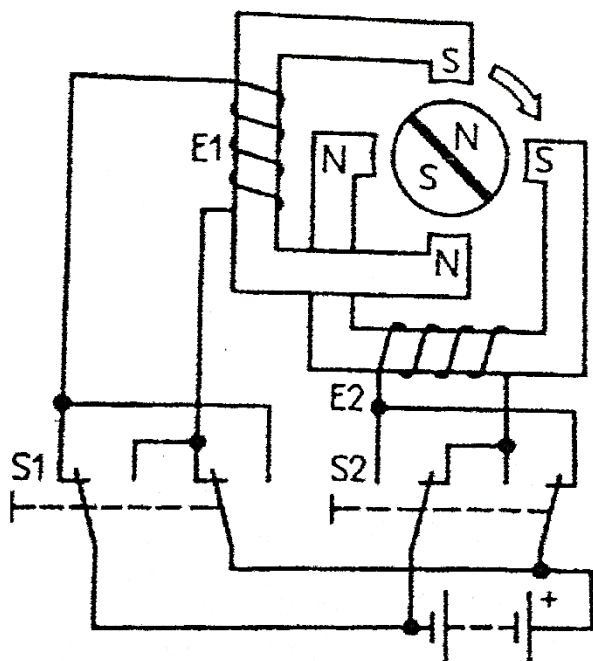
Όταν ακολουθεί καινούρια μεταγωγή του S1, τότε το τύλιγμα διέγερσης E1 αλλάζει πολικότητα και ο δρομέας προχωρεί και πάλι κατά ένα βήμα από 90°. Στις επακόλουθες μεταγωγές S2 και S1 ο δρομέας διεξάγει αντίστοιχα βήματα περιστροφής. Η περιστροφική κίνηση που εμφανίζεται την κάθε φορά ονομάζεται γωνία βήματος και είναι τόσο μικρότερη, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των φάσεων και των πόλων του κινητήρα.



ΣΧΗΜΑ 18
Διφασικοί βηματικοί κινητήρες
μονοπολικής δομής



ΣΧΗΜΑ 19
 Διφασικός βηματικός κινητήρας
 διπολικής δομής



ΣΧΗΜΑ 20
 Βηματικός κινητήρας (Σχ 19) μετά από
 χειρισμό του S2

3.2.6 Βηματικοί Κινητήρες για Μικρές Γωνίες Βήματος

Ο μεγάλος αριθμός πόλων του κινητήρα που είναι απαραίτητος για μικρές γωνίες βήματος προϋποθέτει ειδική συγκρότηση. Για γωνίες βήματος κάτω από $7,5^\circ$ ο κινητήρας κατασκευάζεται σύμφωνα με την αρχή των όμοιων πόλων (Σχ. 21). Πάνω στον άξονα του δρομέα τοποθετείται ένας μόνιμος μαγνήτης με αξονικά διαμορφωμένους πόλους στις μετωπικές πλευρές όπου βρίσκονται οδοντωτοί πολικοί τροχοί. Τα δόντια ενός τροχού έχουν όλα την ίδια πολικότητα.

Με τη μετατόπιση των τροχών κατά μισή υποδιαίρεση δοντιού επιτυγχάνεται αλλαγή της πολικότητας των πόλων στην περιφέρεια του δρομέα (Σχ.22). Στον Στάτη που αποτελείται από λαμαρίνες βρίσκονται δύο τυλίγματα διέγερσης (φάσεις). Κάθε φάση αποτελείται από δύο πηνία συνδεδεμένα σε σειρά, τα οποία αποτελούν τους πόλους του στάτη και βρίσκονται τοποθετημένα το ένα απέναντι από το άλλο (Σχ.23).

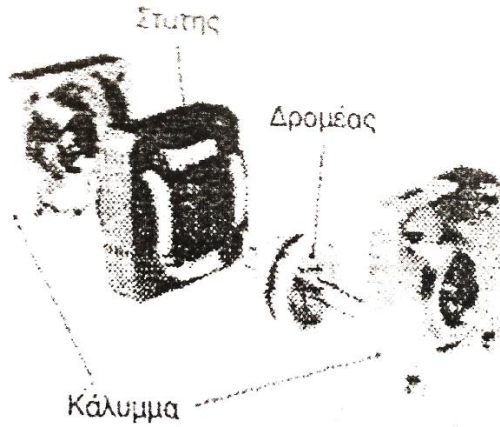
Επειδή η υποδιαίρεση δοντιών του στάτη είναι ίση με την υποδιαίρεση δοντιών του τροχού, ο πολικός τροχός παίρνει κάθε φορά τη θέση εκείνη, στην οποία η μαγνητική αντίσταση για τις μαγνητικές γραμμές είναι η πιο χαμηλή, σύμφωνα με την επικρατούσα πολικότητα του στάτη.

Για την παραστατική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας εξετάζεται ένας κινητήρας με 9 μόνο δόντια ανά πολικό τροχό και με 2 δόντια ανά πόλο του στάτη (Σχ. 23α). Μεταξύ των βόρειων πόλων του μπροστινού τροχού φαίνονται οι νότιοι πόλοι του πίσω πολικού τροχού. Ο δρομέας παίρνει μια θέση, στην οποία απέναντι από τα δόντια του στάτη βρίσκονται δόντια του δρομέα με αντίθετη πολικότητα. Στην περίπτωση αυτή η μαγνητική αντίσταση παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή της. Με την αλλαγή της πολικότητας του ρεύματος στο τύλιγμα E1, αλλάζει η πολικότητα των αντίστοιχων δοντιών του στάτη. Ο δρομέας αντιδρά ως προς αυτό με μια περιστροφή κατά τη βηματική γωνία 10° (Σχ.23β). Κάθε περαιτέρω αλλαγή των πόλων στη σειρά E2, E1, E2, κλπ προκαλεί κάθε φορά μια περιστροφή κατά 10° (όπως ο δείκτης του ρολογιού). Ο βηματικός κινητήρας, σύμφωνα με την αρχή των όμοιων πόλων, διαθέτει έναν περιπολικό δρομέα και εξασφαλίζει περιστροφικές κινήσεις με μικρή βηματική γωνία.

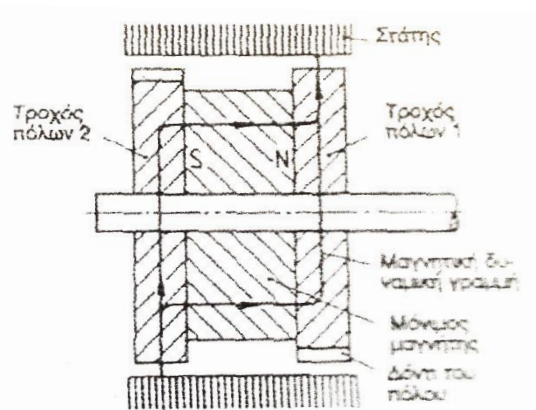
Στην περίπτωση που ο βηματικός κινητήρας λειτουργεί με σταθερή τάση, η άεργη αντίσταση του στάτη αυξάνει με την αύξηση της βηματικής συχνότητας, ενώ η απορρόφηση ρεύματος και η ροπή στρέψης του κινητήρα ελαττώνονται. Όταν η ροπή στρέψης πρέπει να αυξάνει σε αυξανούσα συχνότητα, τότε οι βηματικοί κινητήρες πρέπει να λειτουργούν μέσω ελέγχου με σταθερό ρεύμα. Σε κανονική ροπή φορτίου ο δρομέας του βηματικού κινητήρα στρέφεται κατά μία βηματική γωνία, η οποία αντιστοιχεί στον παλμό διέγερσης. Η δημιουργία μίας γωνίας φορτίου (καθυστέρησης του δρομέα) της οποίας η τιμή πλησιάζει μέχρι και την τιμή της βηματικής γωνίας είναι δυνατή. Το σφάλμα αυτό όμως δεν αθροίζεται με τον αριθμό των βημάτων με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η δυνατότητα στο τέλος της διαδικασίας του ελέγχου να έχει τιμή μεγαλύτερη της βηματικής γωνίας. Ο βηματικός κινητήρας επιτρέπει υψηλή ακρίβεια θέσης. Με τη διακοπή του ρεύματος του στάτη υπάρχει και πάλι – λόγω της επίδρασης του μαγνήτη του δρομέα – ένα σημείο ηρεμίας (σταθερή θέση του δρομέα). Οι κινητήρες με βηματικές γωνίες πάνω από $7,5^\circ$

Κατασκευάζονται σύμφωνα με την αρχή των πόλων αρπαγής.

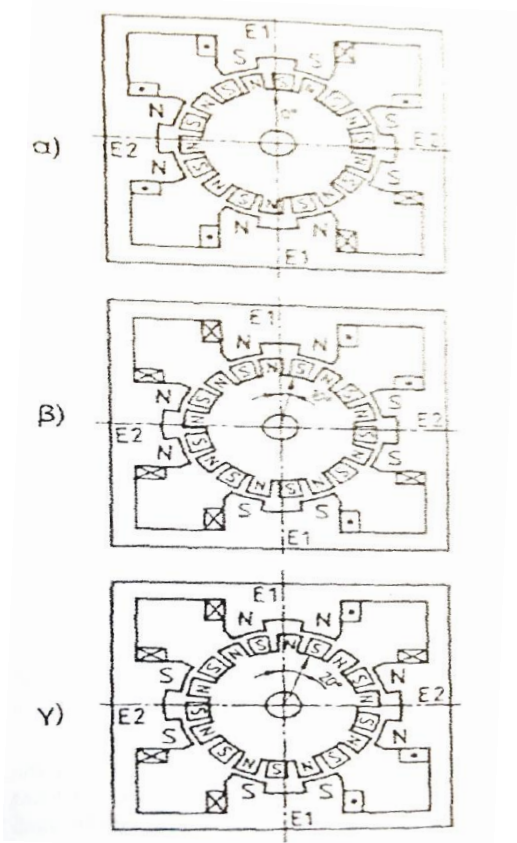
Εξαιτίας της απλής συγκρότησης και της υψηλής πιστότητας τους οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται για ρυθμιστικές κινήσεις, για τηλεχειρισμούς, για τηλεκαταγραφικά μηχανήματα, για κινήσεις εκτυπωτών, για διατάξεις μέτρησης και άλλους κλάδους της τεχνική ελέγχων και ρυθμίσεων.



ΣΧΗΜΑ 21
Αποσυναρμολογημένος βηματικός κινητήρας.



ΣΧΗΜΑ 22
Το πεδίο στον δρομέα (αρχή των όμοιων πόλων)



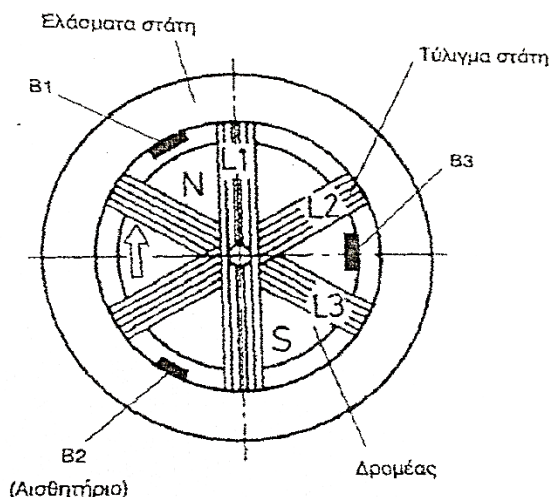
ΣΧΗΜΑ 23
Τρόπος λειτουργίας (αρχή των όμοιων πόλων)

3.2.7 Ηλεκτρονικός Κινητήρας

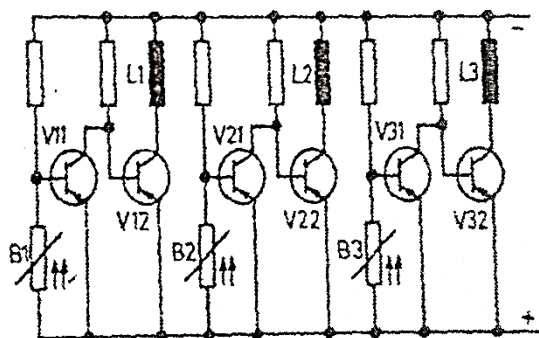
Στον ηλεκτρονικό κινητήρα ο στάτης φέρει τουλάχιστον τρία πηνία, στα οποία εφαρμόζεται διαδοχικά συνεχής τάση (Σχ.24). Από το γεγονός αυτό με κάθε χειρισμό οι πόλοι προχωρούν, δημιουργείται δηλαδή ένα στρεφόμενο πεδίο. Ο δρομέας του ηλεκτρονικού κινητήρα έχει μόνιμο μαγνήτη. Με το μαγνητικό του πεδίο επιδρά πάνω σε αισθητήρες (που εξαρτώνται από το μαγνητικό πεδίο, αισθητήρες HALL), που είναι τοποθετημένοι στην εσωτερική πλευρά του στάτη. Συναρτήσει της θέσης του στάτη τα τρανζίστορ ελέγχουν τη ζεύξη και απόζευξη των πηνίων του στάτη που είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία του στρεφόμενου πεδίου. Στον ηλεκτρονικό κινητήρα τα πηνία του στάτη ελέγχονται από το μαγνητικό πεδίο του δρομέα.

Ως αισθητήρες για τη θέση του δρομέα χρησιμοποιούνται π.χ. αντιστάσεις οι οποίες εξαρτώνται από την πυκνότητα της μαγνητικής ροής (Σχ.25). Σε αυτές η αντίσταση αυξάνει με την μαγνητική επαγωγή του πεδίου. Όταν ο δρομέας στέκει έτσι ώστε η μαγνητική επαγωγή στην πλάκα πεδίου B1 (αντίσταση) να είναι μικρή, τότε η ίδια αντίσταση παρουσιάζει υψηλή τιμή. Η βάση του V11 γίνεται πιο αρνητική και το V11 γίνεται αγώγιμο. Έτσι η βάση του V12 γίνεται θετική και τώρα το V12 γίνεται μη αγώγιμο, ώστε το τύλιγμα L1 να μη φέρει ρεύμα. Απεναντίας τα τυλίγματα L2 και L3 διαρρέονται από ρεύμα. Στην περίπτωση αυτή ο δρομέας στρέφεται. Με τον ίδιο τρόπο ελέγχεται μετά το V21 και μετά το V31, ενώ το V12 γίνεται και πάλι αγώγιμο.

Οι ηλεκτρονικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται π.χ. για την κίνηση μαγνητοφώνων και πικάπ που τροφοδοτούνται από μπαταρίες.



ΣΧΗΜΑ 24
Δομή του ηλεκτρονικού κινητήρα



ΣΧΗΜΑ 25
Διέγερση του ηλεκτρονικού κινητήρα με σπλισμούς πεδίου

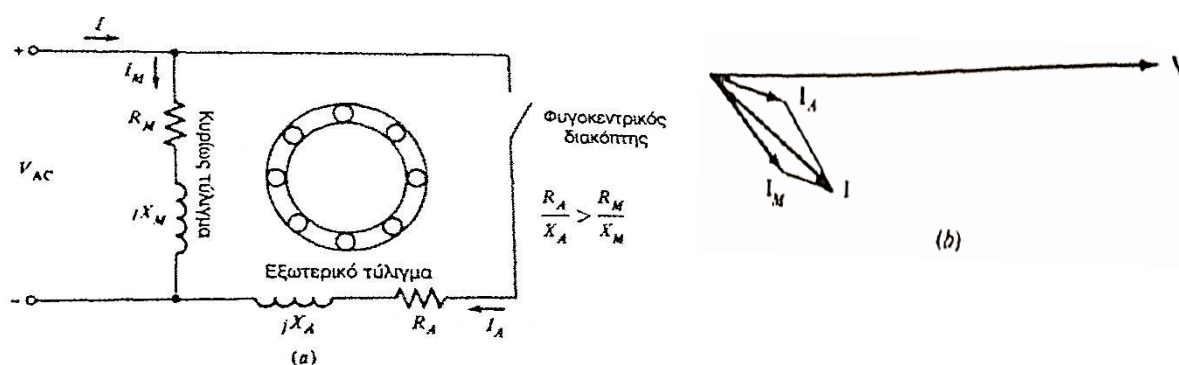
3.3 Εκκίνηση Επαγωγικών Μονοφασικών Κινητήρων

Όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα, ο μονοφασικός επαγωγικός κινητήρας δεν διαθέτει κάποια ροπή εκκίνησης. Υπάρχουν τρεις συνηθισμένοι τρόποι εκκίνησης αυτών των κινητήρων και μάλιστα ανάλογα με τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των ροπών εκκίνησης, οι μονοφασικοί επαγωγικοί κινητήρες χωρίζονται σε κάποιες κατηγορίες. Οι τεχνικές εκκίνησης διαφέρουν μεταξύ τους σε κόστος και σε παραγόμενη ροπή εκκίνησης, με αποτέλεσμα ο μηχανικός να χρησιμοποιεί κάθε φορά την τεχνική με το μικρότερο κόστος που συμβιβάζεται με τις απαιτήσεις σε ροπή της δεδομένης εφαρμογής.

Οι τρεις βασικές τεχνικές εκκίνησης είναι οι εξής:

1. Με διαχωρισμένα τυλίγματα
2. Με πυκνωτή εκκίνησης
3. Με βοηθητικούς πόλους στο στάτη

Οι τρεις τεχνικές εκκίνησης είναι μέθοδοι που αποσκοπούν στο να δυναμώσουν το ένα από τα δύο στρεφόμενα πεδία του κινητήρα, ώστε να δοθεί σ' αυτόν μια αρχική ώθηση προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση.



ΣΧΗΜΑ 26. (α) Ένας επαγωγικός κινητήρας διαχωρισμένων τυλιγμάτων (β) Τα ρεύματα στον κινητήρα κατά την εκκίνηση

3.3.1 Διαχωρισμένα Τυλίγματα

Ο κινητήρας με διαχωρισμένα τυλίγματα (split-phase motor) είναι ένας μονοφασικός επαγωγικός κινητήρας με δύο τυλίγματα στο στάτη από τα οποία το ένα είναι το κύριο τύλιγμα του στάτη (M) και το άλλο είναι ένα βοηθητικό τύλιγμα εκκίνησης (A). Τα δύο τυλίγματα είναι τοποθετημένα σε απόσταση 90° (ηλεκτρικές μοίρες) μεταξύ τους επάνω στην επιφάνεια του στάτη και το βοηθητικό τύλιγμα είναι σχεδιασμένο ώστε να αποσυνδέεται από το κύκλωμα σε μία προκαθορισμένη ταχύτητα περιστροφής με τη χρήση ενός φυγοκεντρικού διακόπτη. Επίσης το βοηθητικό τύλιγμα σχεδιάζεται ώστε να παρουσιάζει μεγαλύτερο λόγο αντίστασης/ αντίδρασης από το κυρίως τύλιγμα με σκοπό το ρεύμα του βοηθητικού τυλιγματος να προηγείται σε σχέση με το ρεύμα του κύριου τυλιγματος. Ο μικρότερος λόγος R/X επιτυγχάνεται με τη χρήση αγωγού μικρότερης διατομής στο βοηθητικό τύλιγμα. Ο λεπτότερος αγωγός για το εξωτερικό τύλιγμα είναι επιτρεπτός, επειδή αυτό χρησιμοποιείται μόνο για την εκκίνηση και δεν προορίζεται για την ανάληψη όλου του ρεύματος συνεχώς.

Για την κατανόηση της λειτουργίας του βοηθητικού τυλίγματος εξετάζεται το **Σχ.27**. Επειδή το ρεύμα στο βοηθητικό τύλιγμα προηγείται του ρεύματος στο κυρίως τύλιγμα η μαγνητική επαγωγή B_A φτάνει στη μέγιστη τιμή της πριν από την κυρίως μαγνητική επαγωγή B_M . Επειδή η B_A παρουσιάζει μέγιστο πριν τη B_M , το συνολικό μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται ανθρωλογιακά. Μ'άλλα λόγια το εξωτερικό τύλιγμα μιας συνισταμένης ροπής εκκίνησης στο εσωτερικό του κινητήρα.

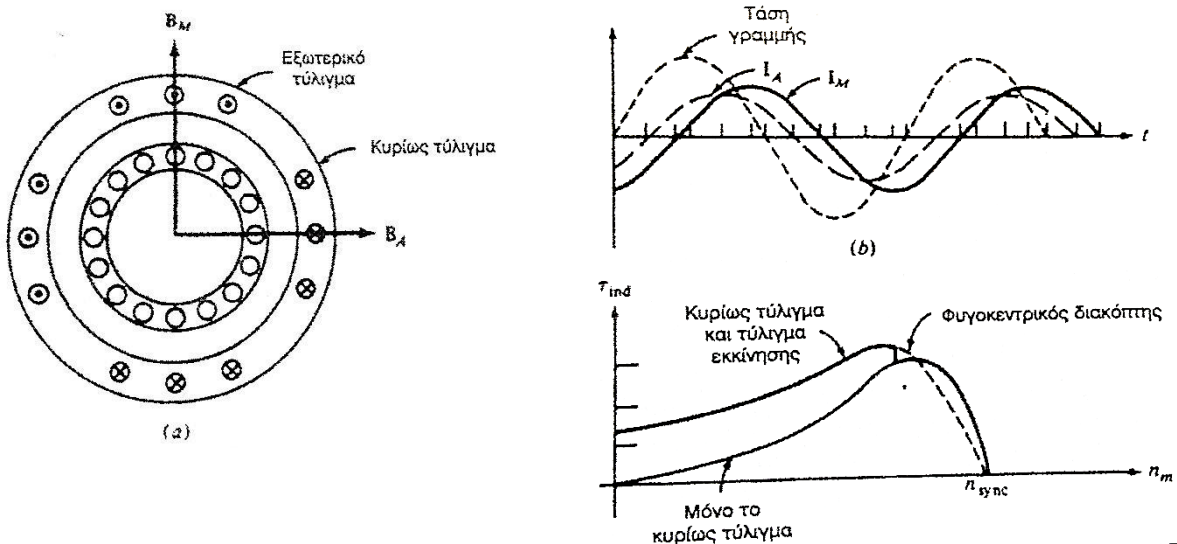
Μια τυπική χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας παρουσιάζεται στο **Σχ.27**.

Στο **Σχ.28** φαίνεται η τομή ενός κινητήρα με διαχωρισμένο τύλιγμα. Φαίνονται καθαρά τα κύρια, τα βοηθητικά τυλίγματα (τα οποί είναι αυτά με τη μικρότερη διάμετρο) και ο φυγοκεντρικός διακόπτης, που αποσυνδέει τα βοηθητικά τυλίγματα από το κύκλωμα, όταν ο κινητήρας προσεγγίζει την ταχύτητα λειτουργίας.

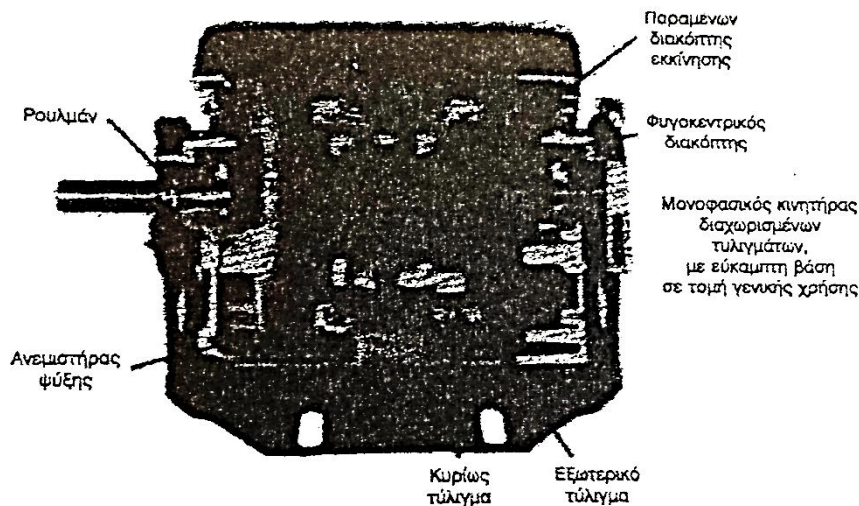
Οι κινητήρες με διαχωρισμένα τυλίγματα έχουν μέτρια ροπή εκκίνησης με αρκετά μικρό ρεύμα εκκίνησης. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που δεν απαιτούν πολύ υψηλές ροπές εκκίνησης, όπως οι ανεμιστήρες, οι φυσητήρες και οι φυγοκεντρικές αντλίες. Ακόμη διατίθενται σε μεγέθη με εύρος ισχύος από κλάσμα του ίππου και είναι πολύ φθηνοί.

Στους επαγωγικούς κινητήρες με διαχωρισμένα τυλίγματα το ρεύμα του βοηθητικού τυλίγματος φτάνει τη μέγιστη τιμή του πριν από το ρεύμα του κύριου τυλίγματος κι έτσι το μαγνητικό πεδίο του βοηθητικού τυλίγματος γίνεται μέγιστο πριν από το πεδίο του κύριου τυλίγματος. Η φορά περιστροφής προσδιορίζεται από το αν η χωρική γωνία του πεδίου του εξωτερικού τυλίγματος βρίσκεται 90° μπροστά ή 90° πίσω από τη γωνία του κύριου τυλίγματος.

Αφού αυτή η γωνία μπορεί να μεταφερθεί από τις 90° μπροστά, στις 90° πίσω απλώς με την αντιστροφή των συνδέσεων στο εξωτερικό τύλιγμα, η φορά περιστροφής του κινητήρα μπορεί να αντιστραφεί με την αντιμετάθεση των συνδέσεων στο βοηθητικό τύλιγμα διατηρώντας σταθερές τις συνδέσεις του κύριου τυλίγματος και αυξάνει το ένα από τα δύο αντίθετα περιστρεφόμενα πεδία του στάτη προκαλώντας την ανάπτυξη.



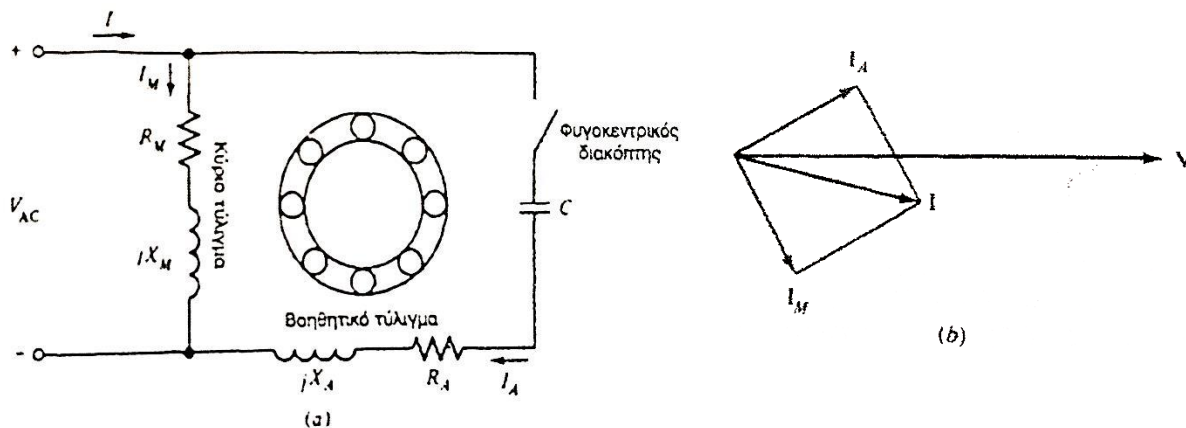
ΣΧΗΜΑ 27 Επειδή το I_A παρουσιάζει μέγιστο πριν το I_M , το συνολικό μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται ανθρωλογιακά. Στο (γ) φαίνεται η τελική χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας.



ΣΧΗΜΑ 28 Ένας επαγωγικός κινητήρας με διαχωρισμένα τυλίγματα σε τομή. Εδώ φαίνονται το κύριο, το βοηθητικό τύλιγμα και ο φυγοκεντρικός διακόπτης.

3.3.2 Κινητήρες με Πυκνωτή Εκκίνησης

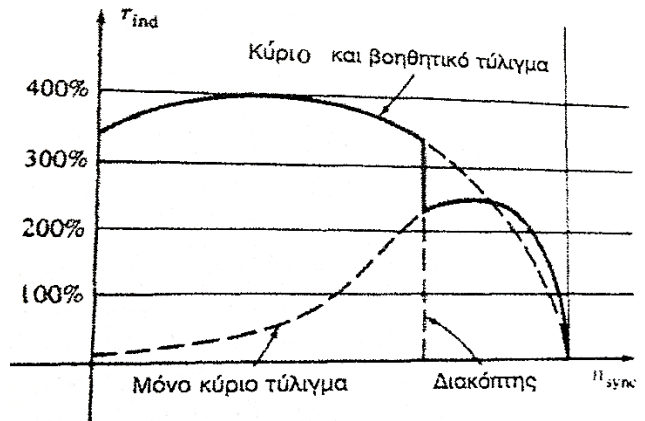
Σε κάποιες εφαρμογές η ροπή εκκίνησης που προσφέρει ένας κινητήρας με διαχωρισμένα τυλίγματα είναι ανεπαρκής για την εκκίνηση του φορτίου που συνδέεται στον άξονα του κινητήρα. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν κινητήρες με πυκνωτή εκκίνησης (capacitor-start motors) (βλ **Σχ.29**). Σ'έναν κινητήρα με πυκνωτή εκκίνησης, στη σειρά με το βοηθητικό τύλιγμα τοποθετείται ένας πυκνωτής. Με την αρχική επιλογή για το μέγεθος του πυκνωτή η μαγνητεγερτική δύναμη που παρουσιάζει το ρεύμα εκκίνησης του βοηθητικού τυλιγματος είναι δυνατό να ρυθμιστεί, ώστε να είναι ίση με τη μαγνητεγερτική δύναμη που παρουσιάζει το ρεύμα του κυρίως τυλιγματος. Επίσης το ρεύμα στο εξωτερικό τύλιγμα μπορεί να γίνει τέτοιο, ώστε να προηγείται σε φάση του ρεύματος στο κυρίως τύλιγμα κατά 90° .



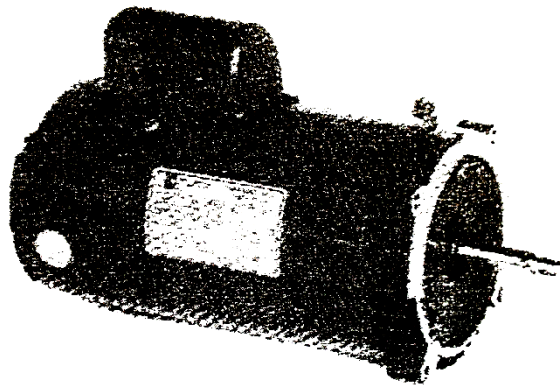
ΣΧΗΜΑ 29 (α) Ένας επαγωγικός κινητήρας με πυκνωτή εκκίνησης (β) Οι φάσεις των ρευμάτων κατά την εκκίνηση του κινητήρα

Αφού τα δύο τυλίγματα είναι εξαρχής ρυθμισμένα, ώστε να παρουσιάζουν διαφορά φάσης 90°, αυτή η διαφορά στο ρεύμα παράγει ένα μονοφασικό ομογενές και περιστρεφόμενο πεδίο του στάτη, με αποτέλεσμα ο κινητήρας να συμπεριφέρεται, όπως θα συμπεριφερόταν, αν ξεκινούσε με μια τριφασική πηγή ισχύος. Σ' αυτή την περίπτωση η ροπή εκκίνησης του κινητήρα μπορεί να γίνει 300 φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή (Σχ. 30).

Οι κινητήρες με πυκνωτή εκκίνησης είναι πιο ακριβοί από τους κινητήρες με διαχωρισμένα τυλίγματα και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, όπου είναι απολύτως απαραίτητη η μεγάλη ροπή εκκίνησης. Τυπικές εφαρμογές αυτών των κινητήρων είναι οι αεροσυμπιεστές, οι αντλίες, τα κλιματιστικά και άλλα τμήματα συσκευών που πρέπει να ξεκινούν υπό φορτίο (Σχ. 30).

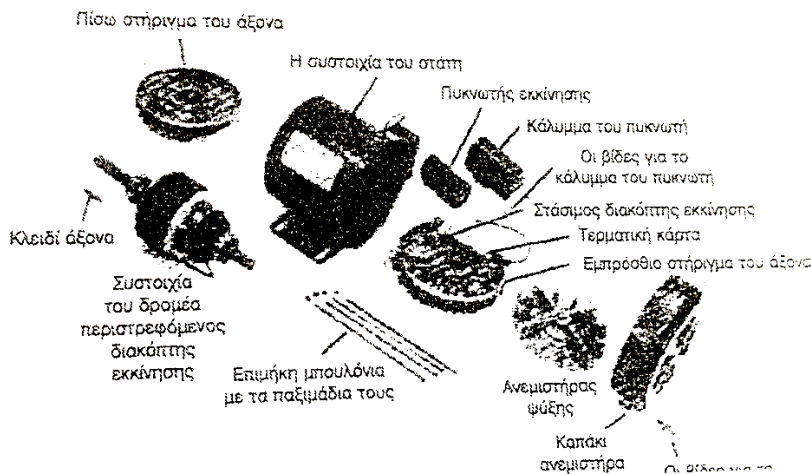


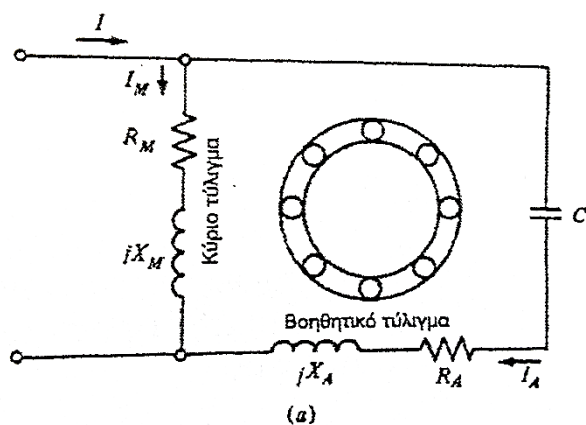
ΣΧΗΜΑ 30
Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα με πυκνωτή εκκίνησης



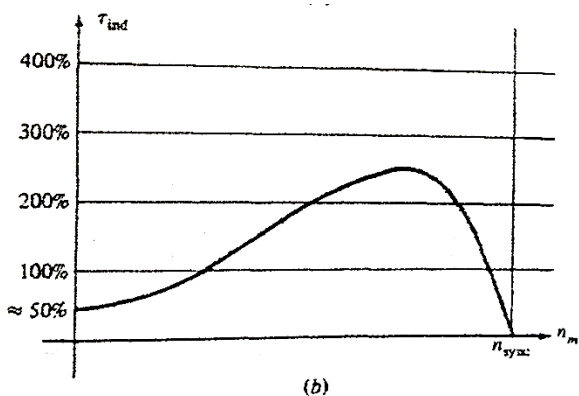
(α)

ΣΧΗΜΑ 31
(α) Επαγωγικός κινητήρας με πυκνωτή εκκίνησης
(β) Επαγωγικός κινητήρας με πυκνωτή εκκίνησης χωρισμένος στα τμήματά του





ΣΧΗΜΑ 32
 (α) Επαγωγικός κινητήρας μόνιμου πυκνωτή με διαχωρισμένα τυλίγματα
 (β) Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας αυτού του κινητήρα



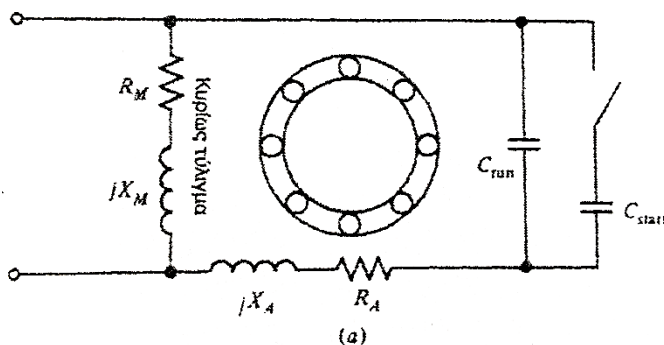
3.3.3 Κινητήρες Μόνιμου Πυκνωτή με Διαχωρισμένα Τυλίγματα και Κινητήρες με Πυκνωτή Εκκίνησης και Πυκνωτή Λειτουργίας

Ο πυκνωτής εκκίνησης βελτιώνει σε τέτοιο βαθμό τη χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα, που μερικές φορές ένα βοηθητικό τύλιγμα με μικρότερο πυκνωτή αφήνεται μόνιμα στο κύκλωμα του κινητήρα. Αν η τιμή του πυκνωτή επιλεγεί σωστά, προσδίδει στον κινητήρα τελείως ομογενές στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο για συγκεκριμένο φορτίο, με αποτέλεσμα αυτός να συμπεριφέρεται, όπως ακριβώς ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας με το ίδιο φορτίο. Ένας τέτοιος κινητήρας ονομάζεται κινητήρας με μόνιμο πυκνωτή και διαχωρισμένα τυλίγματα (capacitors-start-and-run) ή κινητήρας με πυκνωτή εκκίνησης και πυκνωτή λειτουργίας (capacitors-start-and-run) (Σχ.32). Οι κινητήρες μόνιμου πυκνωτή με διαχωρισμένα τυλίγματα είναι πιο απλοί από τους κινητήρες με πυκνωτή εκκίνησης, επειδή δεν χρειάζεται σε αυτούς διακόπτης εκκίνησης. Στη λειτουργία με κανονικά φορτία παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση και μεγαλύτερο συντελεστή ισχύος από τους συνηθισμένους μονοφασικούς επαγωγικούς κινητήρες.

Όμως οι κινητήρες μόνιμου πυκνωτή με διαχωρισμένα τυλίγματα παρουσιάζουν μικρότερη ροπή εκκίνησης από τους κινητήρες εκκίνησης με πυκνωτή, επειδή το μέγεθος του πυκνωτή θα πρέπει να είναι τέτοιο που να εξισορροπεί τα ρεύματα στο κύριο και στο βοηθητικό τύλιγμα σε συνθήκες κανονικής φόρτισης. Αφού το ρεύμα εκκίνησης είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό της κανονικής φόρτισης, ο πυκνωτής που εξισορροπεί τα ρεύματα στην κανονική φόρτιση, δεν τα εξισορροπεί στις συνθήκες εκκίνησης.

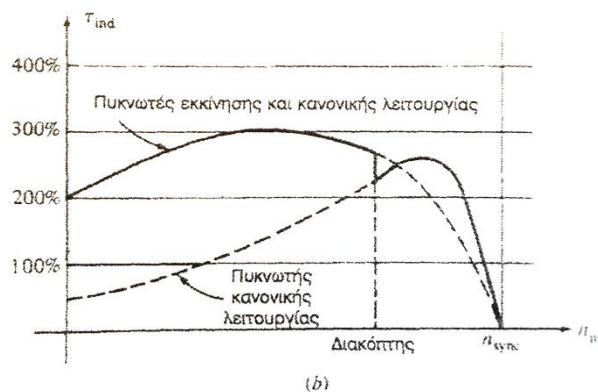
Αν σε κάποια εφαρμογή απαιτείται η μεγαλύτερη δυνατή ροπή εκκίνησης και οι καλύτερες συνθήκες κανονικής λειτουργίας, το βοηθητικό τύλιγμα μπορεί να περιλαμβάνει δύο πυκνωτές. Οι κινητήρες με δύο πυκνωτές ονομάζονται κινητήρες με πυκνωτή εκκίνησης και πυκνωτή λειτουργίας (capacitor-start, capacitor-run) ή κινητήρες με πυκνωτή δύο τιμών (two-value capacitor) (Σχ.33). Ο μεγαλύτερος πυκνωτής είναι παρών στο κύκλωμα μόνο κατά την εκκίνηση για να εξασφαλίζει ότι τα ρεύματα στο κύριο και στο βοηθητικό τύλιγμα θα είναι σχεδόν εξισορροπημένα και θα παράγονται πολύ μεγάλες ροπές εκκίνησης. Όταν ο κινητήρας αποκτά την κανονική του ταχύτητα, ο φυγοκεντρικός διακόπτης ανοίγει και στο βοηθητικό τύλιγμα παραμένει μόνο ο μόνιμος πυκνωτής. Αυτός θα είναι αρκετά μεγάλος ώστε να εξισορροπεί τα ρεύματα στη λειτουργία με κανονικά φορτία και με σκοπό ο κινητήρας να λειτουργεί με μεγάλη απόδοση, με μεγάλη ροπή και με μεγάλο συντελεστή ισχύος. Ο μόνιμος πυκνωτής σ' έναν τέτοιο κινητήρα έχει τυπική τιμή περίπου ίση με το 10% ως 20% της τιμής του πυκνωτή εκκίνησης.

Η φορά περιστροφής οποιουδήποτε κινητήρα με πυκνωτή είναι δυνατό να αντιστραφεί με την αντιστροφή των συνδέσεων στο βοηθητικό τύλιγμα.



ΣΧΗΜΑ 33

(α) Ένας επαγωγικός κινητήρας με πυκνωτή εκκίνησης και πυκνωτή λειτουργίας
 (β) Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας αυτού του κινητήρα

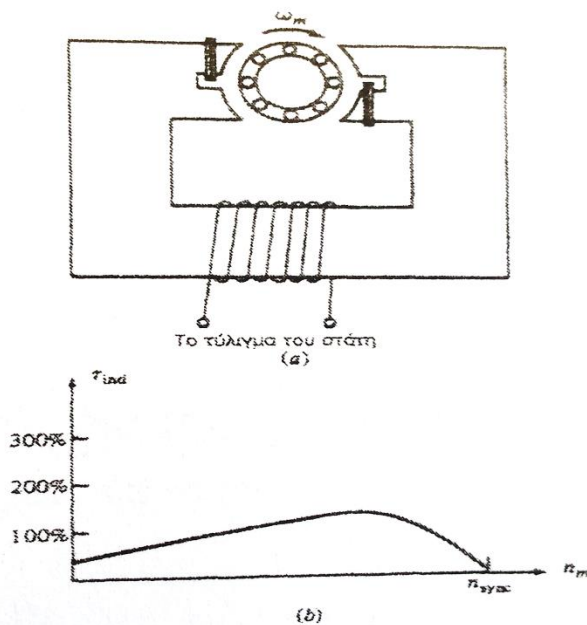


3.3.4 Κινητήρες με Βοηθητικούς Πόλους

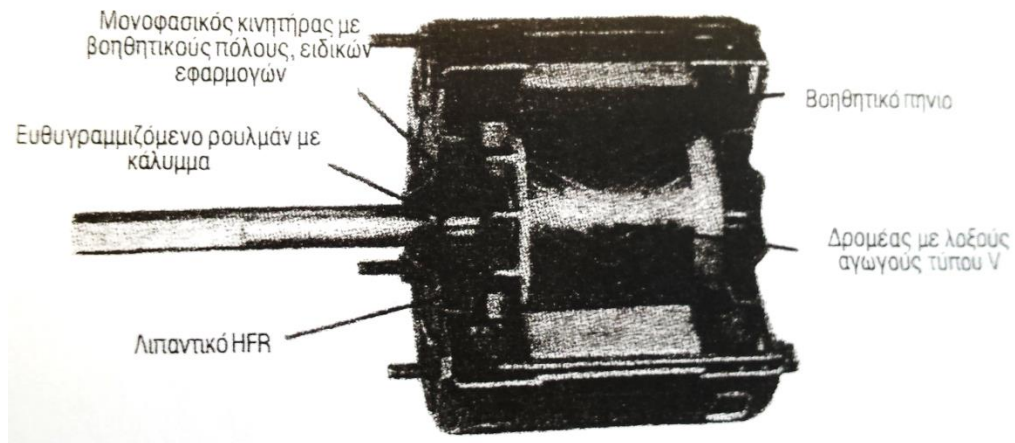
Ένας επαγωγικός κινητήρας με βοηθητικούς πόλους έχει μόνο κύριο τύλιγμα. Αυτός ο κινητήρας αντί να διαθέτει εξωτερικό τύλιγμα, περιλαμβάνει διακεκριμένους πόλους, το ένα τμήμα των οποίων περιβάλλεται από ένα βραχυκυκλωμένο πηνίο που ονομάζεται βοηθητικό πηνίο (shading coil) (Σχ.34α). Το κύριο τύλιγμα επάγει μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή στους πόλους. Όταν η μαγνητική ροή των πόλων μεταβάλλεται, στο βοηθητικό πηνίο επάγεται κάποια τάση και κάποιο ρεύμα, που αντιτίθενται στην αρχική μεταβολή της ροής. Το γεγονός αυτό καθυστερεί τη μεταβολή της ροής κάτω από τα καλυμμένα τμήματα των πόλων κι έτσι παράγεται μια μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των δύο αντίθετα στρεφόμενων μαγνητικών πεδίων του στάτη. Η συνισταμένη περιστροφή έχει φορά από το ακάλυπτο προς το καλυμμένο τμήμα του πόλου. Στο Σχ.34β φαίνεται η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα με βοηθητικούς πόλους.

Οι βοηθητικοί πόλοι παράγουν τη μικρότερη ροπή εκκίνησης από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο εκκίνησης επαγωγικών κινητήρων. Ακόμη παρουσιάζουν πολύ μικρότερη απόδοση και πολύ μεγαλύτερη ολίσθηση απ' όλες τις άλλες κατηγορίες μονοφασικών επαγωγικών κινητήρων. Τέτοιοι πόλοι χρησιμοποιούνται σε πολύ μικρούς κινητήρες (0,05 hp και κάτω) με πολύ μικρές απαιτήσεις σε ροπή εκκίνησης. Όπου είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν, οι κινητήρες με βοηθητικούς πόλους αποτελούν την πιο φθηνή λύση.

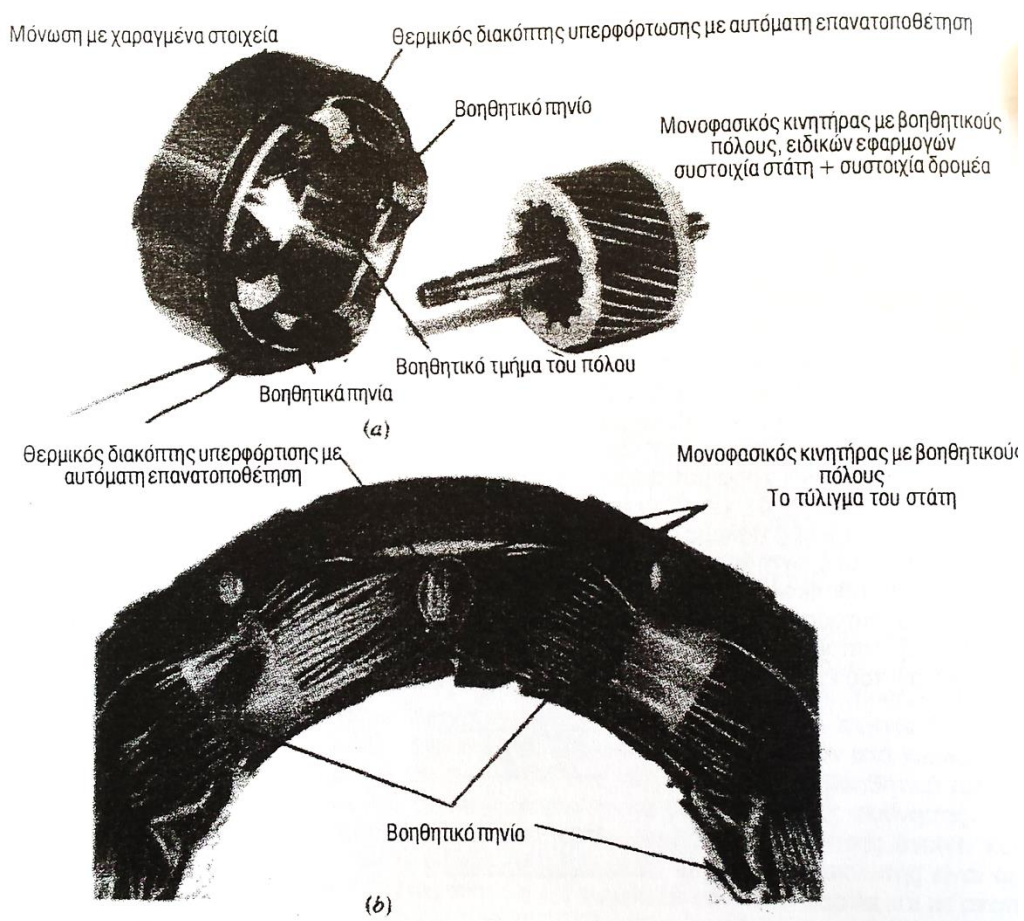
Επειδή στους κινητήρες με βοηθητικούς πόλους η ροπή εκκίνησης προκαλείται με τη συμβολή του βοηθητικού πηνίου, δεν υπάρχει εύκολος τρόπος αντιστροφής της φοράς περιστροφής σε αυτούς του κινητήρες. Για να επιτευχθεί η αντιστροφή της περιστροφής, είναι απαραίτητη η τοποθέτηση δύο βοηθητικών πηνίων σε κάθε πόλο και η επιλεκτική βραχυκύκλωση του ενός ή του άλλου πηνίου (Σχ. 35 και 36).



ΣΧΗΜΑ 34 (α) Βασική δομή ενός επαγωγικού κινητήρα με βοηθητικούς πόλους (β) Η τελική χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα.



ΣΧΗΜΑ 35 Ένας επαγωγικός κινητήρας με βοηθητικούς πόλους σε τομή



ΣΧΗΜΑ 36 Λεπτομέρειες της δομής ενός επαγωγικού κινητήρα τεσσάρων πόλων με βοηθητικούς πόλους

3.4 Έλεγχος της Ταχύτητας των Μονοφασικών Επαγωγικών Κινητήρων

Γενικά η ταχύτητα των μονοφασικών επαγωγικών κινητήρων είναι δυνατό να ελέγχεται με τον ίδιο τρόπο που αυτό γίνεται στους πολυφασικούς επαγωγικούς κινητήρες, όπως προαναφέραμε στο κεφάλαιο «Επαγωγικοί Κινητήρες». Στους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα είναι διαθέσιμες οι παρακάτω τεχνικές:

1. Μεταβολή της συχνότητας στο στάτη.
2. Μεταβολή του αριθμού των πόλων.
3. Μεταβολή της τάσης εισόδου V_T

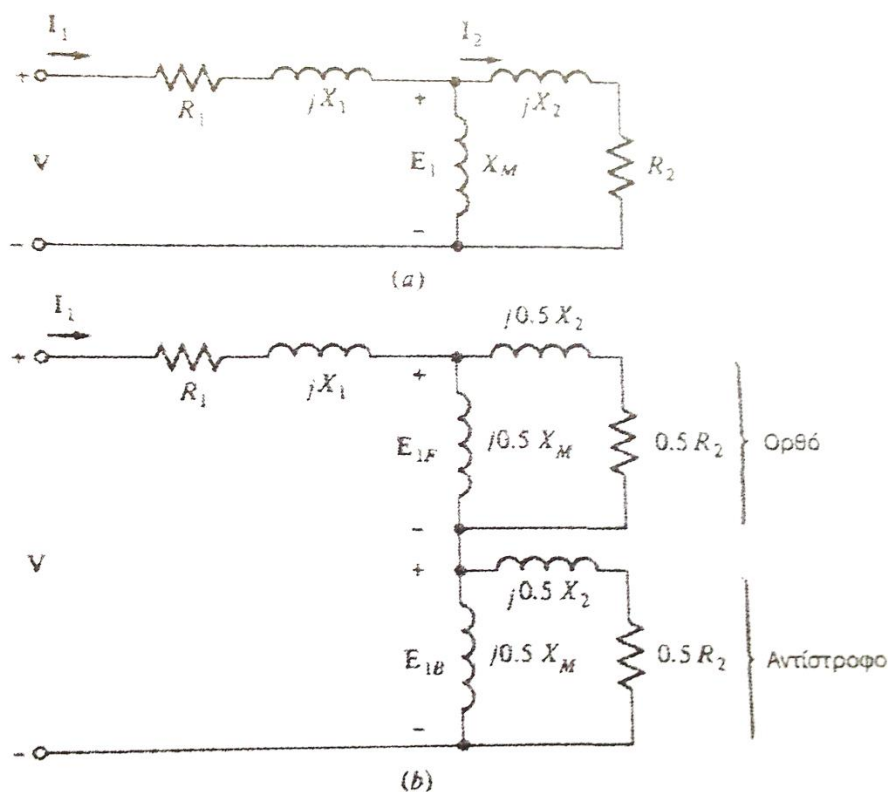
Σε πρακτικές εφαρμογές, όπου εμπλέκονται κινητήρες με σχετικά μεγάλη ολίσθηση, η πιο συνηθισμένη μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας είναι η ρύθμιση της τάσης εισόδου του κινητήρα. Η τάση που εφαρμόζεται σ' έναν κινητήρα είναι δυνατό να μεταβάλλεται μ' έναν από τους τρεις παρακάτω τρόπους:

1. Είναι δυνατό να χρησιμοποιείται ένας αυτομετασχηματιστής για τη συνεχή ρύθμιση της τάσης γραμμής. Αυτή είναι η πιο δαπανηρή μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με ρύθμιση της τάσης και χρησιμοποιείται μόνο όταν απαιτείται πολύ ομαλή ρύθμιση της ταχύτητας.
2. Είναι δυνατό να χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα με SCR ή με TRIAC, όπου με έλεγχο φάσης μειώνεται η ενεργός τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στον κινητήρα. Μ' αυτή τη μέθοδο η εναλλασσόμενη κυματομορφή τεμαχίζεται όπως και κατά κάποιον τρόπο αυξάνονται ο θόρυβος και οι δονήσεις στον κινητήρα. Τα κυκλώματα ελέγχου με ηλεκτρονικούς διακόπτες είναι σχετικά φθηνότερα από τους αυτομετασχηματιστές και στις μέρες μας γίνονται όλο και περισσότερο κοινά.
3. Στο κύκλωμα του στάτη είναι δυνατό να εισάγεται μια αντίσταση σε σειρά. Πρόκειται για τη φθηνότερη μέθοδο ρύθμισης της τάσης, που παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι αρκετή ισχύς χάνεται στην αντίσταση, πράγμα που προκαλεί μείωση της συνολικής απόδοσης κατά τη μετατροπή της ισχύος. Στους κινητήρες πολύ μεγάλης ολίσθησης, όπως οι κινητήρες με βοηθητικούς πόλους, χρησιμοποιείται μια ακόμη μέθοδος ρύθμισης της ταχύτητας. Αντί να εισάγεται ένας ξεχωριστός αυτομετασχηματιστής με σκοπό τη μεταβολή της τάσης που εφαρμόζεται στο στάτη του κινητήρα, το ίδιο τύλιγμα του στάτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αυτομετασχηματιστής.

3.5 Ισοδύναμο Κύκλωμα Ενός Μονοφασικού Επαγωγικού Κινητήρα

Το καλύτερο σημείο εκκίνησης για την ανάλυση ενός μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα είναι η εξέταση του κινητήρα, όταν αυτός είναι ακινητοποιημένος. Σ' αυτή την περίπτωση ο κινητήρας συμπεριφέρεται όπως ακριβώς ένας μονοφασικός μετασχηματιστής με το δευτερεύον τύλιγμά του βραχυκυκλωμένο κι έτσι ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα είναι ένας μετασχηματιστής. Αυτό το κύκλωμα φαίνεται στο **Σχ.37α**. Σ' αυτό το σχήμα R_1 και X_1 είναι η αντίσταση και η αντίδραση του τυλίγματος στο στάτη, X_M είναι η αντίδραση μαγνήτισης, R_2 και X_2 είναι οι ανοιγμένες στο πρωτεύον τιμές της αντίστασης και της αντίδρασης του δρομέα.

Όπως έχει αναφερθεί η παλλόμενη μαγνητική ροή στο διάκενο του ακινητοποιημένου κινητήρα είναι δυνατό να διαιρεθεί σε δύο ίσα και αντίθετα μαγνητικά πεδία στο εσωτερικό του κινητήρα. Επειδή αυτά τα πεδία είναι του ίδιου μεγέθους και τα δύο προκαλούν τις ίδιες ωμικές και επαγωγικές πτώσεις τάσης στο κύκλωμα του δρομέα. Επίσης είναι δυνατός ο διαχωρισμός του ισοδύναμου κυκλώματος του δρομέα σε δύο τμήματα, ώστε το καθένα να αντιστοιχεί στις επιδράσεις μόνο του ενός πεδίου. Το ισοδύναμο κύκλωμα στο οποίο οι επιδράσεις του ορθού και αντίστροφου πεδίου διαχωρίζονται μεταξύ τους φαίνεται στο **Σχ.37β**.



ΣΧΗΜΑ 37

4 ΔΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

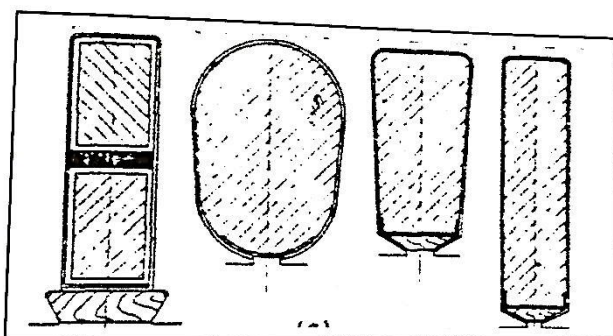
4.1 Κατασκευαστικά Στοιχεία

Μια ηλεκτρική μηχανή επαγωγής αποτελείται ουσιαστικά από ένα σταθερό μέρος, τον στάτη, ο οποίος έχει στα αυλάκια του ένα μονοφασικό, διφασικό ή τριφασικό τύλιγμα, και ένα στρεφόμενο μέρος τον δρομέα. Οι μηχανές επαγωγής μπορούν να λειτουργήσουν τόσο σαν κινητήρες όσο και σαν γεννήτριες. Σαν γεννήτριες όμως σπανίως χρησιμοποιούνται για λόγους οικονομικούς.

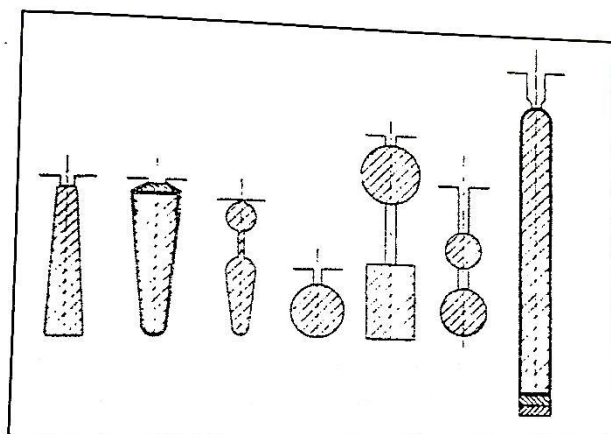
Όταν το τύλιγμα του στάτη του κινητήρα τροφοδοτείται από συμμετρική πηγή θα δημιουργηθεί στο διάκενο μαγνητικό πεδίο που στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα. Το στρεφόμενο πεδίο του διακένου επάγει τάσεις στα τυλίγματα του δρομέα το οποίο αποτελείται από κλειστά κυκλώματα. Οι τάσεις αυτές έχουν ως αποτέλεσμα την ροή ρευμάτων στα τυλίγματα του δρομέα και την δημιουργία κύματος ΜΕΔ το οποίο στρέφεται ως προς τον στάτη με την σύγχρονη ταχύτητα. Η αλληλεπίδραση των δύο πεδίων στάτη και δρομέα ή και του συνισταμένου πεδίου του διακένου και του πεδίου του δρομέα προκαλεί την ροπή της μηχανικής επαγωγής.

Η πολυφασική μηχανή επαγωγής, όταν ο δρομέας μένει ακίνητος, μπορεί να θεωρηθεί σαν μετασχηματιστής στον οποίο το παλλόμενο πεδίο έχει αντικατασταθεί από στρεφόμενο πεδίο. Η μόνη διαφορά είναι η ύπαρξη διακένου στη μηχανή επαγωγής η οποία γι' αυτό απαιτεί πολύ μεγαλύτερο ρεύμα διεγέρσεως που φθάνει το 40% του ονομαστικού ρεύματος αυτής.

Για τον κατά το δυνατό περιορισμό της συνισταμένης ΜΕΔ του διακένου που είναι αναγκαία για το πεδίο του διακένου λαμβάνονται κατασκευαστικά μέτρα ως εξής: Πρώτο τα αυλάκια του στάτη διαμορφώνονται μισόκλειστα ενώ του δρομέα μισόκλειστα ή τελείως κλειστά. Δεύτερο το διάκενο μεταξύ του στάτη και δρομέα γίνεται μικρό. Το Σχ.1 δείχνει μερικές μορφές αυλακιών για τον στάτη (α) και για τον δρομέα (β).



(α)



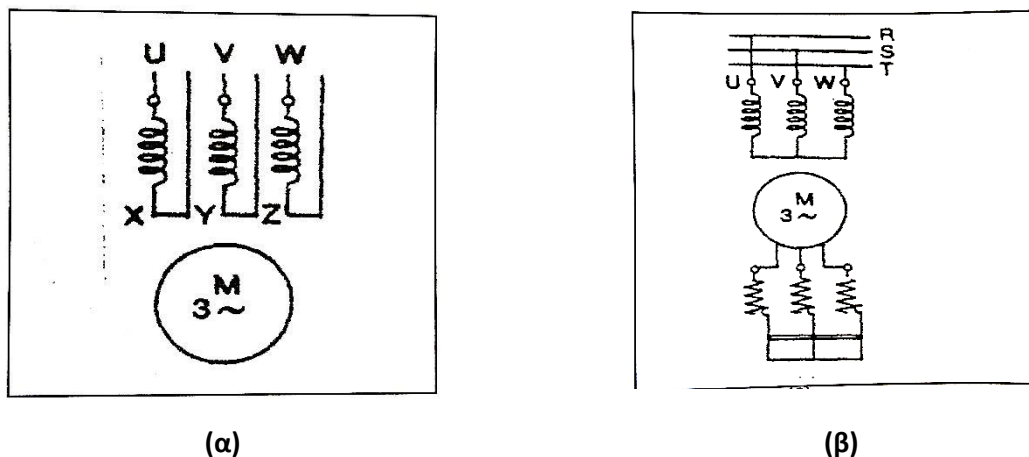
(β)

ΣΧΗΜΑ 1

Πιο σπάνια χρησιμοποιούνται τα ανοιχτά αυλάκια. Από απόψεως κατασκευής του τυλίγματος τα ανοιχτά αυλάκια είναι πια άνετα. Εν τούτοις χρησιμοποιούνται κατά το πλείστο μισόκλειστα αυλάκια γιατί τα ανοιχτά παρουσιάζουν πολλά μειονεκτήματα. Επειδή το διάκενο στις μηχανές επαγωγής είναι μικρά, τα ανοιχτά αυλάκια θα απαιτούσαν ένα υψηλό ρεύμα μαγνητίσεως. Επίσης προκαλούνται ισχυρές διακυμάνσεις του πεδίου του στάτη (αρμονικές χώρου) οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα μεγάλες απώλειες στον δρομέα ιδιαίτερα με τύλιγμα κλωβού, τέλος παράγονται ανεπιθύμητες αρμονικές ροπές. Για τους λόγους αυτούς, ανοικτά αυλάκια στον στάτη χρησιμοποιούνται μονά σε μηχανές επαγωγής υψηλής τάσεως. Ο πυρήνας του στάτη συντίθεται από ελάσματα χάλυβος πάχους συνήθως 0,3 έως 0,6π5η που φέρουν μόνωση από επικάλυψη με βερνίκι ή με ένα οξειδίο. Τα ελάσματα συσφίγγονται με φλάντζες. Με όμοια ελάσματα κατασκευάζεται και το σώμα του δρομέα. Λόγω της χαμηλής συχνότητας στον δρομέα μπορεί να χρησιμοποιηθούν παχύτερα ελάσματα χωρίς υπερβολική αύξηση των απωλειών σιδήρου.

Τα τυλίγματα του στάτη εισάγονται στα αυλάκια είτε ως τυλίγματα πηνία είτε τυλίγονται μέσα στα αυλάκια είτε ως προκατασκευασμένα πηνία. Τα τυλιγμένα πηνία χρησιμοποιούνται για μηχανές μικρής η πολύ μικρής ισχύος και για στρογγυλούς αγωγούς διαμέτρου μέχρι 2,3πιη περίπου. Τα τυλίγονται έξω από την μηχανή σε καλούπια και μετά εισάγονται στα μισόκλειστα αυλάκια πάλι από την σχισμή τους. Στη δεύτερη περίπτωση τα πηνία τυλίγονται μέσα στα μισόκλειστα αυλάκια πάλι από τη σχισμή αφού προηγουμένως τοποθετηθεί σε αυτές η μόνωση αυλακιού. Τέλος τα προκατασκευασμένα και μονωμένα αλλά χωρίς τη μια κεφαλή (ακραία σύνδεση). Αφού το πηνίο αυτό τοποθετηθεί στη θέση του η κεφαλή που λείπει συγκολλιέται στη θέση της.

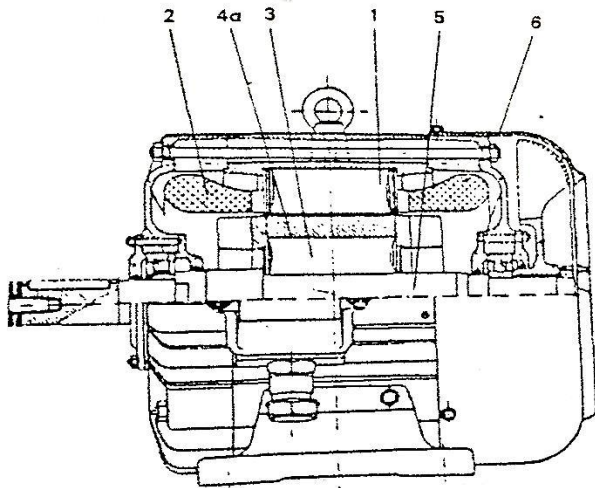
Κατασκευάζονται δύο τύποι δρομέων (α) με τύλιγμα κλωβού ή βραχυκυκλωμένου δρομέα και (β) με τυλιγμένο δρομέα ή με δακτυλίους. Η συμβολική παράσταση των δρομέων αυτών φαίνονται στο Σχ.2. Μια Τρίτη κατασκευή του δρομέα είναι (γ) ο δρομέας χωρίς αυλάκια ο οποίος χρησιμοποιείται για κινητήρες μεγάλης ταχύτητας σε συστήματα κινήσεως ή για κινητήρες μικρής ισχύος στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου.



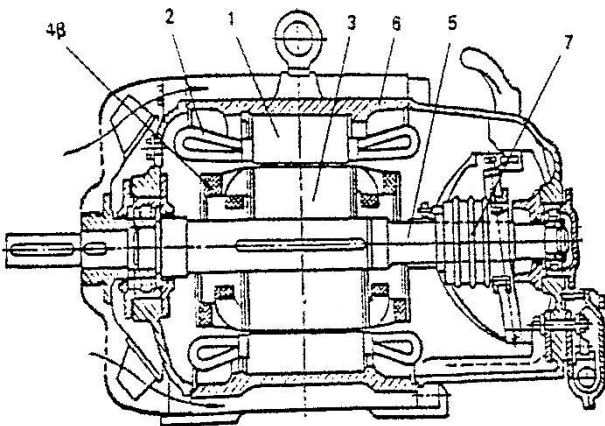
ΣΧΗΜΑ 2

Η δομή των κινητήρων επαγωγής με δρομείς τύπου (α) και (β) φαίνεται στα σχήματα 3 έως 4. Στα σχήματα αυτά οι αριθμοί παριστούν τα κύρια μέρη των κινητήρων επαγωγής ως εξής:

- 1) ο σίδηρος του στάτη
- 2) τα ακραία τυλίγματα του στάτη (κεφαλές)
- 3) ο σίδηρος του δρομέα
- 4) το τύλιγμα του δρομέα : 4α τύλιγμα κλωβού, 40 κανονικό τύλιγμα
- 5) ο άξονας
- 6) το κέλυφος
- 7) οι δακτύλιοι για κινητήρες με δακτυλίους.



ΣΧΗΜΑ 3



ΣΧΗΜΑ 4

4.2 Τυλίγματα Δρομέα

4.2.1 Δρομέας Χωρίς Αυλάκια

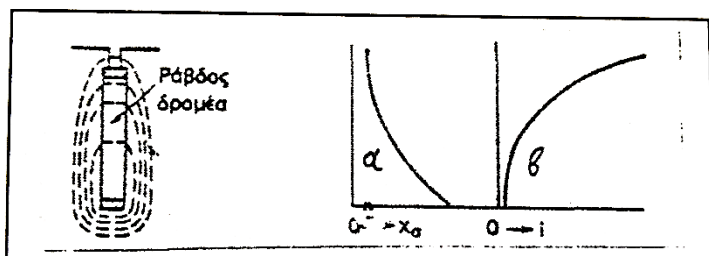
Οι δρομείς αυτοί κατασκευάζονται συνήθως από ολόσωμο σίδηρο όπου επάγονται διανορεύματα ώστε να προκύψει χρήσιμη ροπή. Εντούτοις ο βαθμός αποδόσεως, ο συντελεστής ισχύος και η ικανότης υπερφορτίσεως ενός τέτοιου κινητήρα δεν είναι ευνοϊκοί. Οι κινητήρες με ολόσωμους δρομείς χρησιμοποιούνται για συστήματα κινήσεως με υψηλό αριθμό στροφών ανά λεπτό επειδή έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή. Αναπτύσσουν σχετικά μεγάλη ροπή εκκινήσεως και μικρό ρεύμα εκκινήσεως. Για την βελτίωση των ιδιοτήτων τους ενίοτε κατασκευάζεται ο δρομέας από στρώματα κατάλληλων υλικών. Η απλούστερη κατασκευή αυτού του τύπου είναι η τοποθέτηση φύλλου χαλκού επί της κυλινδρικής επιφανείας του ολόσωμου σίδηρου.

Τέλος οι κινητήρες πολύ μικρής ισχύος για τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου έχουν τον σίδηρο στο δρομέα ακίνητο ενώ το στρεφόμενο μέρος του δρομέα κατασκευάζεται από αλουμίνιο, έχει δε την μορφή κύπελλου με ένα μόνο έδρανο. Το κύπελλο περιβάλλει το σιδερένιο ακίνητο μέρος του δρομέα ενώ ο στάτης από σίδηρο περιβάλλει το κύπελλο.

4.2.2 Δρομέας με Αυλάκια

Ένας έξυπνος και απλός τρόπος για να λάβουμε αντίσταση δρομέα η οποία να μεταβάλλεται αυτόματα με την ταχύτητα, κάνει χρήση του γεγονότος ότι σε κατάσταση στάσεως η συχνότητα του δρομέα ισούται με την συχνότητα του στάτη. Καθώς ο κινητήρας επιταχύνεται, η συχνότητα του δρομέα ελαττώνεται σε μια πολύ χαμηλή τιμή 2 ή 3 Hz υπό πλήρες φορτίο για κινητήρα 50Hz . Χρησιμοποιώντας ράβδους δρομέα με κατάλληλη μορφή και διάταξη, οι δρομείς κλωβού μπορούν να σχεδιασθούν ώστε η ενεργός αντίσταση τους στη συχνότητα των 50Hz, να είναι αρκετές φορές την αντίσταση στη συχνότητα των 3Hz . Οι διάφορες μέθοδοι κάνουν χρήση της επαγωγικής επιδράσεως της ροής σκεδάσεως του αυλακιού του επί της διανομής του ρεύματος στη διατομή των ράβδων του δρομέα. Τα φαινόμενα αυτά είναι γνωστά ως το επιδερμικό φαινόμενο και το φαινόμενο γειτνιασεως σε οποιοδήποτε σύστημα αγωγών οι οποίοι διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Τα φαινόμενα αυτά μελετώνται από τη θεωρία των δινορρευμάτων.

Θεωρούμε τώρα δρομέα με τύλιγμα κλωβού που έχει βαθιές στενές ράβδους (Σχ.5). Ο γενικός χαρακτήρας του πεδίου σκεδάσεως αυλακιού που παράγεται από το ρεύμα το οποίο διαρρέει την ράβδο, μέσα στο αυλάκι, δείχνεται στο σχήμα αυτό. Εάν ο σίδηρος του δρομέα έχει άπειρη διαπερατότητα, όλες οι γραμμές σκεδάσεως ροής θα έκλειναν σε δρόμους που περνούν κάτω από το αυλάκι. Ας φαντασθούμε τώρα ότι η ράβδος αποτελείται από άπειρο αριθμό στρωμάτων διαφορετικού πάχους. Στο σχήμα δείχνονται δύο τέτοια στρώματα διαγραμμισμένα, ένα κάτω και ένα άνω. Η αυτεπαγωγή σκεδάσεως του κάτω στρώματος είναι μεγαλύτερη από αυτήν του άνω στρώματος επειδή το κάτω στρώμα εμπλέκει περισσότερη ροη. Όλα όμως τα στρώματα είναι από ηλεκτρικής απόψεως παράλληλα.

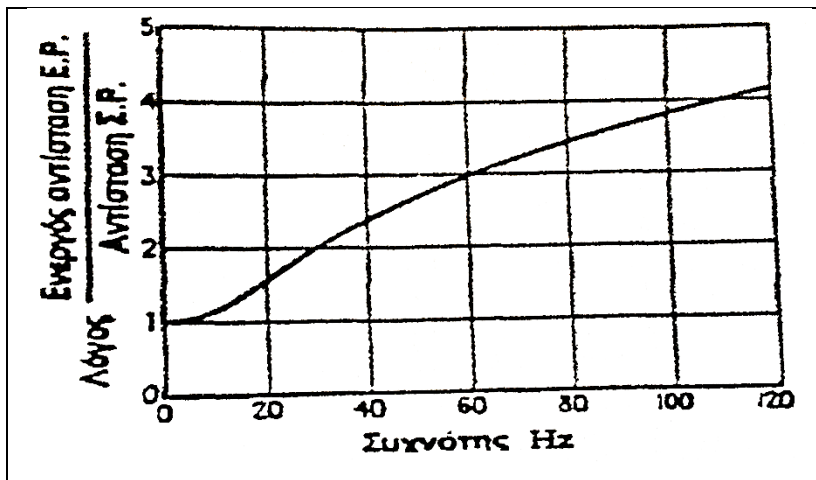


ΣΧΗΜΑ 5

(α) μεταβολή της αντίδρασης σκεδάσεως
(β) μεταβολή της πυκνότητας ρεύματος

Συνεπώς εφόσον η ράβδος διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, η πυκνότητα ρεύματος στα άνω στρώματα τα οποία έχουν χαμηλή αντίδραση θα είναι υψηλότερη από την πυκνότητα ρεύματος στα κάτω στρώματα τα οποία έχουν υψηλή αντίδραση. Έτσι το ρεύμα εκτοπίζεται από τα κάτω στρώματα προς τα άνω. Επιπλέον στα άνω στρώματα το ρεύμα προηγείται του ρεύματος στα κάτω στρώματα. Η μη ομοιόμορφη διανομή ρεύματος στη διατομή της ράβδου έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της ενεργού αντιστάσεως της ράβδου ενώ η ενεργός αυτεπαγωγή σκεδάσεως αυτής ελαττώνεται αλλά λιγότερα. Εφόσον δε η παραμόρφωση της διανομής ρεύματος εξαρτάται από το φαινόμενο της επαγωγής η ενεργός αντίσταση είναι συνάρτηση της συχνότητας. Είναι επίσης συνάρτηση του βαθμού της ράβδου καθώς και της διαπερατότητας και ειδικής αντιστάσεως του υλικού της ράβδου.

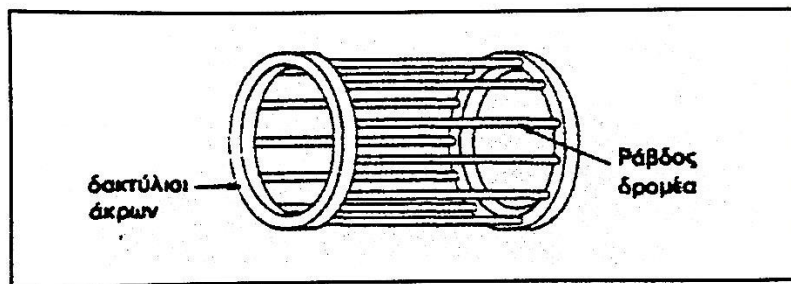
Είναι φανερό ότι η απώλεια Joule σε ένα αγωγό θα είναι μεγαλύτερη όταν αυτός διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα παρά από συνεχές ρεύμα. Η διαφορά ονομάζεται πρόσθετη απώλεια. Το Σχ.6 δείχνει μια καμπύλη του λόγου της ενεργού αντιστάσεως E.P. προς την αντίσταση Σ.Ρ. σαν συνάρτηση της συχνότητας υπολογισμένη για μία ράβδο βάρους 25mm. Είναι δυνατό να σχεδιασθεί δρομέας ο οποίος να έχει ενεργό αντίσταση στη συχνότητα του στάτη αρκετές φορές την αντίσταση του στο συνεχές ρεύμα. Καθώς ο κινητήρας επιταχύνεται, η συχνότητα του δρομέα ελαττώνεται και γι' αυτό η ενεργός αντίσταση του δρομέα επίσης ελαττώνεται και πλησιάζει την τιμή Σ.Ρ. σε χαμηλές ολισθήσεις.



ΣΧΗΜΑ 6

4.2.3 Δρομέας Απλού Κλωβού

Αποτελεί το απλούστερο τύλιγμα για τον δρομέα ενός κινητήρα επαγωγής. Το τύλιγμα αποτελείται από αριθμό ράβδων από αλουμίνιο ή χαλκό κατά την διεύθυνση της γενέτειρας η με κάποια λοξότητα, λόγω αποφυγής μαγνητικού θορύβου, οι οποίες βραχυκυκλώνονται στα δύο άκρα με δακτυλίους από το ίδιο το υλικό (Σχ.7). Ο κλωβός από αλουμίνιο κατασκευάζεται με χύτευση. Ο κλωβός από χαλκό συντίθεται από τις ράβδους, που στην περίπτωση αυτή μπορεί να είναι μονωμένοι και στους δακτυλίους.



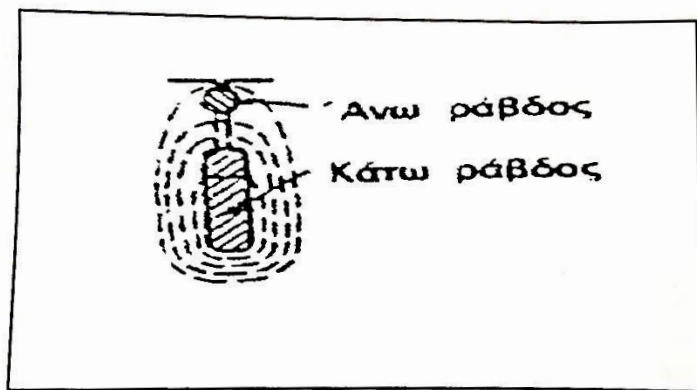
ΣΧΗΜΑ 7

Το τύλιγμα κλωβού με S_2 ράβδους μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα τύλιγμα με S_2 φάσεις με μια ράβδο ανά φάση. Έτσι οι S_2 φάσεις συνδέονται κατ'αστέρα με τον ίδιο δακτύλιο ενώ με τον άλλο δακτύλιο βραχυκυκλώνονται. Μια άλλη θεώρηση του τυλίγματος κλωβού είναι ότι έχει S_2/p φάσεις, όπου p ο αριθμός πόλων του συνεργαζόμενου στάτη. Κάθε φάση αποτελείται από συγκεντρωμένα πηνία ενός ελίγματος και με βήμα $\beta=180^\circ$ ηλεκτρικές μοίρες ενώ κάθε πηνίο είναι βραχυκυκλωμένο. Όλα τα πηνία του τυλίγματος κλωβού βραχυκυκλώνονται στα δύο ακραία τμήματά τους με τους δακτυλίους. Ένα τύλιγμα κλωβού μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρα με οποιοδήποτε αριθμό πόλων.

Για την βελτίωση των συνθηκών εκκινήσεως το τύλιγμα κλωβού κατασκευάζεται με υψηλές και στενές ράβδους ή με διπλό κλωβό.

4.2.4 Δρομέας διπλού κλωβού

Μια εναλλακτική μέθοδος για την απόκτηση ομοίων αποτελεσμάτων είναι η διάταξη διπλού κλωβού (Σχ.8), το τύλιγμα κλωβού αποτελείται από δύο στρώματα ράβδων, βραχυκυκλωμένων με δακτυλίους στα άκρα. Οι άνω ράβδοι έχουν μικρότερη διατομή από τις κάτω και συνεπώς έχουν υψηλότερη αντίσταση. Η γενική φύση του πεδίου σκεδάσεως αυλακιού φαίνεται στο Σχ.8 από το οποίο φαίνεται ότι η επαγωγή των κάτω ράβδων είναι μεγαλύτερη παρά στις άνω, λόγω της ροής η οποία διασταυρώνει τα αυλάκια μεταξύ των δύο στρωμάτων. Η διαφορά σε επαγωγή μπορεί να είναι αρκετά υψηλή εάν δοθεί κατάλληλη αναλογία μήκους στην στένωση του αυλακιού μεταξύ των δύο ράβδων. Στην στάση όταν η συχνότητα του δρομέα είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη, υπάρχει σχετικά λίγο ρεύμα στις κάτω ράβδους λόγω της μεγάλης αντίδρασής τους. Η ενεργός αντίσταση του δρομέα σε στάση τότε είναι κατά προσέγγιση ίση προς το άνω στρώμα υψηλής αντιστάσεως. Στις χαμηλές συχνότητες δρομέα οι οποίες αντιστοιχούν σε χαμηλές ολισθήσεις, όμως η αντίδραση είναι ασήμαντη και η αντίσταση του δρομέα τότε πλησιάζει εκείνη των δύο παράλληλων στρωμάτων.



ΣΧΗΜΑ 8

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι εφόσον η ενεργός αντίσταση και αυτεπαγωγή σκεδάσεως του δρομέα διπλού κλωβού και βαθιάς ράβδου μεταβάλλονται με την συχνότητα, οι παράμετροι r_2 και x_2 που αντιπροσωπεύουν τις αναθεϊσες επιδράσεις της αντιστάσεως του δρομέα και της αυτεπαγωγής σκεδάσεως αυτού καθώς βλέπονται από τον στάτη, δεν είναι σταθερές. Έτσι απαιτείται ένα πιο πολύπλοκο ισοδύναμο κύκλωμα εάν πρέπει να παραστήσουμε την συμπεριφορά του δρομέα ως συνάρτηση της επιδράσεως της συχνότητας ενώ συγχρόνως οι αντιστάσεις και αντιδράσεις να κρατηθούν σταθερές. Στο Σχ.9 φαίνεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα επαγωγής με διπλό κλωβό. Η κατασκευή αυτή είναι η πιο συνηθισμένη και γίνεται η παραδοχή ότι οι δακτύλιοι βραχυκυκλώσεως είναι διαφορετικοί για κάθε κλωβό. Στο ισοδύναμο κύκλωμα οι παράμετροι είναι οι εξής:

r_1, χ_1 = αντίσταση και αντίδραση σκεδάσεως του στάτη

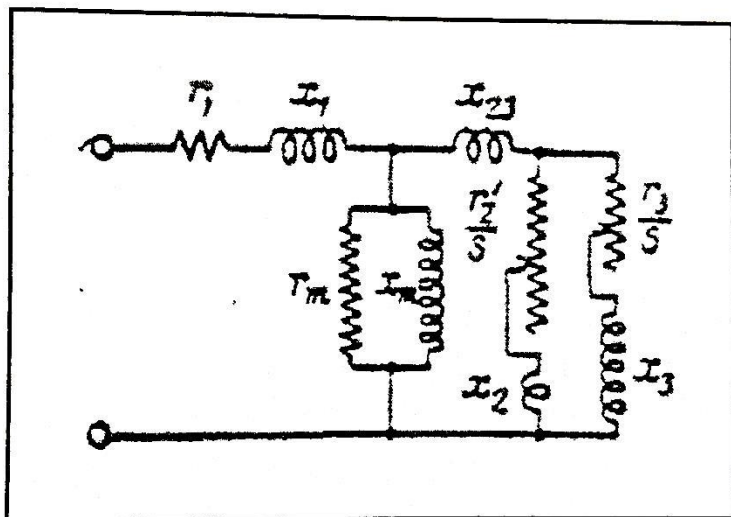
g_p, b_m = αγωγιμότητα και αγωγιμότητα αυτεπαγωγής μαγνητίσεως

χ_{23} = αλληλεπαγωγή των τυλιγμάτων 2 και 3 των δύο κλωβών ανοιγμένη στο στάτη

r_2, χ_2 = αντίσταση και αντίδραση σκεδάσεως του άνω κλωβού ανοιγμένες στο στάτη

r_3, χ_3 = αντίσταση και αντίδραση σκεδάσεως του κάτω κλωβού ανοιγμένες στο στάτη

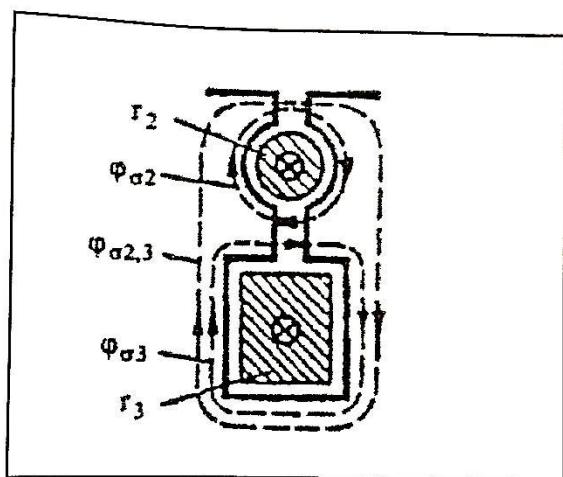
s = η ολίσθηση



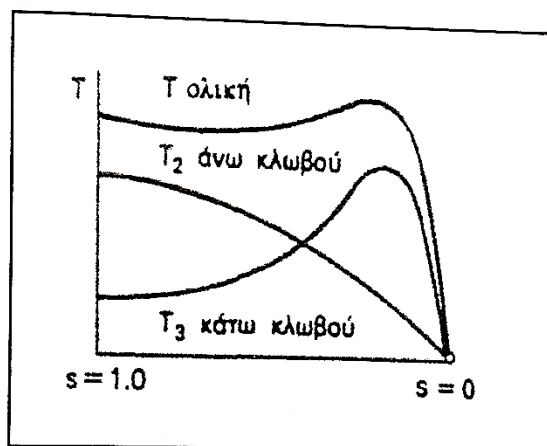
ΣΧΗΜΑ 9

Το **ΣΧΗΜΑ 10** δείχνει τους δρόμους των ροών σκεδάσεως του αυλακιού ενός διπλού κλωβού. Το **ΣΧΗΜΑ 11** δείχνει κατά προσέγγιση καμπύλες ροπής του άνω και του κάτω κλωβού καθώς και την συνολική καμπύλη ροπής και των δύο κλωβών.

Με τη βοήθεια του ισοδύναμου κυκλώματος είναι δυνατή η μελέτη επιδόσεως του κινητήρα διπλού κλωβού, ο δρομέας διπλού κλωβού μπορεί να έχει ένα δακτύλιο βραχυκυκλώσεως σε κάθε άκρο του. Επίσης οι δύο κλωβοί μπορεί να είναι σε διαφορετικά αυλάκια. Για όλες αυτές τις περιπτώσεις είναι αναγκαία η προσαρμογή του ισοδύναμου κυκλώματος.



ΣΧΗΜΑ 10



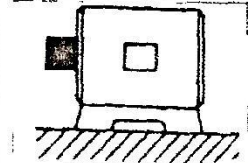
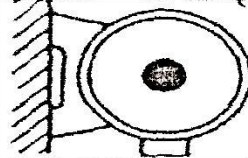
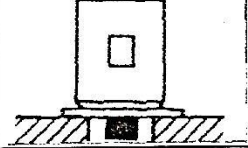
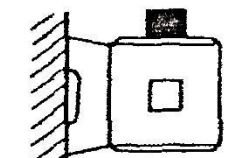
ΣΧΗΜΑ 11

5 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Σε μία ασύγχρονη (επαγωγική) ηλεκτρική μηχανή η τάση του δρομέα, η οποία με τη σειρά της παράγει το ρεύμα διέγερσης και το πεδίο του δρομέα, αναπτύσσεται εξ επαγωγής στο κύκλωμα διέγερσης, αντί να προσφέρεται σε αυτό με κάποια ηλεκτρική σύνδεση. Το ακίνητο μέρος της επαγωγικής μηχανής είναι ο στάτης και το περιστρεφόμενο ο δρομέας. Μεταξύ των δύο αυτών τμημάτων της μηχανής υπάρχει διάκενο μεγέθους της τάξεως κλασμάτων του χιλιοστού. Μόνο σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων κινητήρων μπορεί το μέγεθος του διακένου να φτάσει στη τάξη μερικών χιλιοστών.

5.1 Τρόποι Κατασκευής Ηλεκτρικών Μηχανών

Οι τρόποι κατασκευής των ηλεκτρικών μηχανών είναι τυποποιημένοι (πίνακας 1). Σαν συντημητικό σύμβολο μετά από 1M * είναι ένα γράμμα και ένα ψηφίο που το ακολουθεί π.χ. 1MB 3 (σύμφωνα με τον κώδικα I). Οι διάφορες εφαρμογές έχουν τυποποιηθεί σε πολυάριθμους τρόπους κατασκευής. Με τη χρησιμοποίηση της τυποποίησης, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης κινητήρων ίδιου τρόπου κατασκευής, ίδιας ισχύος και ίδιων διαστάσεων για τις περιπτώσεις εφαρμογών καθορισμένου σκοπού.

Πίνακας 1. Τρόποι κατασκευής μηχανών (σύμφωνα με DIN IEC 34)		
IEC Code I Code II	Τρόποι κατασκευής	Χαρακτηριστικά
IMB 3 IM 1001		Δύο έδρανα, ένα ελεύθερο άκρο του άξονα, πόδια στήριξης σε όρθια τοποθέτηση
IMB 6 IM 1051		Όπως IMB 3, στήριξη στον τοίχο, τα πόδια - κοιτάζοντας πάνω στον άξονα - είναι αριστερά
IMV 1 IM 3011		Δύο έδρανα οδήγησης, φλάντζα στήριξης, η φλάντζα και ο ελεύθερος άξονας είναι κάτω
IMV 6 IM 1031		Δύο έδρανα οδήγησης, πόδια στήριξης για στήριξη στον τοίχο, ελεύθερο άκρο του άξονα είναι πάνω

*International mounting = διεθνώς θεωρούμενα

5.2 Κατηγορίες Μονωτικών Υλικών

Στις ηλεκτρικές μηχανές οι δημιουργούμενες απώλειες μετατρέπονται σε θερμότητα. Η υπερυψηλή θερμοκρασία καταστρέφει τη μόνωση και αχρηστεύει τη μηχανή.

Η θερμοκρασία στα τυλίγματα και σε άλλα τμήματα της μηχανής αυξάνει κατά τη λειτουργία της, μέχρι να δημιουργηθεί ισορροπία μεταξύ της απολεσθείσας θερμότητας και της επαγομένης θερμότητας. Λόγω της θερμοκρασιακής ευαισθησίας της μόνωσης του τυλίγματος (**πίνακας 2**) η θερμοκρασία δεν πρέπει να υπερβαίνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη μόνιμη θερμοκρασία. Η επιτρεπόμενη προσαύξηση της θερμοκρασίας ονομάζεται οριακή υπερθερμοκρασία. Αυτή αναφέρεται ως υπερθερμοκρασία πάνω από την θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου, σε ψύξη με αέρα πάνω από τη θερμοκρασία χώρου από 40°C (και αφαιρώντας μια απόσταση ασφαλείας από περίπου 10K). Σύμφωνα με τους κανονισμούς για ηλεκτρικές μηχανές για μια μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος από 40°C στα τυλίγματα επιτρέπονται οριακές υπερθερμοκρασίες από 75K μέχρι 100K. Μαρμαρυγίας, αμίαντος και προϊόντα από γυαλί, όπως και σιλικόνες επιτρέπουν οριακές μερικές υπερθερμοκρασίες γύρω στα 125K. Σε έδρανα ολίσθησης και κυλινδροτριβείς το όριο είναι της τάξης από 45K μέχρι 65K. Η οριακή υπερθερμοκρασία είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία πάνω από 40°C μείον μίας ασφάλειας της τάξης των 10K περίπου.

Πίνακας 2: Κατηγορίες μονωτικών υλικών για ηλεκτρικές Μηχανές (DIN VDE 0530)		
Κατηγορία	Μέγιστη επιτρεπόμενη διαρκής θερμοκρασία σε °C	Μονωτικά υλικά (παραδείγματα)
E	120	Σκληρό χαρτί, σκληρυμένες πεπιεσμένες μάζες, φύλλα πλαστικά
B	130	Αμίαντος, γυαλί, μίκα με συνδετικά υλικά, βερνίκια από πλαστική ρητίνη της τάξης B
P	155	Υάλινες, αμίαντος και μίκα με εμποτισμό σε πλαστικές ρητίνες
H	180	Σιλικόνη, μίκα, υάλινες εμποτισμένες με ελαστικό σιλικόνης

5.3 Συντήρηση και Έλεγχος των Ηλεκτρικών Μηχανών

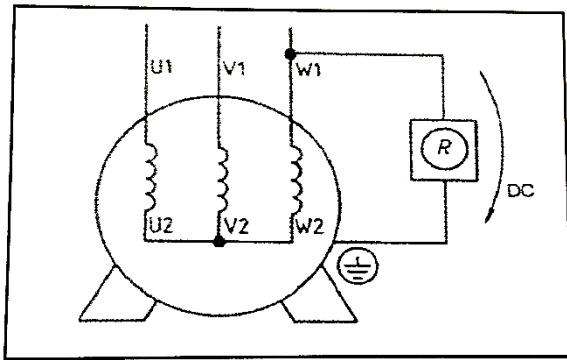
Οι σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές δεν απαιτούν μεγάλη συντήρηση. Σε συνεχή χρήση κύριος σε βιοτεχνική κλίμακα, χρειάζονται κάποια συντήρηση (πίνακας 3).

Πίνακας 3: Χρονοδιάγραμμα συντήρησης ηλεκτροκινητήρων						
Χρονικό διάστημα	Είδος κινητήρα			Έδρανο		
	K	Sch	St	W	G	
Κάθε 1 μέχρι 2 μήνες		X	X			Έλεγχος των ψηκτρών του ψηκτροφορέα, της διάταξης ανύψωσης των ψηκτρών και των δακτυλίων ολίσθησης ή του συλλέκτη
Κάθε 3 μέχρι 4 μήνες	X	X	X			Έλεγχος των ακροδεκτών σύνδεσης
		X	X			Έλεγχος της πίεσης των ψηκτρών
Κάθε χρόνο (τουλάχιστον)	X	X	X			Μέτρηση της μονωτικής αντίστασης των τυλιγμάτων
	X	X	X			Καθαριστής των τυλιγμάτων στέγνωμα υγρών τυλιγμάτων
	X	X	X			Μέτρηση της θερμοκρασίας του τυλίγματος
		X	X			Έλεγχος ακριβείας των ψηκτρών, του ψηκτροφορέα και της κατάστασης των δακτυλίων ολίσθησης και του συλλέκτη
				X	X	Έλεγχος ακριβείας των εδράνων και μέτρηση της θερμοκρασίας στα έδρανα
Κάθε 1 με 2 χρόνια					X	Καθορισμός των υποδοχών των εδράνων, ανανέωση του λαδιού στα έδρανα
Κάθε 2 με 3 χρόνια				X		Καθορισμός των εδράνων, εκ νέου λίπανση σε κινητήρες χωρίς διάταξη λίπανσης
K δρομέας σε μορφή κλωβού, Sch δακτυλιοφόρος δρομέας, St κινητήρας με συλλέκτη, W έδρανο κύλισης, G έδρανο ολίσθησης						

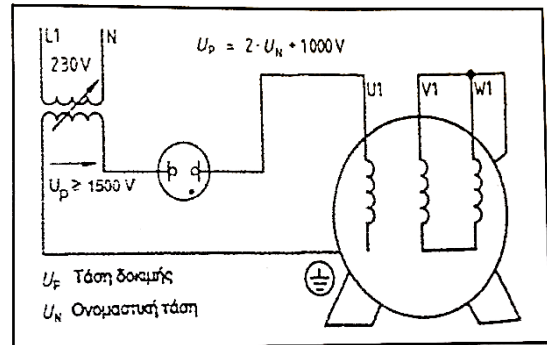
Η μέτρηση της μονωτικής αντίστασης γίνεται με ωμόμετρο του οποίου η ονομαστική τάση είναι τουλάχιστον 500V DC (Σχ.13). Η μονωτική αντίσταση διαφέρει από μηχανή σε μηχανή συνάρτηση της κατηγορίας και του μεγέθους αυτής. Η μονωτική αντίσταση πρέπει να είναι τόσα ΚΩ όσα η αριθμητική τιμή της ονομαστικής τάσης ως προς τη γη, σε 220V λοιπόν αντιστοιχούν τουλάχιστον 220ΚΩ. Σε κινητήρες για ηλεκτρικές συσκευές από επισκευή η μονωτική αντίσταση πρέπει να είναι 0,5 ΜΩ σύμφωνα με DIN VDE 0701.

Η δοκιμή τυλίγματος προβλέπεται από τους κανονισμούς, στην περίπτωση που ένα τύλιγμα επισκευάστηκε πλήρως ή μερικώς. Η δοκιμή γίνεται με μια τάση συχνότητας περίπου 50Hz, π.χ. από έναν ρυθμιζόμενο μετασχηματιστή (Σχ.14). Το ύψος της τάσης δοκιμής εξαρτάται από την ονομαστική τάση της μηχανής. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής δεν πρέπει να υπάρξει διάσπαση (διάτρηση). Αυτό ελέγχεται από έναν λαμπτήρα αίγλης που συνδέεται σε σειρά.

Ο ισοζυγισμός είναι απαραίτητος στους δρομείς των ηλεκτρικών μηχανών λόγω της άνισης κατανομής της μάζας κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή των επισκευών. Οι ανισότητες κατανομής της μάζας μετρώνται με μηχανήματα ισοζυγισμού και εξουδετερώνονται με αφαίρεση ή με πρόσθεση υλικού.



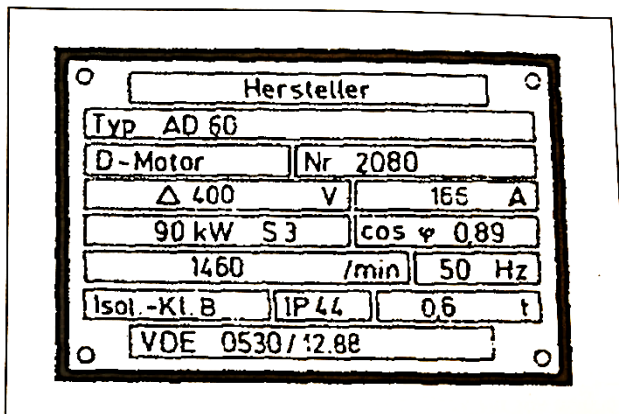
Σχ.13: Μέτρηση της μονωτικής αντίστασης



Σχ.14: Δοκιμή του τυλίγματος σε κινητήρα με Βραχυκυκλωμένο Δρομέα

5.4 Πινακίδα

Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά στοιχεία μιας μηχανής αναφέρονται στην πινακίδα (Σχ.15). Στα στοιχεία αυτά ανήκουν: ονομασία του κατασκευαστή, τύπος, κατηγορία μηχανής, ονομαστική τάση και ονομαστικό ρεύμα καθώς η ονομαστική ισχύς (απόδοση ισχύος στον άξονα), η οποία ισχύει για τον αναφερόμενο τρόπο λειτουργίας. Όταν ο τρόπος λειτουργίας δεν αναφέρεται, τότε η μηχανή είναι υπολογισμένη για μόνιμη λειτουργία. Επίσης στην πινακίδα αναφέρεται ο συντελεστής ισχύος $\cos\phi$, ο ονομαστικός αριθμός στροφών και η συχνότητα της τάσης σύνδεσης. Τέλος αναφέρονται η κατηγορία μόνωσης και ο τρόπος προστασίας. Η απορρόφηση ισχύος σε ονομαστική λειτουργία κινητήρα υπολογίζεται από τα στοιχεία που αναφέρονται στην πινακίδα.



3~Mot BN 63B 4				No60278000286	
Cod. 830520106				IM B5 IP 55	
V Δ/Y	I _{CL}	F	S 1	cos φ	
	Hz	kW	A Δ/Y	min-1	
230/400	50	0.18	1.23 - 0.71	1320	0.67
460	60	0.21	0.69	1630	
220/240	VΔ	1.25-1.28	A	50Hz	
380/415	VY	0.72-0.74	A		
440/480	VY	0.68-0.71	A	60Hz	

Σχ.15: Πινακίδα ισχύος ενός τριφασικού κινητήρα

6 ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

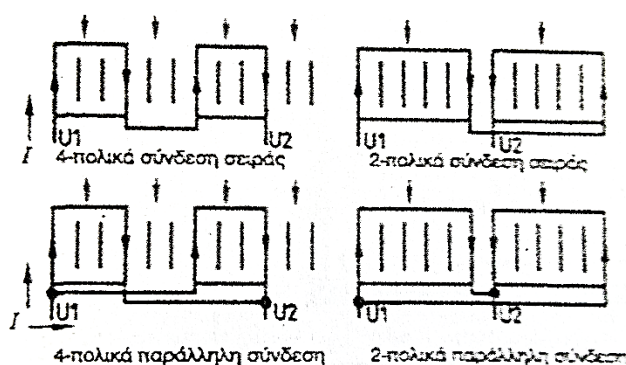
6.1 Τριφασικά Τυλίγματα

Ο αριθμός στροφών (συχνότητα περιστροφής) ενός τριφασικού κινητήρα αναφέρεται στην πινακίδα σε στροφές ανά λεπτό. Ο αριθμός στροφών ενός κινητήρα εξαρτάται από τον αριθμό ζευγών πόλων και από την συχνότητα. Ένα διπολικό τυλίγμα (ένα ζεύγος πόλων) προκαλεί έναν σύγχρονο αριθμό περιστροφής από $(60.50 \cdot 5^{-1}) = 3000 \text{ min}^{-1}$. Με ένα τετραπολικό τυλίγμα (δύο ζεύγη πόλων) επιτυγχάνονται $(60.50 \cdot 5^{-1}) : 2 = 1500 \text{ min}^{-1}$. Τα πηνία των τυλιγμάτων έχουν τη δυνατότητα να συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα (Σχ.1).

Το τυλίγμα είναι τοποθετημένο στα αυλάκια (εγκοπές, οδοντωτές) κατά την περιφέρεια του στάτη. Για την γραφική παράσταση του τυλιγματος θεωρούμε τον στάτη κομμένο σε ένα σημείο και απλωμένο σε ένα επίπεδο (Σχ.1) και για πιο απλή παράσταση αντί των αυλακιών σχεδιάζονται μόνο γραμμές. Οι πόλοι της μηχανής σχηματίζονται μεταξύ των πλευρών των πηνίων με διαφορετική φορά ρεύματος (Σχ.1).

Για την σχεδίαση ενός τυλιγματος πρέπει να είναι γνωστά τα εξής μεγέθη: ο αριθμός των αυλακιών Q και ο αριθμός πόλων $2p$ του κινητήρα. Επίσης καθορίζονται: ο αριθμός των φάσεων του τυλιγματος, ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο και φάση, το βήμα αυλακιών και η θέση των αρχικών άκρων του τυλιγματος.

Οι αριθμητικές τιμές για το βήμα αυλακιών το μέσο μήκος των πηνίων και για την υποδιαίρεση των πόλων, αναφέρουν πάντοτε τον αριθμό των απαραίτητων αυλακιών.



Σχήμα 1

$$\begin{aligned} \gamma Q &= W = \tau p \\ q &= Q / (2p \times m) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma Q &= (Q / 2p) - n \\ \tau p &= Q / 2p \end{aligned}$$

Q : αριθμός αυλακιών

$2p$: αριθμός πόλων (p αριθμός ζευγών πόλων)

q : αριθμός σπών (αριθμός αυλακιών ανά πόλο και φάση)

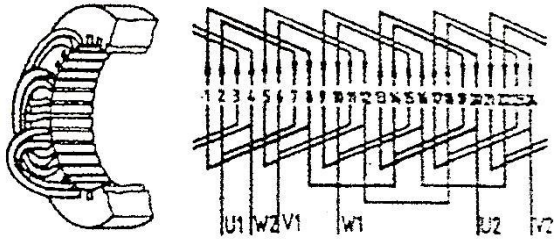
m : αριθμός φάσεων (σε τριφασικά τυλίγματα $m=3$)

W : μέσο μήκος πηνίου

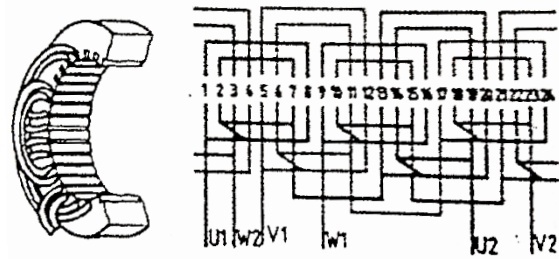
τp : υποδιαίρεση πόλων

π : αριθμός αυλακιών, κατά τον οποίο το βήμα τυλιγματος αποκλίνει από την υποδιαίρεση πόλων (1, 2, 3)

γQ : βήμα τυλιγματος σε υποδιαίρεσεις αυλακιών



Σχ.2:Τριφασικό δώροφο τύλιγμα με 4 πόλους



Σχ.3:Τριφασικό τύλιγμα κλωβού με 4 πόλους

6.1.1 Τυλίγματα ενός Στρώματος

Το τύλιγμα ενός στρώματος δημιουργείται, όταν σε κάθε αυλάκι βρίσκεται μόνο μια πλευρά του πηνίου. Όταν και οι δύο πλευρές του πηνίου ενσωματώνονται κατά σειρά στα αυλάκια, τότε δημιουργείται το **δώροφο τύλιγμα** (Σχ.2). Όταν τα πηνία τοποθετούνται έτσι ώστε κάθε μια πλευρά του πηνίου να βρίσκεται κάτω και η άλλη πάνω, δημιουργείται το **τύλιγμα κλωβού** (Σχ.3).

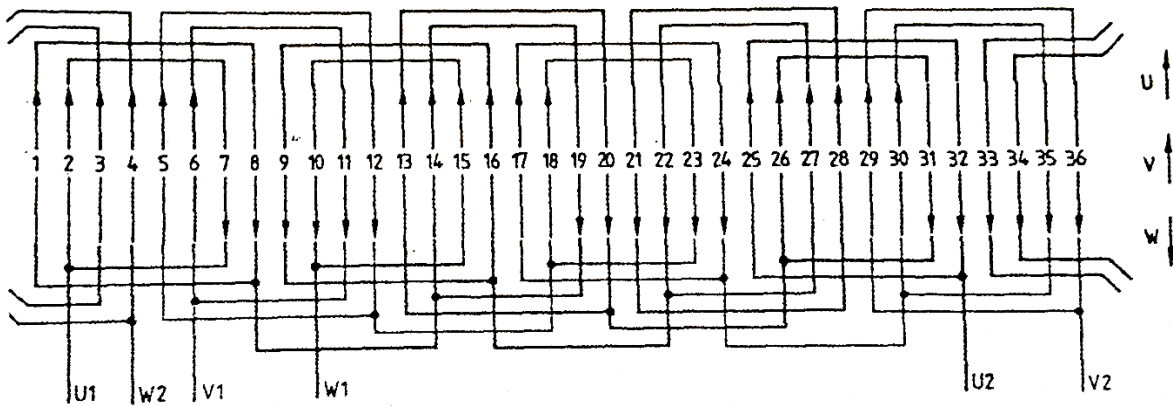
Στο χορδοειδή τύλιγμα για το βήμα αυλακιού YQ ισχύει: Από το πηλίκο του αριθμού αυλακιών Q δια του αριθμού πόλων $2p$, αφαιρείται ο αριθμός των αυλακιών κατά τον οποίο το βήμα τυλίγματος πρέπει να είναι μικρότερο από την υποδιαίρεση των πόλων. Ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο και τύλιγμα (αριθμός οπών) q λαμβάνεται αν ο αριθμός αυλακιών Q διαιρεθεί με το γινόμενο του αριθμού πόλων με τον αριθμό τυλιγμάτων m .

Τα χαρακτηριστικά στοιχεία ενός τυλίγματος σύμφωνα με το σχήμα **2** ή **3** υπολογίζονται ως εξής:

Βήμα τυλίγματος (βήμα αυλακιού): $YQ=Q/2p=24/4=6$, δηλαδή η αρχή του πηνίου στο αυλάκι 1 το τέλος του πηνίου 6 υποδιαιρέσεις αυλακιού παρακάτω στο αυλάκι 7 σε πηνία ίδιου μήκους (1:7): Σε πηνία άνισου μήκους (Σχ.2) 1:6,8: Αριθμός των αυλακιών ανά πόλο και φάση: $q=Q/(2pm)=24/(4.3)$. Έτσι σχηματίζεται ένα **τύλιγμα δύο οπών**. Απόσταση των αρχών τυλίγματος των 3 φάσεων (120°): $Q/(pm)=24/(2.3)=4$ αυλάκια. Άρα η αρχή του τυλίγματος $V1$ απέχει από $U1$ κατά 4 υποδιαιρέσεις αυλακιού.

Κατά την σχεδίαση αυτού του τυλίγματος των δύο οπών και για τις 3 φάσεις και αρχίζοντας με τη φάση U στο αυλάκι 1 και 2, τα αυλάκια 3 και 4 καθώς και τα αυλάκια 5 και 6 ανήκουν στις δύο επόμενες φάσεις. Τα αυλάκια 7 και 8 ανήκουν και πάλι στη φάση U (Σχ.2). Από αυτό προκύπτει το βήμα τυλίγματος YQ . Για τον έλεγχο της ορθής διαδοχής σημειώνονται βέλη για τη φορά του ρεύματος. Σε ένα τετραπολικό τύλιγμα η φορά του βέλους πρέπει να αλλάζει 4 φορές. Σ' αυτό πρέπει να δοθεί προσοχή: τα βέλη για τη φορά ρεύματος για μια φάση πρέπει να σημειώνονται αντίρροπα, π.χ. U αύξαν, V αύξαν, W μείων, επειδή το άθροισμα των στιγμιαίων τιμών των τριών ρευμάτων φάσης πρέπει να ισούται με μηδέν.

Στα τυλίγματα κινητήρων ο αριθμός a (αριθμός των αυλακιών ανά πόλο και φάση) πρέπει να είναι ένας ακέραιος αριθμός (βλέπε το παρακάτω παράδειγμα). Τα τυλίγματά του είδους αυτού ονομάζονται **τυλίγματα ολόκληρης οπής**. Όταν για τον αριθμό q προκύπτει ένα κλάσμα π.χ. για ένα τετραπολικό τύλιγμα σε 30 αυλάκια. $9=30:(3.4)=2,5$, τότε προκύπτει ένα τύλιγμα κλάσματος οπής. Στους κινητήρες πρέπει να αποφεύγονται τα τυλίγματα κλάσματος οπής, επειδή σε θερμότητα, θόρυβο κίνησης και συμπεριφορά εκκίνησης δεν επιδρούν συνήθως ευνοϊκά. Στις γεννήτριες τα τυλίγματα κλάσματα οπής χρησιμοποιούνται σκόπιμα επειδή η μορφή της καμπύλης της τάσης προσεγγίζει μια ημιτονοειδή καμπύλη χωρίς αρμονικές.



Σχήμα 4: Εξαπολικό διώροφο – μονόστρωτο τύλιγμα με πηνία άνισου μήκους για 36 αυλάκια (λύση του παραδείγματος)

Σε κάθε φάση ο αριθμός των αυλακιών πρέπει να είναι ίδιος, επομένως ισχύει και για τυλίγματα κλάσματος οπής, ότι ο ολικός αριθμός αυλακιών πρέπει να διαιρείται με το 3.

Παράδειγμα: Για έναν τριφασικό κινητήρα με 36 αυλάκια πρέπει να σχεδιαστεί ένα εξαπολικό διώροφο τύλιγμα ενός στρώματος με πηνία άνισου μήκους. Υπολογίστε τα χαρακτηριστικά στοιχεία και κατασκευάστε το σχέδιο.

$\gamma_q = Q/2p = 36/6 = 6$, βήμα αυλακιού $1:6/8$, $q = Q/(2pm) = 36/(6 \cdot 3) = 2$ αυλάκια ανά πόλο και φάση, Απόσταση των αρχών του τυλίγματος για τις φάσεις U, V, W: $Q/(p \cdot m) = 36/(3 \cdot 3) = 4$ αυλάκια. Βλέπε (Σχ.4).

6.1.2 Τυλίγματα με δύο στρώματα

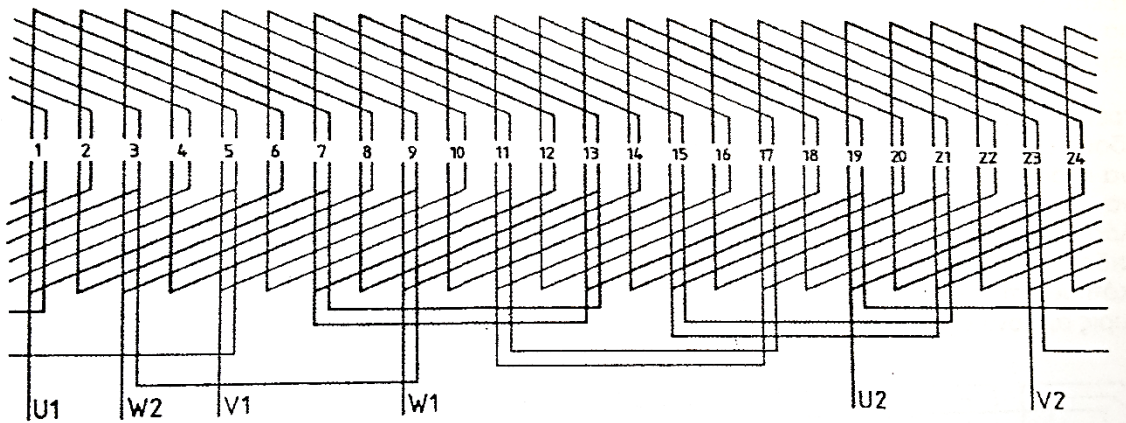
Στα τυλίγματα με δύο στρώματα (στρώσεις) πρέπει να υπάρχουν τόσα μερικά πηνία, όσα αυλάκια διαθέτει ο στάτης.

Σε κάθε αυλάκι βρίσκονται δύο πλευρές πηνίων, η κάτω πλευρά και η πάνω. Σε τυλίγματα με δύο στρώματα ο αριθμός των αυλακιών πρέπει να είναι διαιρούμενος με τον αριθμό των πόλων, ώστε να προκύπτει ένας ακέραιος αριθμός για το q .

Σε ομόκεντρα τυλίγματα το βήμα του αυλακιού ισούται με την υποδιαίρεση των πόλων. Στα τυλίγματα αυτά τα πάνω και τα κάτω πηνία που βρίσκονται σε ένα αυλάκι, ανήκουν στον ίδιο πόλο και στην ίδια φάση. Τα πηνία συνδέονται έτσι, ώστε στα ήμισυ των πηνίων ενός αυλακιού να υπάρχει η ίδια φορά ρεύματος.

Παράδειγμα: Για έναν τριφασικό κινητήρα με 24 αυλάκια πρέπει να σχεδιάσετε ένα τετραπολικό τύλιγμα δύο στρωμάτων με πηνία ίσου μήκους. Τα πηνία συνδέονται σε σειρά.

$U_q = Q/2p = 24/4 = 6$, βήμα αυλακιού $1:7$, $q = Q/2r \times m = 24/4 \times 3 = 2$ αυλάκια ανά πόλο και φάση. Βλέπε (Σχ.5).

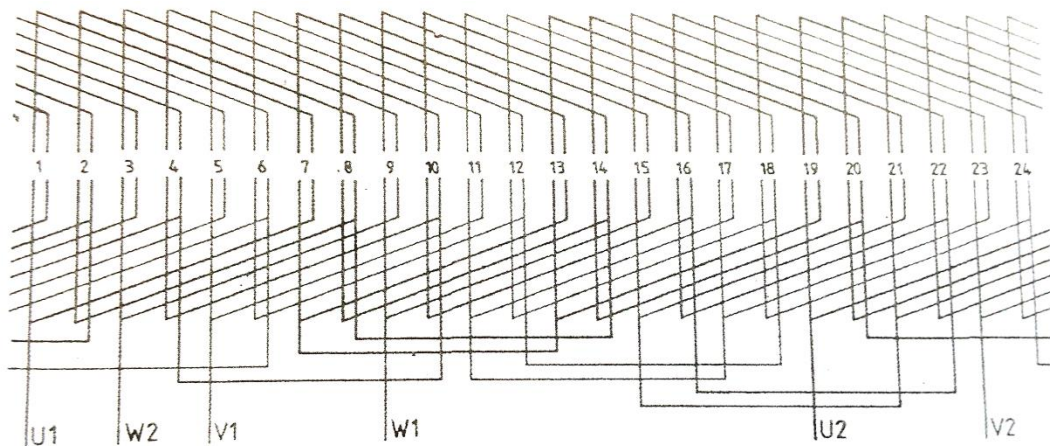


Σχήμα 5: Τετραπολικό δίστρωμο τύλιγμα με πηνία ίσου μήκους για 24 αυλάκια (λύση παραδείγματος)

6.1.3 Επιβραχυνόμενα Τυλίγματα με Δύο Στρώματα

Στα επιβραχυνόμενα τυλίγματα το βήμα τυλίγματος επιβραχύνεται κατά ένα ή περισσότερα αυλάκια. Τα επιβραχυνόμενα τυλίγματα βελτιώνουν τον βαθμό απόδοσης και τις ιδιότητες επίτευξης κανονικού αριθμού στροφών του κινητήρα και ελαττώνουν το θόρυβο. Όταν π.χ. το βήμα ενός τυλίγματος δύο στρωμάτων (Σχ.6) πρέπει να επιβραχυνθεί (χορδοποιηθεί) από 6 σε 5 διαιρέσεις αυλακιών, τότε ο συντελεστής επιβράχυνσης είναι $K_p=5 / 6$. Στην επιβράχυνση κατά 2 διαιρέσεις αυλακιού ισχύει $K_p=4 / 6$.

Σε κάθε επιβραχυνόμενο τύλιγμα ισχύει: στο ένα μέρος των αυλακιών, που εξαρτάται από τον συντελεστή επιβράχυνσης, οι ομάδες των πάνω πηνίων και οι ομάδες των κάτω πηνίων ανήκουν σε διαφορετικές φάσεις. Μεταξύ των δύο ομάδων πηνίων πρέπει να υπάρχει τάση από δύο διαφορετικούς αγωγούς.



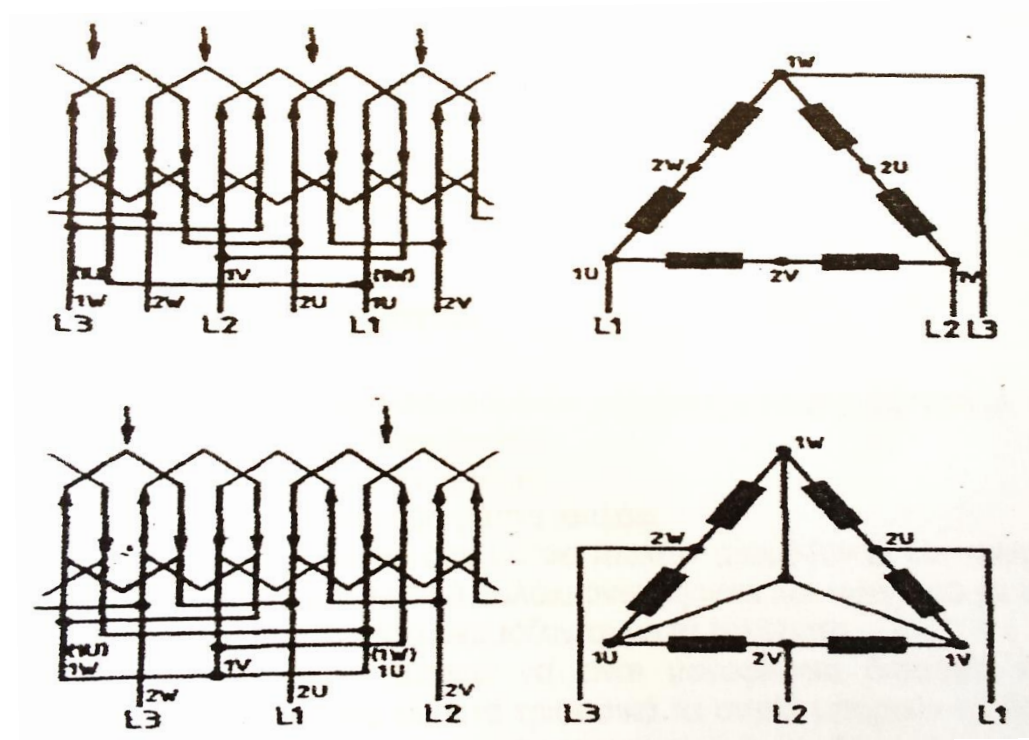
Σχήμα 6: Τετραπολικό, επιβραχυνόμενο δίστρωμο τύλιγμα με συντελεστή επιβράδυνσης $K_p=5/6$

6.1.4 Τυλίγματα με Αλλαγή των Πόλων

Συχνά χρειάζονται κινητήρες με περισσότερους αριθμούς στροφών, π.χ. στις εργαλειομηχανές. Για να γίνει αυτό υπάρχουν διάφορες δυνατότητες. Σε έναν στάτη μπορούν να τοποθετηθούν δύο ξεχωριστά τυλίγματα που κάθε φορά μόνο το ένα απ'αυτά είναι σε λειτουργία. Αλλά και με ένα τύλιγμα υπάρχει η δυνατότητα να ληφθούν διαφορετικοί αριθμοί πόλων με την αντίστοιχη μεταγωγή οπότε προκύπτουν διαφορετικοί αριθμοί πόλων, το οποίο έχει την πιο ευρεία χρήση, είναι το τύλιγμα Dahlander (Σχ.7).

Για τον καθορισμό του τυλίγματος Dahlander υπολογίζονται: α) το βήμα τυλίγματος για τον υψηλό αριθμό πόλων (χαμηλό αριθμό στροφών) β) ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο και φάση για το μικρό αριθμό πόλων (υψηλός αριθμός στροφών). Για τον χαμηλό αριθμό στροφών το τύλιγμα συνδέεται συνήθως κατά τρίγωνο. Η σύνδεση για τον υψηλό αριθμό στροφών γίνεται στην μεσαία ένωση των δύο ομάδων πηνίων (Σχ.7). Οι επαφές για το χαμηλό αριθμό στροφών συνδέονται μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα το τύλιγμα των δύο ομάδων συνδέεται παράλληλα (Δ/ΥΥ).

Με τη μετατόπιση των επαφών για των υψηλό και για των χαμηλό αριθμό στροφών μεταβάλλεται η φορά του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Για το λόγο αυτό οι επαφές 1U και 1W του χαμηλού αριθμού στροφών έχουν ανταλλαγή.



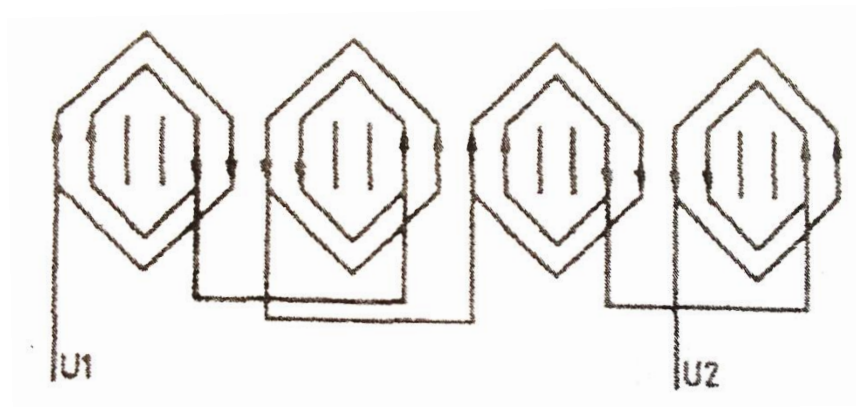
Σχήμα 7: Αρχή της σύνδεσης Dahlander για ένα τύλιγμα με 4 πόλους πάνω και 2 πόλους κάτω.

6.2. Μονοφασικά Τυλίγματα

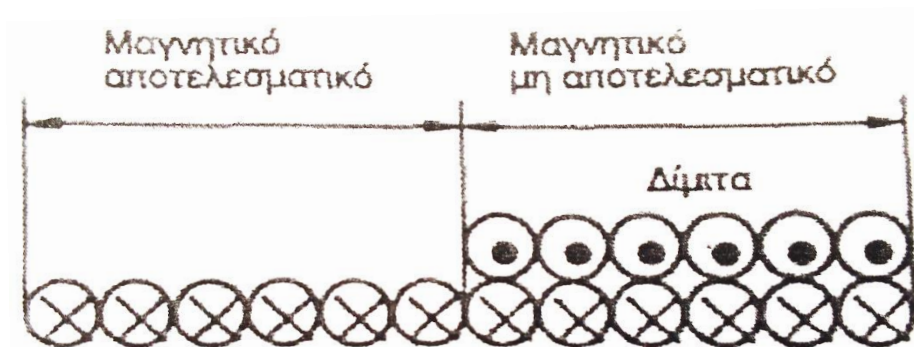
Για την κατασκευή ενός σχεδίου τυλίγματος μονοφασικών κινητήρων ισχύουν τα ίδια όπως και στους τριφασικούς κινητήρες. Στα δύο τρίτα ($2/3$) των αυλακιών τοποθετείται το κύριο τύλιγμα U_1, U_2 και στο ($1/3$) των αυλακιών το βοηθητικό τύλιγμα Z_1, Z_2 (Σχ.8).

Οι κινητήρες με μηχανική εκκίνηση διαθέτουν ένα μόνο κύριο τύλιγμα. Στους κινητήρες αυτούς το ($1/3$) των αυλακιών δε χρησιμοποιείται (Σχ.9).

Η απαραίτητη μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων κύριου και βοηθητικού τυλίγματος επιτυγχάνεται με έναν πυκνωτή ή με μια αντίσταση που συνδέεται σε σειρά με το βοηθητικό τύλιγμα. Ως προς τούτο το ($1/3$) του βοηθητικού τυλίγματος περιελίσσεται δίμιτα (Σχ.9). Με την διάταξη αυτή αναιρείται το μαγνητικό αποτέλεσμα στα ($2/3$) του τυλίγματος. Αποτελεσματική είναι μόνο η ωμική αντίσταση.



Σχήμα 8: Μονοφασικός στροφαλοφόρος κινητήρας με 24 αυλάκια, τετραπολικός



Σχήμα 9: Δίμιτο βοηθητικό τύλιγμα

7 ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑΤΗ Ε.Ρ.

7.1 Συγκρότηση των Τυλιγμάτων του Στάτη

Το τύλιγμα του στάτη είναι συγκροτημένο από μάτσα με χάλκινο σύρμα ή από χάλκινες μπάρες. Τα μάτσα ή οι μπάρες είναι τοποθετημένα μέσα σε κατάλληλα αυλάκια που βρίσκονται στην εσωτερική επιφάνεια του στάτη.

7.2 Χρησιμοποίηση των Τυλιγμάτων με Μάτσα και Μπάρες

Τα τυλίγματα με μάτσα χρησιμοποιούνται κανονικά για κινητήρες με μικρή ισχύ, αλλά μπορούν να υιοθετηθούν και για κινητήρες με μεγάλη ισχύ και μεγάλη τάση. Στα τυλίγματα των κινητήρων με μικρή ισχύ η διάμετρος του σύρματος σπάνια ξεπερνάει τα 3 mm. Για μεγαλύτερες διατομές προτιμάμε τη χρησιμοποίηση 2 ή περισσότερων συρμάτων συνδεδεμένων παράλληλα. Τα τυλίγματα με μπάρες χρησιμοποιούνται στις μηχανές με μεγάλη ισχύ και χαμηλή τάση, δηλαδή, όταν έχουμε υψηλή ένταση δεν ενδείκνυται η χρήση στρόφυλου σύρματος. Στα τυλίγματα με μεγάλη ένταση δεν ενδείκνυται η χρησιμοποίηση μεγάλων μπαρών, γιατί δημιουργούνται παρασιτικά ρεύματα. Συμφέρει η χρήση αγωγών ορθογωνικής διατομής, μονωμένων μεταξύ τους και συνδεδεμένων παράλληλα.

7.3 Τιμή της Η.Ε.Δ.

Στις μηχανές Ε.Ρ. χρειάζεται συνεργασία πολλών αγωγών στη σειρά, για να πετύχουμε Η.Ε.Δ. τέτοιου μεγέθους, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πράξη.

Η τιμή της Η.Ε.Δ. εξαρτάται από τον αριθμό των αγωγών που έχουν συνδεθεί στη σειρά και από τη φάση των στοιχειωδών Η.Ε.Δ.

Η Η.Ε.Δ. δύο αγωγών που είναι συνδεδεμένοι στη σειρά είναι διπλάσια εκείνης του ενός αγωγού, όταν οι στοιχειώδεις Η.Ε.Δ. των δύο αγωγών είναι σε φάση, δηλαδή όταν οι δύο αγωγοί είναι σε απόσταση ενός πολικού βήματος (180° ηλεκτρικές μοίρες). Αν η στοιχειώδεις Η.Ε.Δ. δεν είναι σε φάση, η προκύπτουσα είναι μικρότερη και είναι τόσο μικρή όσο πιο μεγάλη είναι η μετατόπιση μεταξύ των δύο αγωγών σε σχέση με τη θέση του μέγιστου.

Η Η.Ε.Δ. μπορεί να λάβει τιμές αρκετά χαμηλές, όταν οι δύο αγωγοί είναι πολύ κοντά γιατί οι στοιχειώδεις Η.Ε.Δ. είναι σχεδόν σε αντίφαση.

Η τιμή της Η.Ε.Δ. που επάγεται σε κάθε φάση του στάτη δίνεται από τη σχέση:

$$E=41,11K_t \times fN \Phi_\delta [V]$$

Όπου f = συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας

N = αριθμός σπειρών για κάθε φάση

Φ_δ = ροή σε Weber στο διάκενο

K_t = συντελεστής τυλιγμάτων

7.4 Είδη Τυλιγμάτων

Οι μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος κατασκευάζονται με τρία είδη αυτά είναι:

- 1) τυλίγματα με ένα μάτσο / αυλάκι
- 2) τυλίγματα με δύο μάτσα / αυλάκι
- 3) τυλίγματα με ένα και δύο μάτσα / αυλάκι.

Τα τυλίγματα με ένα μάτσο / αυλάκι ονομάζονται και τυλίγματα με μια στρώση. Τα τυλίγματα με δύο μάτσα ανά αυλάκι ονομάζονται και τυλίγματα με δύο στρώσεις και τέλος με ένα και δύο μάτσα / αυλάκι ονομάζονται μικτά τυλίγματα.

Τα τυλίγματα μπορεί να είναι μονοφασικά διφασικά και τριφασικά. Τα πλέον διαδεδομένα τυλίγματα είναι τα τριφασικά τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ότι προκύπτουν από τρία κυκλώματα μονοφασικά μετατοπισμένα μεταξύ τους κατά 120° ηλεκτρικές μοίρες.

7.5 Γεωμετρικές Ηλεκτρικές Μοίρες

Στις διπολικές μηχανές Ε.Ρ. ή Η.Ε.Δ. που επάγεται σε κάθε εργαζόμενο αγωγό, συμπληρώνει μια ολόκληρη περίοδο, όταν ο αγωγός περνώντας μπροστά από ένα βόρειο και ένα νότιο πόλο, ξαναβρεθεί πάλι μπροστά στον επόμενο βόρειο πόλο.

Στις πολυπολικές μηχανές η Η.Ε.Δ. που επάγεται σε κάθε εργαζόμενο αγωγό συμπληρώνει μια περίοδο μόλις ο αγωγός διαγράψει ένα ορισμένο τόξο που αντιστοιχεί σε ορισμένη γεωμετρική γωνία, η τιμή αυτής της γεωμετρικής γωνίας εξαρτάτε από τον αριθμό των πόλων του απαγωγέα. Η σχέση μεταξύ γεωμετρικών και ηλεκτρικών γωνιών είναι:

Γεωμετρική γωνία = ηλεκτρική γωνία / ζεύγη πόλων.

7.6 Τύποι των Τυλιγμάτων του Στάτη

Τα τυλίγματα των ασύγχρονων κινητήρων διακρίνονται σε τρία συστήματα:

- 1) ομόκεντρο
- 2) βροχοειδές ή "στεφάνης"
- 3) κυματοειδές

Τα τρία συστήματα μπορούν να διακριθούν σε δύο τύπους:

- α) με πόλους ομώνυμους
- β) με πόλους εναλλάξ

Τόσο τα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ όσο και εκείνα με πόλους ομώνυμους, ανάλογα με το πλάτος του μάτσο, δηλαδή της αποστάσεως μεταξύ των ενεργών πλευρών διακρίνονται σε:

α) τυλίγματα με βήμα ακέραιο

β) τυλίγματα με βήμα σμυκριμένο.

Το ομόκεντρο τύλιγμα κανονικά γίνεται σε δύο επίπεδα, αλλά χρησιμοποιείται επίσης μια τοποθέτηση των κεφαλών ανάλογη με εκείνη των τυλιγμάτων στεφάνης και αυτό το τύλιγμα ονομάζεται τύλιγμα ομόκεντρο με στεφάνη. Τα μάτσα όλα ίσα στο τύλιγμα στεφάνης ενώ στο ομόκεντρο με στεφάνη τα μάτσα κάθε συγκροτήματος είναι διαφορετικού μεγέθους, όπως το ομόκεντρο με δύο επίπεδα. Το τύλιγμα στεφάνης χρησιμοποιείται πολλές φορές από τους τυλιχτές σε αντικατάσταση του ομόκεντρου με μια στρώση.

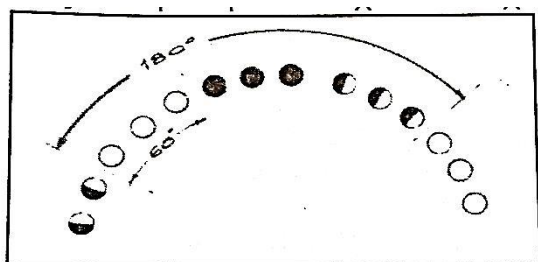
7.6.1 Τυλίγματα με Βήμα Ακέραιο και με Βήμα Σμικρυμένο

Τα τυλίγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ένα και με δύο μάτσα σε κάθε αυλάκι. Στα τυλίγματα με ένα μάτσο ανά αυλάκι οι αγωγοί κάθε αυλακιού αποτελούν ένα στοιχείο, ενώ στα τυλίγματα με 2 μάτσα / αυλάκι οι αγωγοί κάθε αυλακιού αποτελούν 2 στοιχεία. Το βήμα των αυλακιών γ_α είναι ίσο με πολικό βήμα γ_π στα τυλίγματα με βήμα ακέραιο:

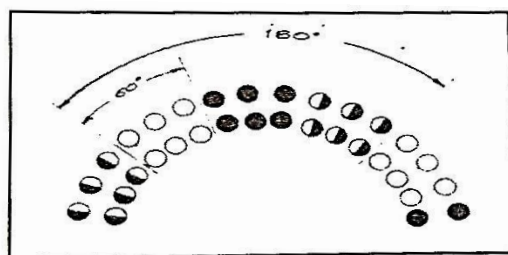
$$\gamma_\alpha = \gamma_\pi = n\alpha / 2\pi$$

Στα τυλίγματα με βήμα σμικρυμένο το βήμα των αυλακιών γ_α είναι πάντα μικρότερο του πολικού βήματος: $\gamma_\alpha < n\alpha / 2\pi$

Στα τυλίγματα με βήμα ακέραιο, κάθε φάση συνήθως καταλαμβάνει το 1/3 του πολικού βήματος, δηλαδή τα στοιχεία κάθε φάσης είναι κατανεμημένα συνήθως ομοιόμορφα κατά μήκος 60° ηλεκτρικών μοιρών. Σχ.1α και Σχ.1β

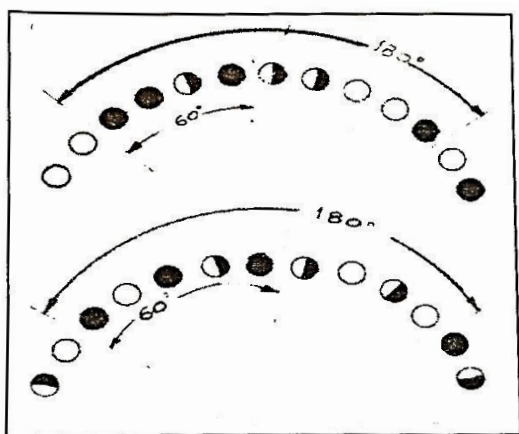


Σχ.1α

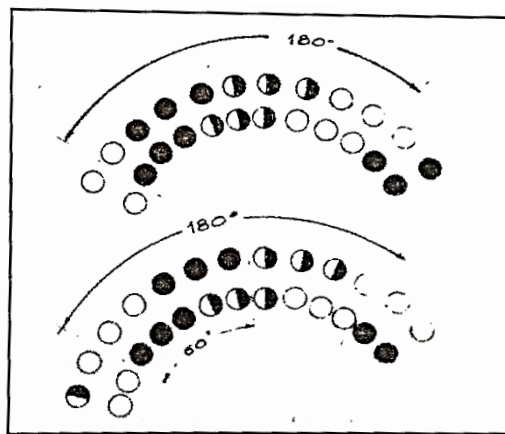


Σχ.1β

Στα τυλίγματα με βήμα σμικρυμένο κάθε φάση καταλαμβάνει πάντα μια στρώση μεγαλύτερη του 1/3 του πολικού βήματος. Σχ.1γ, 1δ



Σχ.1γ



Σχ.1δ

Το βήμα των τυλιγμάτων με 1 μάτσο ανά αυλάκι μπορεί να θεωρηθεί ακέραιο όταν προκύπτει λίγο διαφορετικό του πολικού βήματος γ_π , αρκεί κάθε φάση να καταλαμβάνει συνέχεια το 1/3 του πολικού βήματος.

Τόσο τα τυλίγματα με μια στρώση όσο και εκείνα με δύο, μπορούν να πραγματοποιηθούν με βήμα ακέραιο και με βήμα κλασματικό. Συνήθως χρησιμοποιούμε το σμικρυμένο βήμα για τα τυλίγματα με 2 στρώσεις.

7.6.2 Πλεονεκτήματα των Τυλιγμάτων με 2 Στρώσεις και με Βήμα Σμικρυμένο

Η σμίκρυνση του βήματος στα τυλίγματα με 2 στρώσεις επιφέρει μικρή οικονομία σύρματος γιατί οι κορυφές των μάτσων σε αυτήν την περίπτωση είναι μικρότερη. Η σμίκρυνση του βήματος στο ξανατύλιγμα του κινητήρα, ενώ παραμένει αμετάβλητη η τάση τροφοδοτήσεως, πρέπει να συνοδεύεται από μικρή αύξηση του αριθμού των αγωγών / αυλάκι από Ξ σε $\Xi / \eta\mu(90^\circ \gamma\alpha/\gamma\pi)$, γιατί έχουμε μείωση της Η.Ε.Δ. από E σε $E / \eta\mu(90^\circ \gamma\alpha/\gamma\pi)$.

Τα μάτσα των τυλιγμάτων με δύο στρώσεις αποτελούνται από τους μισούς αγωγούς σε σύγκριση με εκείνα των τυλιγμάτων με μία στρώση. Η μόνωση μεταξύ των δύο στρώσεων πρέπει να είναι κατάλληλη για τη διαφορά δυναμικού που υπάρχει μεταξύ των δύο στρώσεων και είναι ίση με εκείνη που εφαρμόζεται στα άκρα της μηχανής, όταν τα δύο στοιχεία του ίδιου αυλακιού ανήκουν σε διαφορετικές φάσεις.

Μία κατάλληλη σμίκρυνση του βήματος φέρνει πάντα μία μικρή μείωση του συντελεστή γεμίσματος του αυλακιού, σε σχέση με τα τυλίγματα, με μία στρώση, αντίθετα προκύπτει μικρότερο το μήκος της μέσης σπείρας και έτσι έχουμε μικρότερες απώλειες χαλκού και κατά συνέπεια καλύτερη απόδοση. Η μεγαλύτερη αξία της σμικρύνσεως του βήματος είναι το γεγονός ότι μας δίνει τη δυνατότητα να πετύχουμε πεδία πιο ομοιόμορφα, έχοντας την δυνατότητα μηδενισμού και απομακρύνσεως μερικών αρμονικών.

Τα ουσιαστικά χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων με σμικρυμένο βήμα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- 1) Καλύτερευση καμπύλης της Η.Ε.Δ. με μηδενισμό ή αποφυγή μερικών αρμονικών.
- 2) Δυνατότητα υιοθέτησης ενός κλασματικού αριθμού αυλακιών ανά πόλο και φάση.
- 3) Σμίκρυνση των κεφαλών των μάτσων επιτρέπει μια κάποια οικονομία χαλκού, ειδικά για τυλίγματα με 2 πόλους.
- 4) Μείωση του συντελεστή του τυλίγματος και χειροτέρευση της χρησιμοποίησεως του τυλίγματος, με επακόλουθο την αύξηση των αγωγών με την ίδια εφαρμοζόμενη τάση και ροή για κάθε πόλο, τόσο μεγάλη όσο πιο μεγάλος είναι ο συντελεστής της σμικρύνσεως.
- 5) Πιο χαμηλό συντελεστή γεμίσματος αυλακιών, γιατί τα 2 στοιχεία του ίδιου αυλακιού αποτελούνται από διαφορετικές φάσεις και γι'αυτό η μόνωση πρέπει να είναι κατάλληλη για την τάση τροφοδοτήσεως.
- 6) Η σμίκρυνση του βήματος μεγάλης εντάσεως υιοθετείται στους διπολικούς κινητήρες.

7.7 Συντελεστής Τυλίγματος, Συντελεστής Βήματος

Ο συντελεστής τυλίγματος K_t δίνεται από τη σχέση: $K_t = \eta\mu\alpha/2 / \eta\mu \alpha/2$,

Όπου:

α = παριστάνει την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών αυλακιών σε ηλεκτρικές μοίρες. (Σχ.2).

q = παριστάνει στα τριφασικά τυλίγματα τον αριθμό των αυλακιών ανά πόλο και φάση, στα μονοφασικά τυλίγματα τον αριθμό των αυλακιών ανά πόλο που καταλαμβάνει το τύλιγμα εργασίας. Στα τυλίγματα με βήμα κλασματικό ο συντελεστής του τυλίγματος K_t είναι γινόμενο δύο συντελεστών .

$$K_t = K_k * K_b, \text{ όπου:}$$

K_k = συντελεστής κατανομής

K_b = συντελεστής βήματος

Στα τυλίγματα με βήμα ακέραιο ο συντελεστής βήματος K_b είναι ίσος με τη μονάδα, άρα ο συντελεστής τυλίγματος K_t είναι ίσος με το συντελεστή κατανομής K_k , ($K_t=K_k$), ενώ στα τυλίγματα με βήμα κλασματικό ο συντελεστής K_t είναι πάντα μικρότερος του συντελεστή κατανομής K_k .

Τα τυλίγματα με βήμα ακέραιο ονομάζονται συνήθως τυλίγματα με βήμα διαμετρικό, από το γεγονός ότι η απόσταση μεταξύ των πλευρών των μάτσων είναι 180° ηλεκτρικές. Στα τυλίγματα αυτού του τύπου οι Η.Ε.Δ. που επάγονται στις 2 πλευρές κάθε μάτσου βρίσκονται σε φάση κατά συνέπεια η Η.Ε.Δ. κάθε μάτσου θα είναι το αριθμητικό άθροισμα των 2 Η.Ε.Δ. που επάγονται στις 2 πλευρές του ίδιου μάτσου.

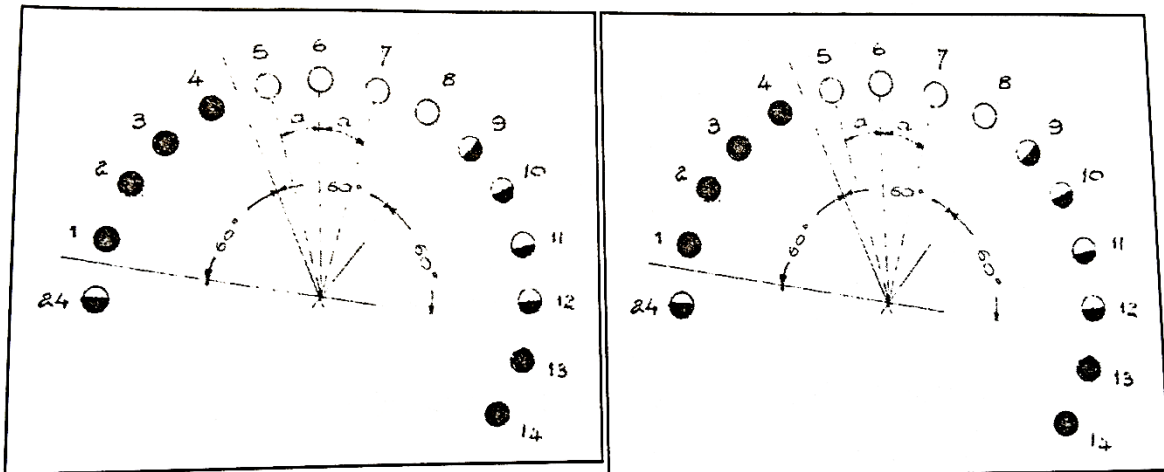
Στα τυλίγματα με βήμα σμικρυσμένο η απόσταση μεταξύ των πλευρών των μάτσων είναι μικρότερη των 180° ηλεκτρικών. Κατά συνέπεια η Η.Ε.Δ. κάθε μάτσου θα είναι μικρότερη του αριθμητικού αθροίσματος. Αυτή η μείωση εκφράζεται με το συντελεστή του βήματος K_β , ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$K_\beta = (\text{ΗΕΔ πραγματική ενός μάτσου} / \text{ΗΕΔ ενός μάτσου με βήμα διαμετρικό}).$$

Για το συντελεστή του βήματος ισχύει:

$$K_\beta = \sin B/2 = \eta\mu 90^\circ \gamma\alpha/\gamma\pi,$$

Όπου: B = γωνία του σμικρυσμένου βήματος σε μοίρες ηλεκτρικές, δηλαδή η διαφορά μεταξύ του ακέραιου βήματος $\gamma\pi=180^\circ$ ηλεκτρικές και του βήματος του τυλίγματος εκφρασμένο σε ηλεκτρικές μοίρες ($\gamma\alpha.\alpha$) ή $B=180^\circ - \gamma\alpha.\alpha^\circ$ ηλεκτρικές.



Σχ.2α

Σχ.2β

7.7.1 Συντελεστής Κατανομής

Για τον υπολογισμό του συντελεστή κατανομής με q ακέραιο εφαρμόζουμε συνήθως τη γνωστή σχέση του συντελεστή του τυλίγματος :

$$K_k = [\eta_m (q\alpha/2) / q \eta_m (\alpha/2)], \text{ όπου:}$$

α = ηλεκτρική γωνία μεταξύ δύο διαδοχικών αυλακιών γωνία ηλεκτρική= γωνία γεωμετρική \times ζεύξη πόλων. Για τη γωνία α ισχύει:

$$\alpha = P (360^\circ / n_\alpha) = 2D (180^\circ / n_\alpha) = 180^\circ / (n_\alpha / 2p) = 180^\circ / 3q$$

αντικαθιστώντας το $\alpha/2$ με τη σχέση $90^\circ / 3q$, η έκφραση του συντελεστή κατανομής παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$K_k = [\eta_m q (90^\circ / 3q)] / [q \eta_m (90^\circ / 3q)] = [\eta_m 30^\circ] / [q \eta_m (90^\circ / 3q)] = 0,5 / q \eta_m (90^\circ / 3q).$$

7.7.2 Συντελεστής του Σμικρυμένου Βήματος

Η σχέση μεταξύ του βήματος του τυλίγματος και του ακέραιου βήματος ή πολικού βήματος (γ_α/γ_π) ονομάζεται απλά συντελεστής σμικρυμένου βήματος.

8 ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΑ ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ

8.1 Τύποι Μονοφασικών Τυλιγμάτων

Στα τυλίγματα διακρίνουμε 3 συστήματα τυλίγματος, αυτά είναι:

- 1) ομόκεντρο
- 2) βροχοειδές, συνήθως ονομάζεται «στεφάνης».
- 3) κυματοειδές.

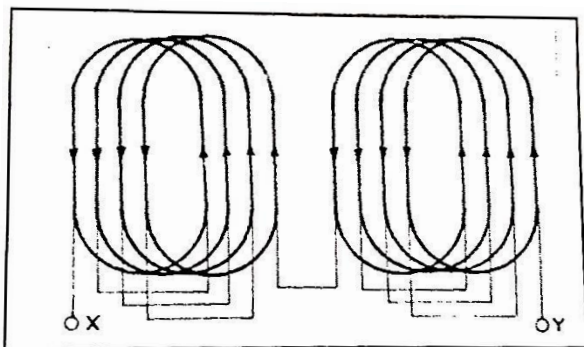
Τα 3 συστήματα τυλίγματος μπορούν διακριθούν σε δύο τύπους:

- α) με πόλους ομώνυμους ή τύπος Α
- β) με πόλους εναλλάξ ή τύπος Β

Ένα τύλιγμα ανήκει στον τύπο Α, όταν ο αριθμός των συγκροτημάτων από μάτσα είναι ίσος με τον αριθμό των πόλων.

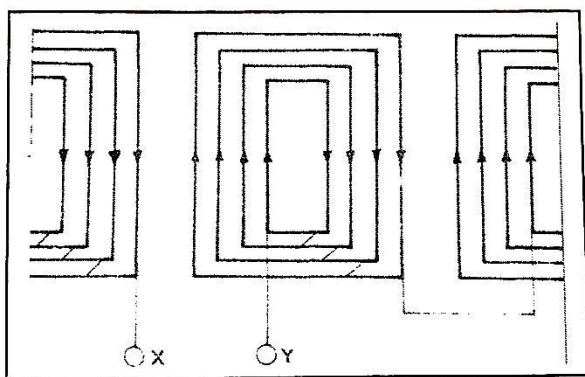
Όλοι οι αγωγοί μιας ζώνης ή με άλλα λόγια οι αγωγοί που αντιστοιχούν σε ένα πόλο των ομόκεντρων και βροχοειδών τυλιγμάτων με πόλους ομώνυμους, συνδέονται σε σειρά με αγωγούς αντιδιαμετρικής ζώνης. Βλέπε **Σχ.3α**. Ειδικότερα στα βροχοειδή τυλίγματα συνδέεται ο 1^{ος} αγωγός ενός συγκροτήματος με τον 1^ο αγωγό άλλου συγκροτήματος με το 2^ο αγωγό του 2^{ου} συγκροτήματος κ.ο.κ, ενώ στα ομόκεντρα συνδέεται ο 1^{ος} αγωγός με τον τελευταίο, ο 2^{ος} με τον προτελευταίο κ.ο.κ. Βλέπε **Σχ.3β**.

Τα δύο συστήματα των τυλιγμάτων είναι ηλεκτρικά ισοδύναμα. Διαφέρουν όμως στον τρόπο μετωπικών συνδέσεων μεταξύ των ενεργών αγωγών.



Σχ.3α:

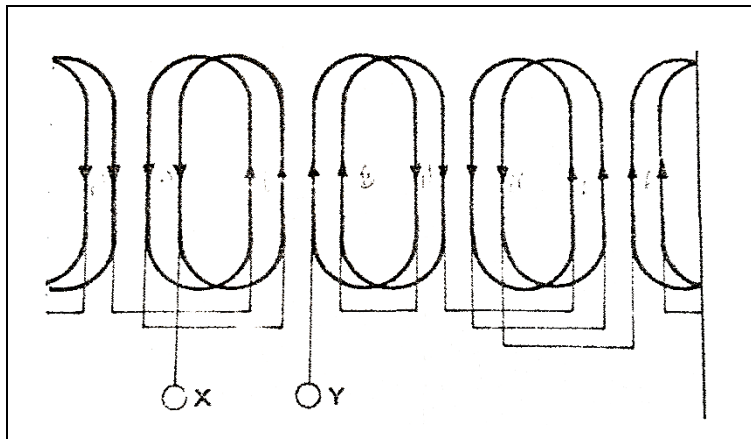
Τα δύο συγκροτήματα από μάτσα είναι συνδεδεμένα σε σειρά αλλά θα μπορούσαν να συνδεθούν και παράλληλα



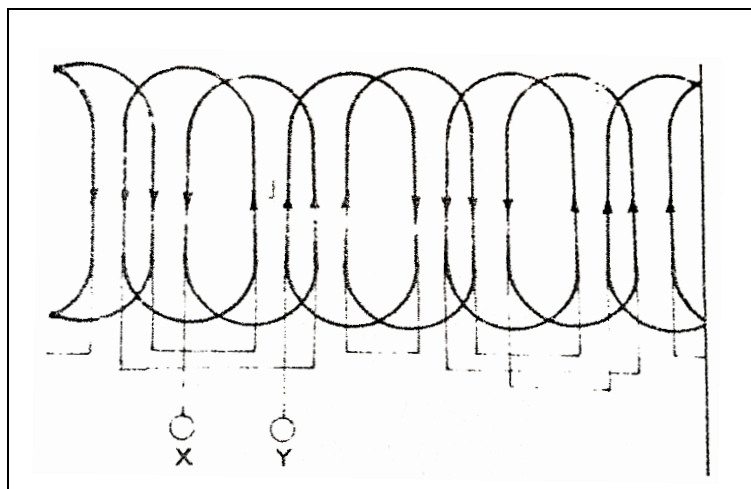
Σχ.3β:

Οι δύο τύποι των τυλιγμάτων, δηλαδή τα τυλίγματα με πόλους ομώνυμους και τα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ είναι ηλεκτρικά ισοδύναμα.

Στα Σχ.3γ και 3δ φαίνονται τυλίγματα βροχοειδοί με πόλους εναλλάξ.



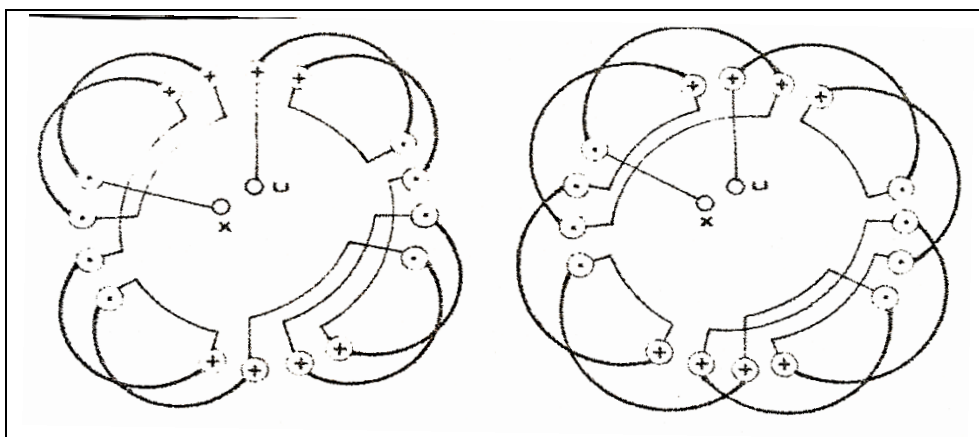
Σχ.3γ



Σχ.3δ

Στα Σχ.3γ και Σχ.3δ φαίνεται ότι τα συγκροτήματα των τυλιγμάτων με πόλους εναλλάξ διαρρέονται από ρεύματα με φορά αντίθετη εναλλάξ, ενώ τα συγκροτήματα των τυλιγμάτων με πόλους ομώνυμους διαρρέονται από ρεύματα που έχουν την ίδια φορά.

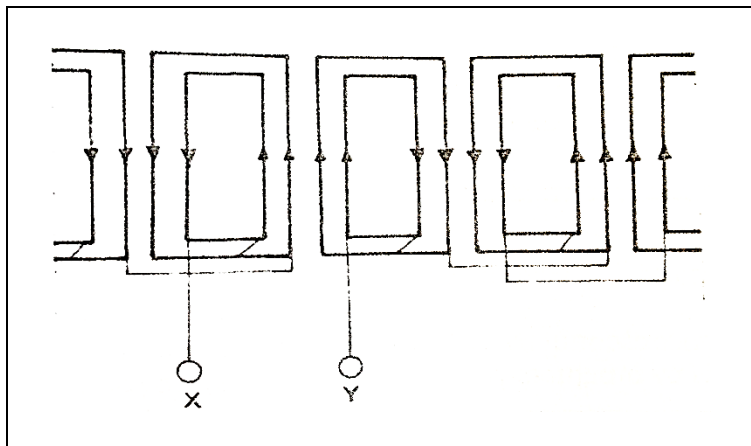
Τα Σχ.3ε και Σχ.3ζ δείχνουν την κυκλική μορφή των τυλιγμάτων των Σχ.3γ και Σχ.3δ.



Σχ.3ε

Σχ.3ζ

Το Σχ.3η δείχνει τύλιγμα ομόκεντρο με πόλους εναλλάξ.



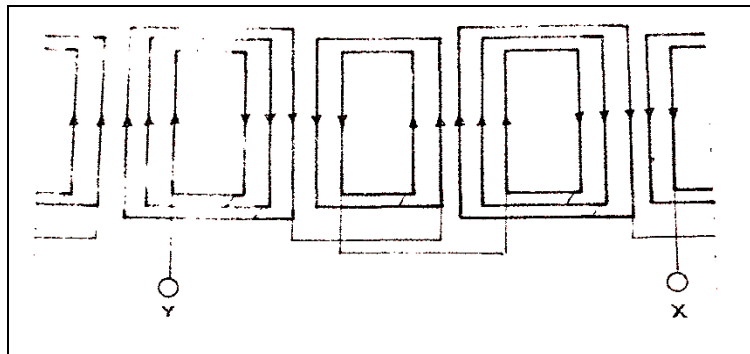
Σχ.3η

Από τα προηγούμενα σχήματα προκύπτει :

α) τα μάτσα των βροχοειδών τυλιγμάτων έχουν το ίδιο βήμα

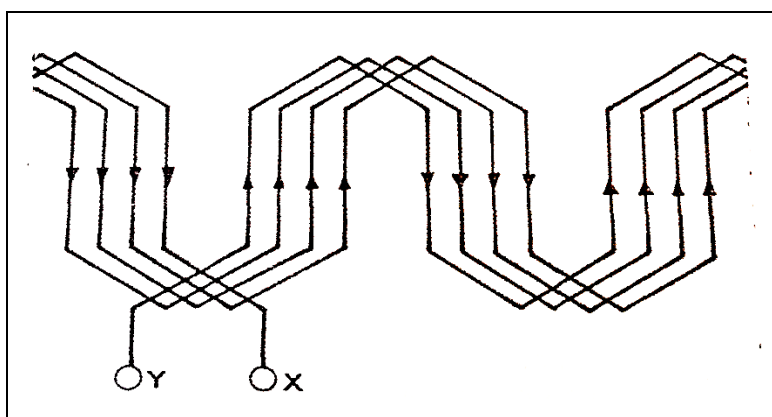
β) κάθε συγκρότημα των ομόκεντρων τυλιγμάτων αποτελείται από μάτσα με διαφορετικό βήμα .

Όταν ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο είναι μονός το τύλιγμα με πόλους εναλλάξ αποτελείται από σύνθετα συγκροτήματα εναλλάξ με διαφορετικό αριθμό μάτσων. Βλέπε Σχ.3θ.



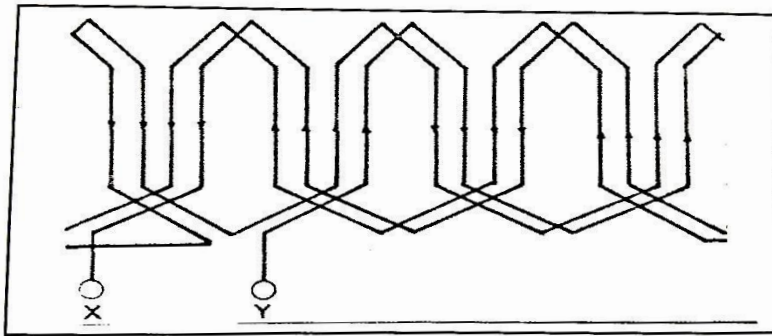
Σχ.3θ

Στο κυματοειδές τύλιγμα με πόλους ομώνυμους η σύνδεση των αγωγών γίνεται όπως φαίνεται στο Σχ.3κ



Σχ.3κ

Το τύλιγμα του **Σχ.3λ** είναι ανάλογο του κυματοτυλίγματος σειράς επαγωγικών συνεχούς ρεύματος.



Σχ.,3λ

8.2 Συστήματα Συνδέσεων

Τα συγκροτήματα από μάτσα μπορούν να συνδεθούν:

- 1) σειρά
- 2) παράλληλα
- 3) μεικτά (σειρά – παράλληλα).

Ο τύπος της συνδέσεως εξαρτάται από την τάση που παράγουν οι γεννήτριες ή από την τάση τροφοδοτήσεως των κινητήρων.

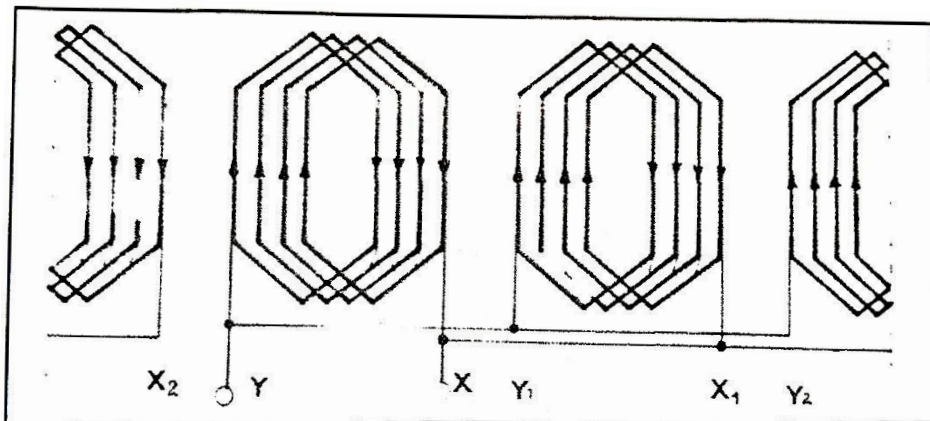
8.2.1 Σύνδεση σε Σειρά

Όλα τα συγκροτήματα από μάτσα μπορούν να συνδεθούν σε σειρά. Κατά συνέπεια θα διαρρέονται από το ολικό ρεύμα της μηχανής.

Σπουδαία παρατήρηση: Τα μάτσα κάθε συγκροτήματος συνδέονται πάντα σε σειρά μεταξύ τους.

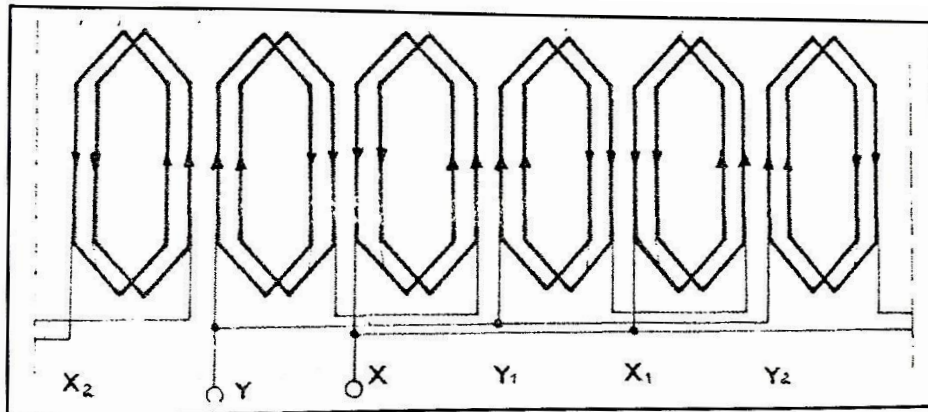
8.2.2 Σύνδεση Παράλληλη

Στα τυλίγματα με πόλους ομώνυμους οι αρχές όλων των συγκροτημάτων συνδέονται μεταξύ τους καθώς επίσης και τα πέρατα όπως φαίνεται στο **Σχ.4α**.



Σχ.4α

Στα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ συνδέονται σε σειρά δυο-δύο συγκροτήματα διαδοχικά και μετά κάθε ζεύγος συγκροτημάτων συνδέεται παράλληλα. Βλέπε **Σχ.4β**.



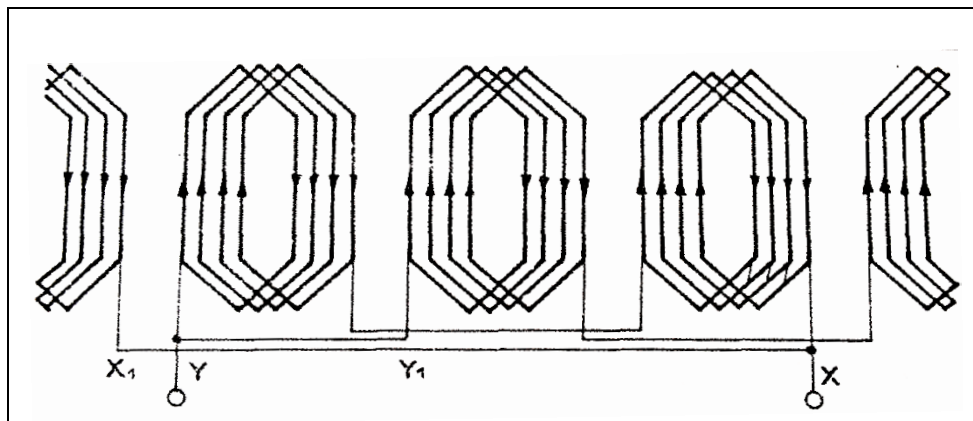
Σχ.4β

Αυτό το σύστημα λέγεται παράλληλο εξωτερικό για να το διακρίνουμε από το παράλληλο εσωτερικό.

Σπουδαία παρατήρηση: Για να μπορέσουμε να πραγματοποιήσουμε παράλληλη εσωτερική σύνδεση πρέπει όλα τα συγκροτήματα να είναι αυστηρά ίδια, δηλαδή να έχουν τον ίδιο αριθμό σπειρών.

8.2.3 Σύνδεση Μεικτή (Σειράς – Παράλληλη)

Η σύνδεση των συγκροτημάτων στη μεικτή συνδεσμολογία φαίνεται στο **Σχ.5α**.



Σχ.5α

8.3 Μονοφασικοί Κινητήρες

Οι κινητήρες μικρής ισχύος χρησιμοποιούν ένα μονοφασικό τύλιγμα, το οποίο ονομάζεται κύριο τύλιγμα ή τύλιγμα εργασίας και ένα δεύτερο τύλιγμα το οποίο ονομάζεται τύλιγμα εκκινήσεως ή βοηθητικό τύλιγμα, μετατοπισμένο 90° ηλεκτρικές σε σχέση με το κύριο τύλιγμα.

Τα δύο τυλίγματα, βοηθητικό και κύριο, λειτουργούν παράλληλα κατά την εκκίνηση. Το ρεύμα που διαρρέει το βοηθητικό τύλιγμα είναι μετατοπισμένο κατά μια ορισμένη γωνία σε σχέση με εκείνο που διαρρέει το κύριο τύλιγμα. Έτσι επιτυγχάνεται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παρόμοιο με εκείνο των διφασικών κινητήρων.

Η μετατόπιση του ρεύματος στο βοηθητικό τύλιγμα μπορεί να γίνει δια μέσου αντιστάσεως ωμικής ή επαγωγικής ή χωρητικής συνδεδεμένης σε σειρά ή παράλληλα.

Το περισσότερο χρησιμοποιούμενο σύστημα είναι εκείνο της εισαγωγής βοηθητικού τυλίγματος μιας αντιστάσεως ή ενός πυκνωτή.

Οι αντιστάσεις χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα γιατί είναι περισσότερο οικονομικές, με αυτές η διαφορά φάσεως σπάνια υπερβαίνει τις 40° ενώ με πυκνωτή επιτυγχάνεται διαφορά φάσεως 90° περίπου. Κατά συνέπεια το ζεύγος της εκκινήσεως προκύπτει πιο ψηλό.

Η αντίσταση και ο πυκνωτής μπορούν να λείπουν στους μικρούς κινητήρες αρκεί ο αριθμός των σπειρών του βοηθητικού τυλίγματος να είναι αρκετά μικρός σε σχέση με εκείνο του κυρίου τυλίγματος.

Στους κινητήρες με ισχύ από $1/8$ του ίππου και πάνω ο αριθμός των σπειρών του βοηθητικού τυλίγματος μπορεί να είναι περίπου το 60% του αριθμού των σπειρών του κύριου τυλίγματος και η διάμετρος του σύρματος είναι το 55% του κύριου τυλίγματος. Για χαμηλότερη ισχύ (από $1/12$ / $1/20$ του ίππου) ο αριθμός των σπειρών του βοηθητικού τυλίγματος μπορεί να είναι το 30% του κύριου τυλίγματος και η διάμετρος του σύρματος τα $2/3$ περίπου.

Ένας κινητήρας με βοηθητικό τύλιγμα μπορεί να μετατραπεί σε κινητήρα με πυκνωτή εκκινήσεως, εάν τοποθετηθεί ένας πυκνωτής σε σειρά στο βοηθητικό τύλιγμα. Η χρήση του πυκνωτή αυξάνει το ζεύγος εκκινήσεως και μειώνει το ρεύμα.

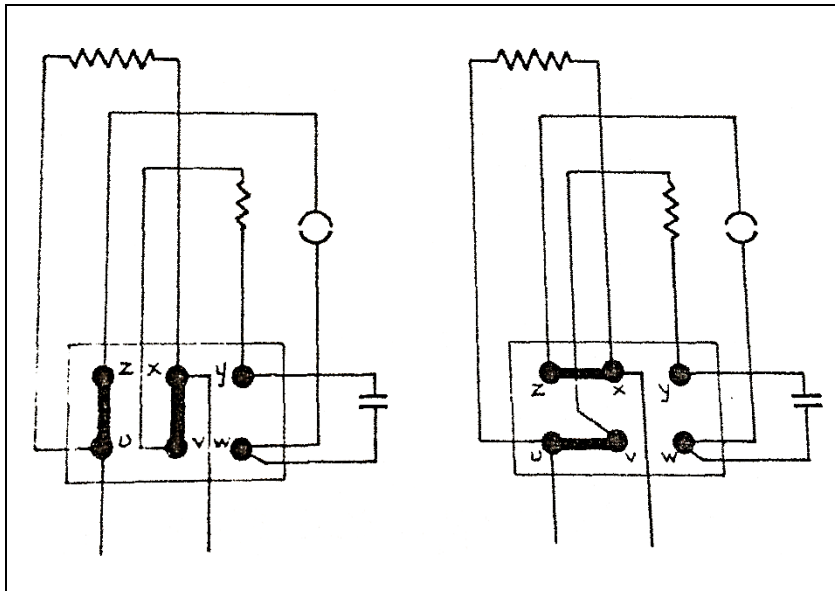
Αν θέλουμε να αυξήσουμε το ζεύγος εκκινήσεως και να μειώσουμε το απορροφούμενο ρεύμα, τότε συνδέουμε σε σειρά στο βοηθητικό τύλιγμα μία αντίσταση που η τιμή της ποικίλει και ισούται με μία έως δύο φορές την τιμή της ωμικής αντιστάσεως του βοηθητικού τυλίγματος. Η τιμή της αντιστάσεως ακριβέστερα καθορίζεται πειραματικά.

Το βοηθητικό τύλιγμα καταλαμβάνει συνήθως το $1/3$ των αυλακιών ή τα αυλάκια που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το κύριο τύλιγμα, γιατί οι Η.Ε.Δ. θα προέκυπταν σχεδόν σε αντίφαση. Μερικές φορές το βοηθητικό τύλιγμα τοποθετείται σε ίδια αυλάκια με το κύριο τύλιγμα. Γενικά είναι προτιμότερο να κατανέμεται το βοηθητικό τύλιγμα σε μεγάλο αριθμό αυλακιών, φυσικά στο βαθμό που του επιτρέπει το κύριο τύλιγμα. Η εφαρμογή των πιο πάνω κανόνων τις περισσότερες φορές οδηγεί σε αποτελέσματα ικανοποιητικά αλλά σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις το βοηθητικό τύλιγμα δεν προκύπτει ικανοποιητικό, για λόγους που θα πούμε πιο κάτω. Κατά συνέπεια το ζεύγος εκκινήσεως προκύπτει μικρό και το ρεύμα εκκινήσεως μεγάλο με αποτέλεσμα την υπερβολική θέρμανση.

Φυσικά το ζεύγος εκκινήσεως και κατά συνέπεια το ρεύμα εκκινήσεως μπορεί να αυξηθεί εάν μειωθεί ο αριθμός των σπειρών του βοηθητικού τυλίγματος. Αντίστροφα αν μειωθεί το ρεύμα εκκινήσεως και κατά συνέπεια το ζεύγος εκκινήσεως, χρειάζεται να αυξηθεί ο αριθμός των σπειρών. Η υπερβολική θέρμανση μπορεί να οφείλεται στη μικρότερη διατομή του σύρματος του τυλίγματος ή στο γεγονός ότι η μηχανή χρειάζεται πολύ χρόνο για να φτάσει στην κανονική ταχύτητα.

Στις εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλο ζεύγος εκκινήσεως χρησιμοποιείται αποκλειστικά ο πυκνωτής εκκινήσεως. Αυτοί οι κινητήρες κατασκευάζονται επίσης για δύο τάσεις λειτουργίας. Σε αυτήν την περίπτωση το κύριο τύλιγμα ή και τα δύο είναι χωρισμένα σε δύο ίσες διατομές και μπορεί να είναι συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα (βλέπε Σχ.6α).

Το Σχ.6α δείχνει τη σύνδεση στην πινακίδα του κινητήρα των δύο τυλιγμάτων του πυκνωτή και του φυγοκεντρικού διακόπτη.



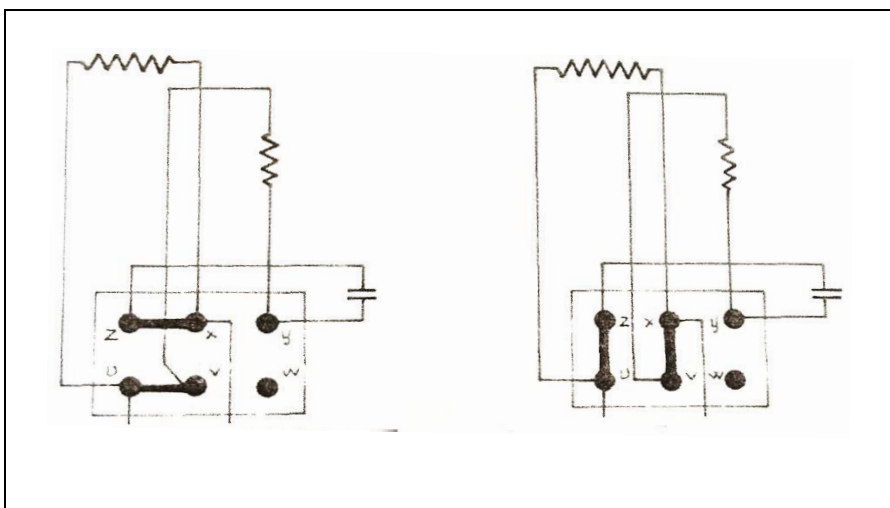
Σχ.6α

Σήμερα χρησιμοποιούνται και οι κινητήρες με διπλό πυκνωτή. Αυτός ο τύπος των κινητήρων έχει έναν πυκνωτή εκκινήσεως συνδεδεμένο σε σειρά στο βοηθητικό τύλιγμα έναν πυκνωτή λειτουργίας με διαφορετική χωρητικότητα.

Ο πυκνωτής λειτουργίας είναι σταθερά τοποθετημένος και παρέχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- 1^ο μεγαλώνει το ζεύγος από 5 σε 30%
- 2^ο μεγαλώνει το ζεύγος εκκινήσεως από 5 σε 20%
- 3^ο μεγαλώνει την απόδοση και τον συντελεστή ισχύων στο πλήρες φορτίο
- 4^ο μικραίνει το θόρυβο λειτουργίας στο πλήρες φορτίο.

Σε ειδικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται κινητήρες με σταθερό πυκνωτή. Οι κινητήρες αυτού του τύπου για συνεχή εργασία έχουν μικρό ζεύγος εκκινήσεως αλλά μεγάλο συντελεστή ισχύος, ενώ για εργασία ασυνεχή μπορούμε να έχουμε ζεύγος εκκινήσεως μεγάλο. Φυσικά σε αυτές τις μηχανές λείπει ο αυτόματος διακόπτης (βλέπε Σχ.6β).



Σχ.6β

8.4 Συντελεστής Κατανομής Κκ

Στα μονοφασικά τυλίγματα η έκφραση που δίνει την τιμή του συντελεστή κατανομής είναι η παρακάτω:

$$K_k = \frac{\eta_{\mu q}(90^\circ/Q)}{\underline{\eta}_{\mu}(90^\circ/Q)}$$

Όπου q= αριθμός αυλακιών που καταλαμβάνει το κύριο τύλιγμα ανά πόλο.

Q= αριθμός αυλακιών ανά πόλο.

Για μονοφασικά τυλίγματα που είναι κατανεμημένα στο 1/2 του πολικού βήματος ο συντελεστής κατανομής προκύπτει:

q	2	3	5	∞
K _k	0,924	0,910	0,904	0,901

Συνήθως όμως το κύριο τύλιγμα των μονοφασικών κινητήρων είναι κατανεμημένο στα 2/3 του πολικού βήματος q=(2/3) Q και σε αυτή την περίπτωση η σχέση που δίνει το συντελεστή κατανομής είναι:

$$K_k = 0,866 / [\eta_{\mu}(90/Q)]$$

Το βοηθητικό τύλιγμα είναι κατανεμημένο συνήθως στο 1/3 του πολικού βήματος.

q	1	2	3	4	5	6-∞
K _k	1,00	0,966	0,960	0,958	0,956	0,956-0,955

Οι τιμές του συντελεστή κατανομής K_k των μονοφασικών τυλιγμάτων που χρησιμοποιούνται περισσότερο φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Q	5	6	7	8	9	12	15	30
q	4	5	5	6	6	8	10	20
K _k	0,836	0,746	0,810	0,794	0,831	0,829	0,828	0,827

8.5 Χωρητικότητα Πυκνωτών Μονοφασικών Ασύγχρονων Κινητήρων

Η χωρητικότητα του πυκνωτή εκκινήσεως εξαρτάται από την τάση της τροφοδοτήσεως, τη συχνότητα και από το ζεύγος εκκινήσεως.

Η χωρητικότητα σε μf μπορεί να καθοριστεί με καλή προσέγγιση από την παρακάτω σχέση:

$$C = P_{\pi} / \omega \times (\alpha \times V)^2$$

Όπου: P_π= ισχύς του πυκνωτή σε VA

$$\omega = 2\pi f$$

V= η τάση στα άκρα του κινητήρα

α= συντελεστής, που εξαρτάται από την τάση τροφοδοτήσεως.

Η τιμή του α κατά μέσο όρο δίνεται στον παρακάτω πίνακα:

V	125	150	220	260
α	1,4	1,55	1,80	1,95

Το αποτέλεσμα του γινομένου $\alpha \cdot V$ είναι η τάση στα άκρα του πυκνωτή. Το γινόμενο $\omega(\alpha \cdot V)$ για συχνότητα 50Hz παίρνει τις τιμές του παρακάτω πίνακα:

Τάση τροφοδοσίας V	125	150	220	260
$\omega(\alpha \cdot V)^2$	10×10^6	17×10^6	49×10^6	80×10^6

Πειραματικά έχει βρεθεί ότι η ισχύς του πυκνωτή για κάθε ίππο (HP) ισχύος του κινητήρα το ζεύγος εκκινήσεως παίρνει τις παρακάτω τιμές:

Ζεύγος εκκινήσεως % του κανονικού ζεύγους	40%	70%	100%	180%	200-250%
Ισχύς πυκνωτή για κάθε ίππο (HP) ισχύος του κινητήρα σε V* α	600	1000	1400	1800	2500

Ο παρακάτω πίνακας μας δίνει τη χωρητικότητα του πυκνωτή εκκινήσεως για ισχυρό ζεύγος κινητήρων της MARELLI.

Αριθμός Πόλων	Ισχύς αποδιδόμενη		Στροφ/λεπτό	Ρεύμα στα 220V A	C_E/C_K^*	Πυκνωτής ηλεκτρολυτικός 220V	
	HP	KW				Χωρητικό- τητα μf	Τάση λειτου- ργίας
2	0,38	0,28	2850	2,8	2,2	80	220
	0,5	0,37	2850	3,5	2,2	80	220
	0,75	0,55	2860	4,9	2,0	80	220
	1,0	0,75	2900	6,0	2,0	80	220
	1,25	0,92	2910	8,0	1,8	160	220
	1,6	1,17	2920	9,4	1,8	160	220
4	0,2	0,15	1400	2	2,5	80	220
	0,25	0,185	1400	2,5	205	80	220
	0,5	0,37	1420	3,6	2,2	80	220
	0,66	0,485	1450	4,4	2,2	80	220
	1,0	0,75	1450	7,0	2,0	160	220
	1,25	0,92	1450	9,0	2,0	160	220

* C_E = Ζεύγος εκκινήσεως και C_K ζεύγος κανονικό.

Ο παρακάτω πίνακας μας δείχνει τη χωρητικότητα του πυκνωτή που είναι μόνιμα τοποθετημένος στους ασύγχρονους μονοφασικούς κινητήρες της MARELLI:

Αριθμός Πόλων	Ισχύς αποδιδόμενη		Στροφ/λεπτό	Ρεύμα στα 220V A	C _E /C _K	Πυκνωτής Ηλεκτρολυτικός 220V	
	HP	KW				Χωρητικότητα μf	Τάση λειτουργίας
2	0,125	0,092	2780	0,8	0,5	6,3	400
	0,27	0,2	2800	1,5	0,5	10	400
	0,5	0,37	2830	2,6	0,4	12,5	400
	0,7	0,82	2850	3,5	0,4	16	400
	1,0	0,75	2860	4,8	0,35	25	400
	1,4	1,03	2880	6,6	0,35	32	400
	4	0,1	0,075	1390	0,65	0,5	5
0,2		0,15	1400	1,15	0,5	10	400
0,25		0,185	1410	1,5	0,4	12,5	400
0,35		0,26	1420		0,4	16	400
0,5		0,37	1430		0,4	25	400
0,7		0,58	1450		0,4	32	400
6		0,15	0,11	920		0,35	8
	0,18	0,132	930		0,35	10	400
	0,35	0,26	940		0,3	16	400
	0,5	0,37	950		0,3	20	400

9 ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ

Η αξιοπιστία της λειτουργίας των μονοφασικών κινητήρων οφείλεται άμεσα στην χρήση από αυτούς φυγοκεντρικών διακοπών (Centrifugal starting switches). Υπάρχουν τουλάχιστον 3 βασικά είδη φυγοκεντρικών διακοπών:

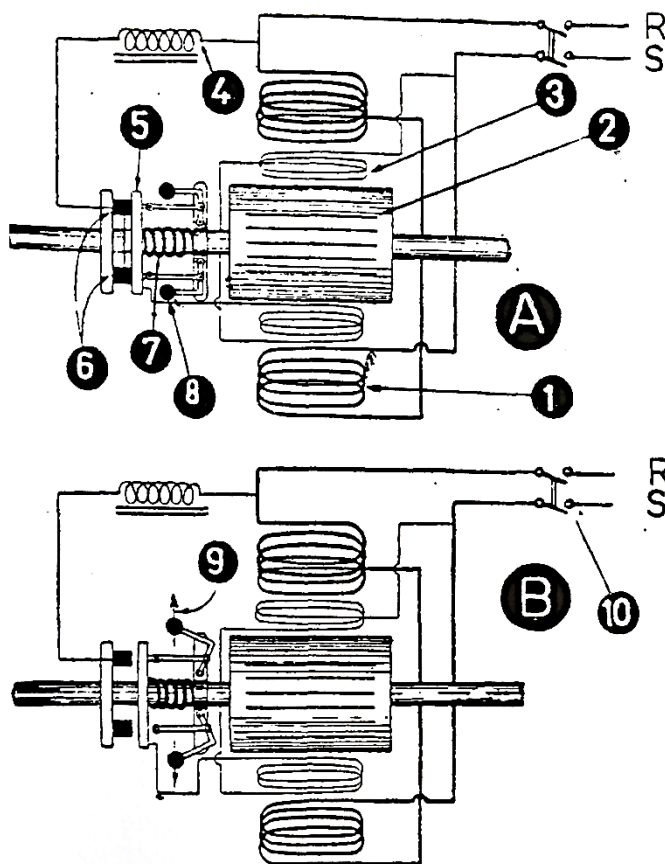
1° Μονής επαφής – μονής ροής: Είναι σε κλειστή θέση στη φάση της εκκίνησης και ανοίγει στην κανονική λειτουργία. Αυτό συμβαίνει περίπου στο 70% των ονομαστικών στροφών του κινητήρα και ο ποιο κοινός και ο ποιο πολυχρησιμοποιούμενος τύπος φυγοκεντρικού διακόπτη. Χρησιμοποιείται σε μοτέρ με ένα πυκνωτή εκκίνησης ή δύο (εκκίνησης μονίμου λειτουργίας) πυκνωτές και σε μοτέρ διχασμένων πόλων.

2° Διακόπτης μετασχηματισμού (transfer switch) μονής επαφής – διπλής ροής: Χρησιμοποιείται κυρίως σε μοτέρ με δύο πυκνωτές που διαθέτουν και μονάδα πυκνωτή-μετασχηματιστή.

3° Ειδικός διακόπτης για εναλλαγή συνδέσεως επαφών και ηλεκτρική αλλαγή φοράς περιστροφής σε κινητήρες με πυκνωτή εκκίνησης.

Ο φυγοκεντρικός διακόπτης τοποθετείται στο δρομέα και συγκεκριμένα πάνω στον άξονα του δρομέα. Λέγεται φυγοκεντρικός γιατί είναι τέτοια η κατασκευή του έτσι ώστε περιστρεφόμενος μαζί με το δρομέα στην αρχική φάση της εκκίνησης είναι κλειστός. Φτάνοντας όμως στο 70% περίπου των σύγχρονων στροφών του κινητήρα (στηριζόμενη η κατασκευή του στην αρχή της φυγόκεντρου δυνάμεως), αλλάζει κατάσταση και έτσι βγάζει εκτός κυκλώματος το βοηθητικό τύλιγμα του στάτη, ή όπως αλλιώς λέγεται, τύλιγμα εκκίνησης μαζί με ότι άλλο έχει προβλέψει για σύνδεση σε σειρά με αυτό ο κατασκευαστής (πυκνωτής, αντίσταση κ.α.).

Το παρακάτω σχήμα Σχ.1 δείχνει διάγραμμα φυγόκεντρου διακόπτη τοποθετημένου επί του άξονος κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.



Σχήμα.1:

Διάγραμμα φυγόκεντρου διακόπτη τοποθετημένου επί του άξονος κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.

A. Θέση του διακόπτη πριν την εκκίνηση.

1. Κύριο τύλιγμα
2. Βραχυκυκλωμένος δρομέας
3. Βοηθητικό τύλιγμα
4. Φίλτρο
5. Πλαξ επαφών

B. Θέση του διακόπτη κατά την λειτουργία

6. Επαφές διακόπτη
7. Ελατήριο διακόπτη
8. Αντίβαρο
9. Διεύθυνση φυγόκεντρου δυνάμεως
10. Κύριος διακόπτης (διακόπτης τροφοδοτήσεως).

10 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΙΔΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

10.1 Αντίσταση Μαγνητίσεως Ανά Φάση

Η αντίσταση

$$X = 31,6 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot T_p^2 / (2 \cdot \rho \cdot g) \cdot \lambda \cdot L \text{ Ohms}$$

Όπου:

2ρ = αριθμός πυλών.

f = συχνότητα σε c/sec

N = αριθμός σπειρών ανά φάση

g = αριθμός αυλακιών ανά πόλο και φάση

L = μήκος αγωγού στον πυρήνα

λ = συντελεστής ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας (αγωγιμότητα)

Στην περίπτωση αντίστασης σκέδασης του αυλακιού βάζουμε λ_s .

Στην περίπτωση σκέδασης προεξοχής βάζουμε $L_0 \cdot \lambda_0$, αντί για την $L \cdot \lambda$ πιο πάνω έκφραση.

Η μέθοδος για τον προσδιορισμό του λ σε διάφορους τύπους έχει ήδη αναπτυχθεί.

10.2 Ισχύς και Διαστάσεις μιας Ηλεκτρικής Μηχανής

Η ισχύς μιας AC ηλεκτρικής μηχανής εκφράζεται σε KVA στην έξοδο για γεννήτριες και σε KVA στην είσοδο για κινητήρες. Στην περίπτωση DC μηχανών εκφράζεται σε KW αντίστοιχα. Οι κύριες διαστάσεις στην περίπτωση περιστρεφόμενης μηχανής είναι η διάμετρος του στάτορα, η εσωτερική διάμετρος (οπή) και το μήκος του πυρήνα του στάτορα.

Η σχέση μεταξύ της εξόδου μιας μηχανής και των διαστάσεων, φαίνεται από τα πιο κάτω:

Έχουμε:

D = διάμετρος εσωτερική του στάτορα σε m

L = μήκος του πυρήνα του στάτορα σε m

2P= αριθμός των πόλων

η = ταχύτητα περιστροφής ανά sec ($\eta/60$)

P ή S = ηλεκτρική ισχύς της μηχανής σε KVA

I ϕ = ρεύμα ανά φάση σε A

K α = συντελεστής τυλίγματος

f = συχνότητα σε c/sec

N = αριθμός σπειρών στη σειρά ανά φάση

$\Phi\alpha$ = ροή στο διάκενο αέρα (ωφέλιμη ροή ανά πόλο)

Για τριφασική μηχανή η ισχύς δίνεται από:

P ή S = $3 \cdot 4,44 \cdot K\alpha \cdot f \cdot N \cdot I\phi \cdot \Phi\alpha \cdot 10^{-3}$ σε KVA

Ενώ για μονοφασική μηχανή έχουμε:

$P = D^2 \cdot L \cdot B_g \cdot q \cdot (\text{rpm}) \cdot n \cdot (\cos\theta) / (6,1 \cdot 10^{11})$ (hp)

Όπου:

q = αμπεραγωγοί ανά cm

B $_g$ = μέση μαγνητική επαγωγή στο διάκενο

rpm = ονομαστικές στροφές ανά λεπτό

n = βαθμός απόδοσης

θ = γωνία ρεύματος – τάσης τροφοδοσίας

10.3 Οι επαγωγικές Τάσεις (ΗΕΔ) στους σύγχρονους κινητήρες

Οι επαγωγικές τάσεις E_1 στο πρωτεύων τύλιγμα και E_2 στο δευτερεύων τύλιγμα του κινητήρα, δίνονται από τις σχέσεις:

$$E_1 = -j \times 4.44 \times K_{1a} \times f_1 \times N_1 \times \phi_0$$

$$E_2 = -j \times 4.44 \times K_{2a} \times f_2 \times N_2 \times \phi_0$$

Όπου:

$K_{1a} = K_{1\beta} K_{1\delta}$ = συντελεστής τυλίγματος

$K_{1\beta} = \eta_m(\beta/2)$ = συντελεστής βήματος

$K_{1\delta} = \eta_m(\kappa\delta/2)/\eta_m(\delta/2)$ = συντελεστής διανομής

β = ηλεκτρική γωνία μεταθέσεως δύο στοιχείων

κ = διάκενο ανά πόλο και φάση

δ = ηλεκτρική γωνία μετατόπισης σε αριθμό οδοντώσεων μεταξύ δύο διαδοχικών πηνίων

f_1 = συχνότητα ρεύματος

$N_1 = Z_1/2$: αριθμός σπυρών μιας φάσης

Z_1 = αριθμός αγωγών μιας φάσης

$\phi_0 = 2/\pi \times B_{\max} \times L \times \tau_r$

B_{\max} = μέγιστη μαγνητική επαγωγή στο διάκενο της μηχανής

L = το μήκος του δρομέα

τ_r = πολικό βήμα της μηχανής

10.4 Ειδική Μαγνητική Φόρτιση (Μέση Μαγνητική Επαγωγή)

Ειδική μαγνητική φόρτιση είναι ο μέσος όρος της πυκνότητας της μαγνητικής ροής, πάνω από όλη την επιφάνεια του διακένου (αέρα μέσα στη μηχανή)

$$B = 2r \Phi_0 / \pi \times D \times L$$

10.5 Ειδική Ηλεκτρική Φόρτιση

Είναι ο αριθμός των Αμπέρ αγωγών ανά μονάδα μήκους της περιφέρειας επιφάνειας του διακένου της μηχανής. Είναι μια σταθερά που εκλέγεται από την επιτρεπόμενη πυκνότητα ρεύματος στους αγωγούς των τυλιγμάτων της μηχανής. Η έκφραση της πυκνότητας για τους Αμπεραγωγούς Δ δίνεται από:

$$\Delta = 32 T\phi I\phi / \pi D \text{ Αμπεραγωγούς /m}$$

Η τιμή του ρεύματος είναι η ενεργός (grm) τιμή. Η ειδική μαγνητική φόρτιση περιορίζεται από τον κορεσμό και τις απώλειες στα δόντια και την διέγερση που απαιτείται για να υπερκαλύψει τη μαγνητική αντίσταση του διακένου (αέρα).

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση εξαρτάται από τη μέγιστη απώλεια C_u , που είναι $P_a = I^2 \times Z$ και αποτέλεσμα της αντίδρασης του επαγωγισμού. Εξαρτάται επίσης και από τον τύπο των μονώσεων και τις μεθόδους αερισμού και ψύξεως που χρησιμοποιούνται για την μηχανή. Η μέση τιμή πυκνότητας ροής που χρησιμοποιείται στο διάκενο στις επαγωγικές μηχανές είναι μεταξύ 0,45 – 0,6 Wb/m². Για τις σύγχρονες μηχανές είναι μεταξύ 0,6 – 0,8 Wb/m² και για τις DC μηχανές είναι μεταξύ 0,4 – 0,8 Wb/m².

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση που χρησιμοποιείται για μικρές και μεσαίου μεγέθους μηχανές είναι μεταξύ 30.000 – 40.000 Αμπεραγωγούς/cm. Εκλέγοντας B και Δ , και αντικαθιστώντας τις τιμές αυτών και τις $f = \rho n / 60$ η έξοδος της μηχανής είναι:

$$S = 4,44 \times K_a \times \rho \times \eta / 2 (\pi \times D \times L \times B / 2\rho) \times \pi / 2 \times D \times \Delta \times 10^{-3}$$

$$S = 1,11 \times K_a \times \pi^2 \times B \times \Delta \times D^2 \times L \times \eta \times 10^{-3}$$

Από αυτό φαίνεται ότι η ισχύς της μηχανής είναι ανάλογη της ειδικής μαγνητικής φόρτισης, της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης, και του D^2L , γινομένου των διαστάσεων της μηχανής και της ταχύτητας της μηχανής. Αφού εκλεγούν η ειδική μαγνητική και η ειδική ηλεκτρική φόρτιση ώστε να ταιριάζουν με τα χρησιμοποιούμενα υλικά και τις συνθήκες της μηχανής και δοθεί η ταχύτητα (η ταχύτητα μπορεί να περιοριστεί στα 100 m/sec. Για τις περισσότερες μηχανές η ταχύτητα είναι 30 m/sec).

Το ερώτημα για τον σχεδιαστή είναι η εκλογή των κατάλληλων D και L , ώστε να παρέχουν το επιθυμητό γινόμενο D^2L . Ο σκοπός του σχεδιαστή είναι να φτιάξει όσο το δυνατόν μικρότερη διάμετρο για να έχουμε συμπαγή μηχανή.

11 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΕΑ (ΑΠΛΟΥ ΚΛΟΒΟΥ) ΜΕ ΠΥΚΝΩΤΗ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ

11.1 Σχεδιασμός μονοφασικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα κλασματικής ισχύος

Ο κινητήρας κλασματικής ισχύος κατασκευάζεται για μονοφασική, διφασική ή και τριφασική τροφοδότηση.

Στους μονοφασικούς διακρίνουμε τρεις τύπους:

(α) Τον κινητήρα γενικών εφαρμογών: Κατασκευάζεται για ροπή εκκίνησης 110% - 225% και ροπή ανατροπής 200% - 280% της ροπής ολικού φορτίου. Χρησιμοποιείται σε ανεμιστήρες, εξαεριστήρες, μηχανές γραφείου και σε μικρά εργαλεία. Η ισχύς εξόδου κυμαίνεται από (1/20 – 1/3)hp για συχνότητα τάσης 60, 50, και 25 c/sec, τάση 115-230V, στροφές 2850, 1425 και 960 μόνο για συχνότητα 25 c/sec.

(β) Τον κινητήρα υψηλής ροπής: Που έχει 200% - 300% ροπή εκκίνησης και 260% - 350% ροπή ανατροπής της ροπής ολικού φορτίου. Χρησιμοποιείται κυρίως σε πλυντήρια και σιδερωτήρια. Η ισχύς εξόδου είναι 1/6, 1/4 ή 1/3 hp σε συχνότητα τάσης 60, 50, και 25 c/sec και τάση 115-220V. Οι στροφές του είναι 1725 για 60 c/sec, 1425 για 50 c/sec και 1425 για 25 c/sec.

(γ) Τον κινητήρα με πυκνωτή εκκίνησης: Παρουσιάζει 300% - 450% ροπή εκκίνησης με 225% - 300% ροπή ανατροπής της ροπής ολικού φορτίου με χαμηλό ρεύμα εκκίνησης. Η ισχύς εξόδου κυμαίνεται από (1/6 – 3/4)hp για 60, 50 και 25 c/sec συχνότητας τάσης τροφοδοσίας με στροφές 2850, 1425 και 960 για 50 c/sec. Η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι 70 – 80μf για 1/8hp, 120 – 150μf για 1/4hp και 230 – 285μf για 1/2hp.

Το τύλιγμα εκκίνησης βγαίνει εκτός με ένα φυγοκεντρικό διακόπτη στη φάση της εκκίνησης και συγκεκριμένα στα 70% των σύγχρονων στροφών. Οι κινητήρες αυτοί παρουσιάζουν υψηλό συντελεστή ισχύος, υψηλή απόδοση και για αυτά τους τα χαρακτηριστικά είναι ιδεώδεις για συμπιεστές (κομπρεσέρ αέρα), αντλίες, ψυγεία και κλιματιστικές συσκευές.

Η χωρητικότητα του πυκνωτή μπορεί να κυμαίνεται από 3 έως 15μf αν παραμένει με το βοηθητικό τύλιγμα σε όλη την φάση της λειτουργίας του κινητήρα.

Τότε η ροπή εκκίνησης είναι μόλις 40 – 50% της ροπής ολικού φορτίου. Χρησιμοποιούμε ηλεκτρολυτικό πυκνωτή για τη φάση εκκίνησης και πυκνωτή χάρτου για μόνιμη λειτουργία.

11.2 Μελέτη Ασύγχρονου Μονοφασικού Επαγωγικού Κινητήρα

1. Ισχύς εξόδου 0,75hp (Αγγλικός ίππος) / 0,75KW
2. Τάση τροφοδοσίας = 220V
3. Συχνότητα τάσης τροφοδοσίας = 50 c/sec (Hz)
4. Στροφές: (α) σύγχρονες = 3000 r.p.m
(β) ονομαστικές = 2800 r.p.m
5. Αριθμός πόλων στάτη = 2
6. Αεριζόμενου τύπου με ανεμιστήρα

$$D^2L = \frac{S}{1.11 \times K_w \times \pi^2 \times \alpha_c \times \text{rpm}/60 \times 50}$$

$$D^2L = \frac{10.57}{1.11 \times 0.96 \times \pi^2 \times 0.45 \times 23000 \times 50 \times 10^{-3}} = 0.218 \text{mm}^3$$

Όπου: S= 10.57 KVA, q=23000 αμπεραγωγοί/mm, πόλοι 2p=2, rpm= 2800, cosφ= 0.8, η=0.65, B= 0.45 και Kw = 0.96

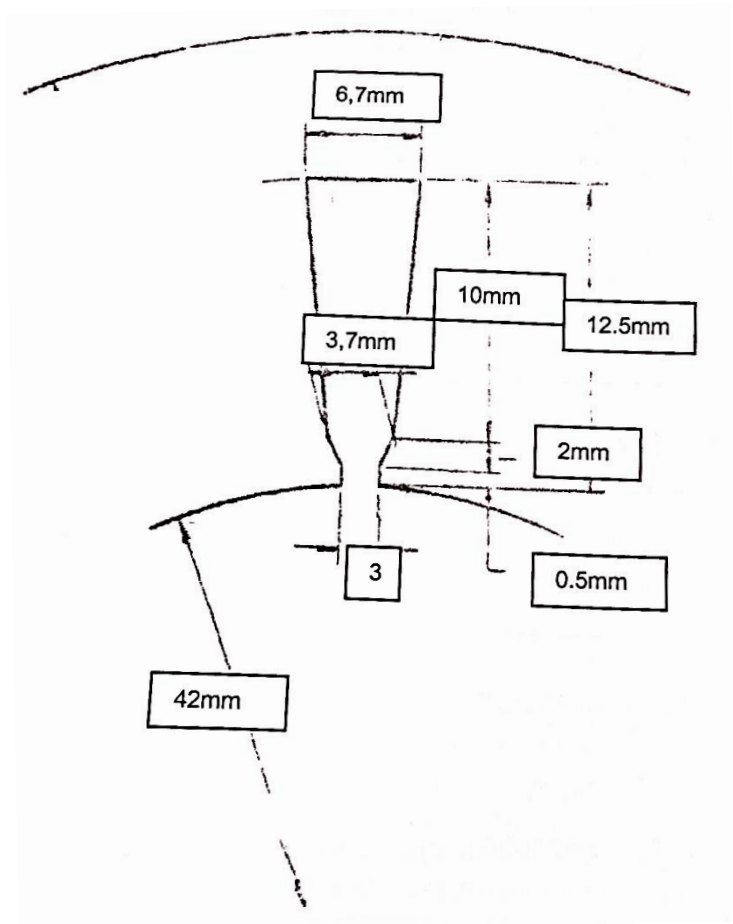
Επειδή ο κινητήρας είναι μονοφασικός έχουμε: $D^2L = 1.5 \times 0.218 = 0.330 \text{ mm}^3$
Άρα διαλέγω:

7. Εσωτερική διάμετρος στάτη = 76 mm (D)
8. Μήκος πυρήνα στάτη = 60mm (L)
9. Φαινόμενη επιφάνεια διακένου μαγνητικού = $\gamma_a \times L = 12 \times 60 = 7200 \text{ mm}^2$
10. Πολικό βήμα $\gamma_a = \pi \times 7.6 / 2 = 12 \text{ cm}^2$
11. Εύρεση του αριθμού των αυλακιών / πόλο Q: $Q = n_a / 2p = 24/2 = 12$ αυλάκια / πόλο
12. Ρεύμα τροφοδοσίας = $I = 550 / (220 \times 0.65 \times 0.8) = 4.7 \text{ A}$
13. Αγωγός τυλίγματος στάτη = Αγωγός No 21 S.W.g.
14. Διάμετρος γυμνού αγωγού (χωρίς μόνωση) = 0.769 mm
15. Πάχος μόνωσης = 0.125 mm
16. Διάμετρος αγωγού (με μόνωση) = 0.8946 mm
17. Τα 2/3 των αυλακιών του στάτη καταλαμβάνονται από το κύριο τύλιγμα και το 1/3 από το βοηθητικό τύλιγμα (τύλιγμα εκκίνησης). Αριθμός αυλακιών ανά πόλο: $Q=24/2=12$ αυλάκια
18. Μαγνητική ροή στο διάκενο = $\gamma_a \times L \times B = 120 \times 60 \times 0.45 \times 10^{-3} = 3.5 \times 10^{-3} \text{ Wb}$
19. Αγωγοί σε σειρά στο κύριο τύλιγμα = $E = 4.44 \times \phi \times f \times \text{TKT}$

$$T = 220 / 4.44 \times 3.5 \times 10^{-3} \times 50 \times 0.829$$

$$T = 340 \text{ ανά πόλο όπου } \text{KT} = 0.829 \text{ (συντελεστής διανομής)}$$

Διαλέγουμε 320 αγωγούς.



Σχήμα 1

11.3 Κύριο Τύλιγμα

1. **Εύρεση του αριθμού των αυλακιών που καταλαμβάνει το κύριο τύλιγμα:**

$$Q = Q \times 2/3 = 8 \text{ αυλάκια} / \text{πόλο}$$

2. **Συντελεστής τυλίγματος :** $K_T = 0,829$

3. **Βήμα κύριου τυλίγματος :** $1 - 9$

4. **Αγωγοί ανά αυλάκι** = θα πάρουμε $320/8 = 40$ αγωγούς ανά αυλάκι

5. **Απαιτούμενη διατομή στο αυλάκι του στάτη** = $40 \times \pi/0.8946^2 = 25 \text{ mm}^2$

Ο μέγιστος αριθμός ελιγμάτων του κύριου τυλίγματος με βήμα $1 - 9$ είναι 34.46% με συντελεστή κατανομής $K_T = 0.829$. Οι διάμετρος του αγωγού με μόνωση είναι 0.8946 mm^2 διατομή στο αυλάκι $\pi \times 0.8946^2/4 = 0.628 \text{ mm}^2$ και $40 \times 0.628 = 25.12 \text{ mm}^2$ και $25.12 \times 2 = 50.24 \text{ mm}^2$.

6. **Απαιτούμενη διατομή αυλακιού του στάτη** = $[(6.7+3.7)/2] \times 10 = 52 \text{ mm}^2$.

Άρα μας ικανοποιεί το αυλάκι

7. **Ωμική αντίσταση κύριου τυλίγματος στους 15°C** = $0.017 \times 7.6 \times 40 \times 0.284 / 0.518 = 2.82 \Omega$

$$R_{\text{hot}} = 4.1 \Omega \text{ (κατάσταση λειτουργίας)}$$

8. **Μάζα χαλκού** = $0.197 \times 7.6 \times 40 \times 0.284 \times 0.5189 = 3.14 \text{ lb}$

11.4 Τύλιγμα Εκκίνησης (Βοηθητικό Τύλιγμα)

1. Εύρεση του αριθμού των αυλακιών $n_{\alpha\beta\tau}$

$$75 \times \pi/4 \times d_c^2 = 25.12\text{mm}^2$$

$$\text{Άρα } d_c = 0.66 \text{ mm}^2$$

$n_{\alpha\beta\tau} = 24 \times 1/3 = 8$ αυλάκια, 4 αυλάκια ανά πόλο. Έχει 4 ομάδες ελιγμάτων με 75 ελιγματα ανά ομάδα.

2. Διάμετρος αγωγού ελιγματος = $d_c = 0.7\text{mm}$
3. Αγωγός βοηθητικού τυλίγματος = $N_o = 24 \text{ SWg}$
4. Διάμετρος γυμνού αγωγού (χωρίς μόνωση) = 0.695mm
5. Πάχος μόνωσης = 0.05mm
6. Διάμετρος αγωγού με μόνωση = 0.7mm
7. Διατομή στο αυλάκι του στάτη = $75 \times 0.7854 \times 0.70^2 = 28.86\text{mm}^2$
8. Ωμική αντίσταση στους $15^\circ\text{C} = 15.5\Omega$, $R_{\text{hot}} = 20\Omega$
9. Μήκος στο διάκενο μεταξύ στάτη – δρομέα = 0.25mm

11.5 Δρομέας

1. Εξωτερική διάμετρος δρομέα = 84mm
2. Αριθμός αυλακιών = 19
3. Μήκος ράβδου κλωβού = 7.9 cm
4. Διάμετρος ράβδου κλωβού = 5 mm
5. Ωμική αντίσταση στις ράβδους στους $15^\circ\text{C} = 0.017 \times 19 \times 0.055/21.6 = 0.00082\Omega$
6. Ωμική αντίσταση ράβδου (HOT) = 0.000099Ω
7. Αντίσταση ράβδου (HOT) = $0.00169/33 \Omega = 0.000052\Omega$
8. Ωμική αντίσταση δακτυλίου = $0.017 \times \pi \times 0.113/19 = 0.0001\Omega$
 $R_{\text{hot}} = 0.00012\Omega$, (ένας αλουμίνιος δακτύλιος σε κάθε άκρο του κλωβού επιφανείας 40mm^2 ο καθένας).
9. Ωμική αντίσταση τομέα δακτυλίου μεταξύ δύο ράβδων = $0.00012/19 = 0.0000063\Omega$.

11.6 Υπολογισμός Πυκνωτή

$$C = P_{\pi} \times 10^6 / \omega \times (\alpha \times V)^2$$

$$C = 4000 \times 10^6 / 49 \times 10^6 = 81 \text{ Mf}$$

Όπου:

P_{π} = ισχύς του πυκνωτή σε VA

$$\omega = 2\pi f$$

V = τάση τροφοδοσίας

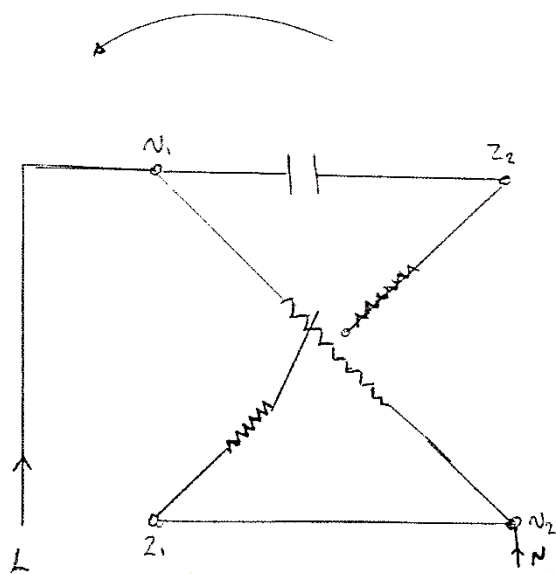
$\alpha = 1.8$, συντελεστής που εξαρτάται από την τάση τροφοδοσίας

11.7 Υπολογισμός Ολίσθησης S

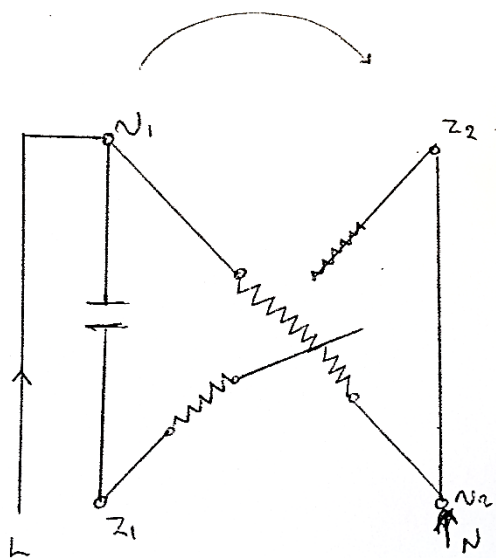
$$n_R = (1-s) \times 60 \times f/2$$

$$s = 0.86$$

11.8 Κύκλωμα του κινητήρα



Σχήμα 1



Σχήμα 2

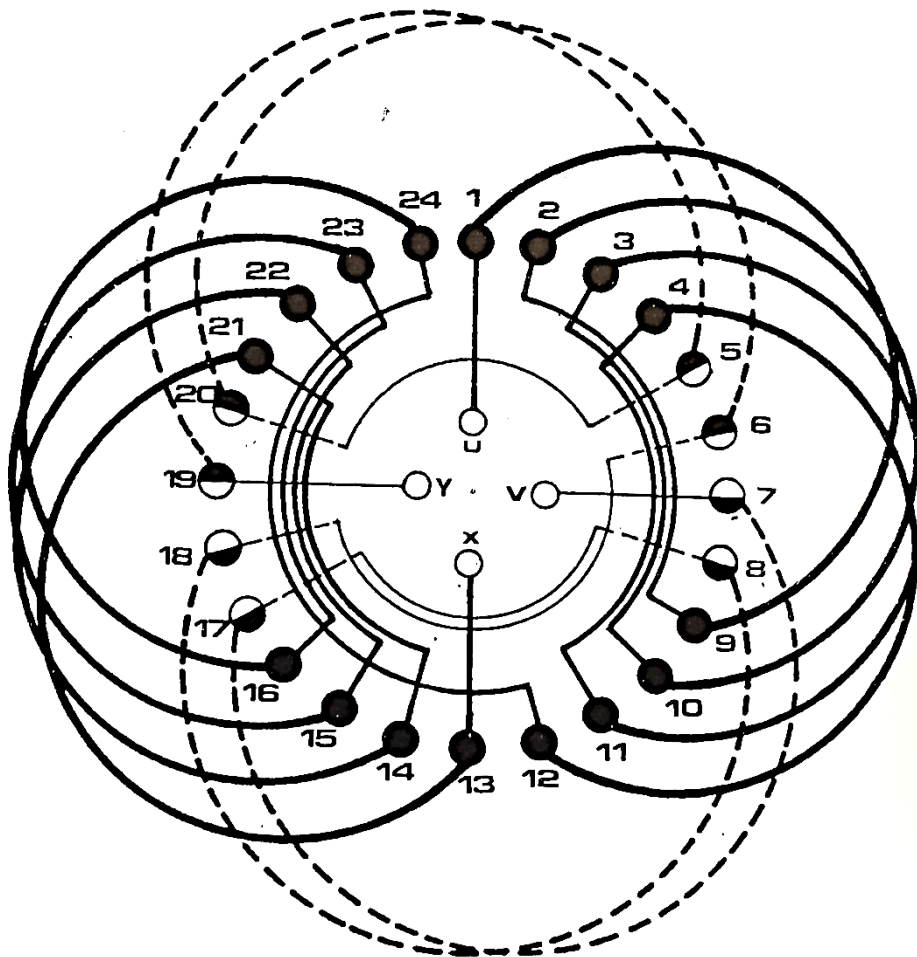
Παρατήρηση: Στο **σχ.1** ο κινητήρας δουλεύει αριστερόστροφα ενώ στο **σχ.2** δουλεύει δεξιόστροφα. Επίσης ο φυγοκεντρικός διακόπτης χωρίζει το βοηθητικό τύλιγμα μόνο και μόνο για κατασκευαστικούς λόγους γιατί διευκολύνεται η τοποθέτηση του πυκνωτή πάνω στον συγκεκριμένο κινητήρα.

11.9 Τυλίγματα Στάτη σε Κυκλική Μορφή

Στάτης μονοφασικός $2p = 2$, $n = 24$

U-X Κύριο τυλίγμα

V-Y Βοηθητικό τυλίγμα

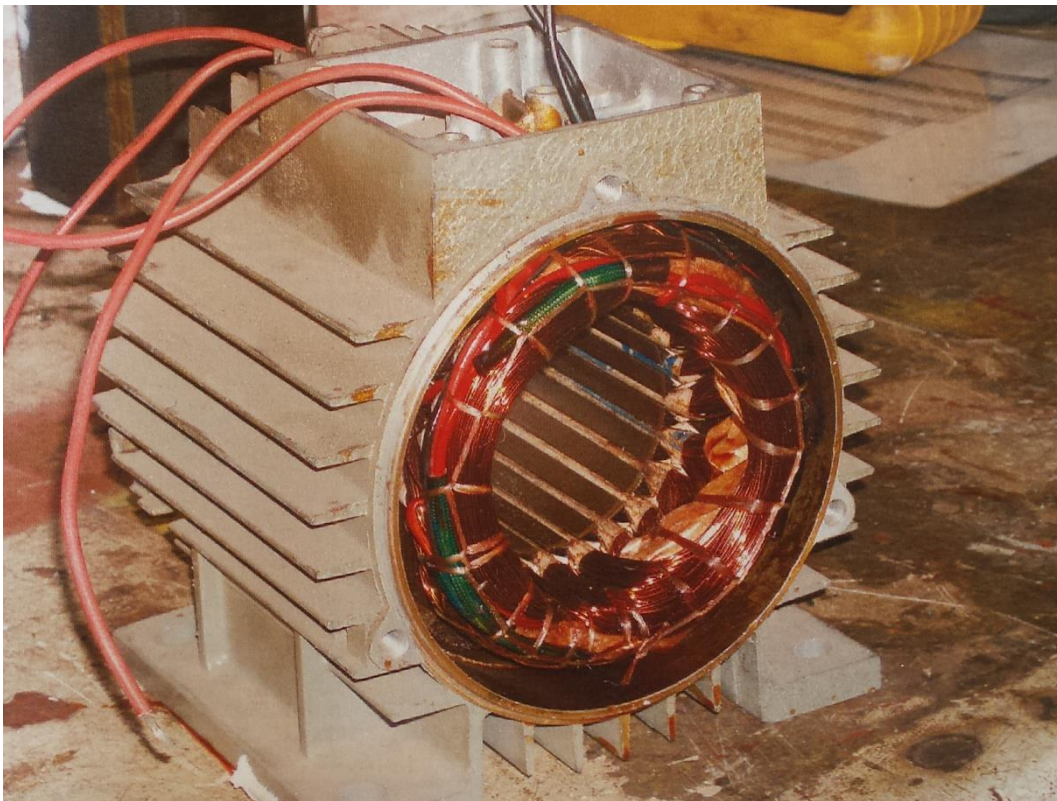


Σχήμα 3

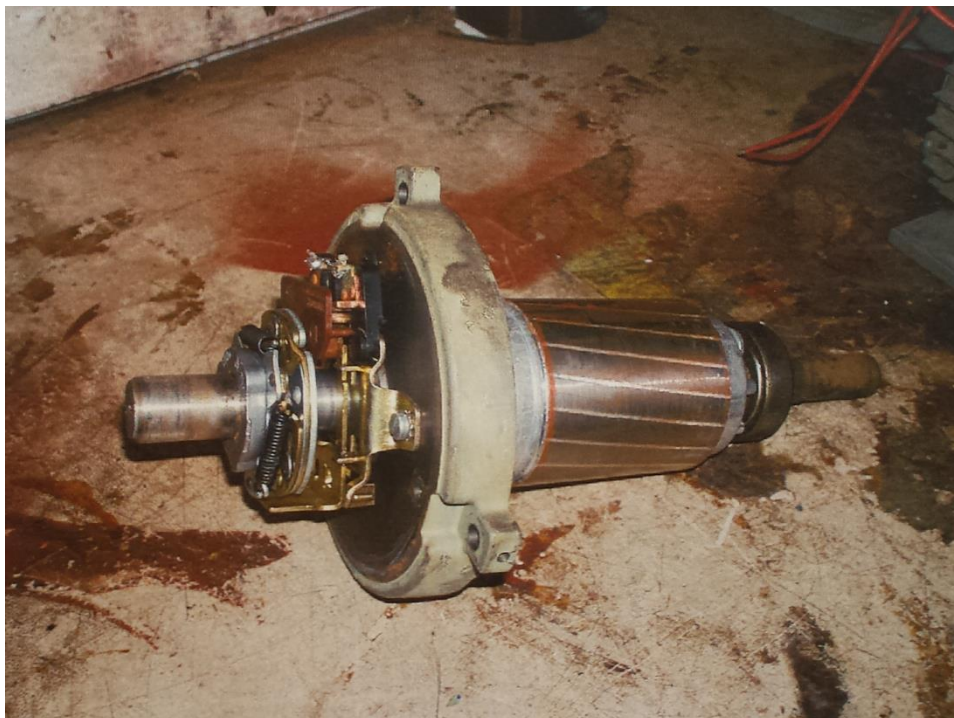
Κύριο τυλίγμα: Βροχοειδές με πόλους εναλλάξ, 2 συγκροτήματα από 4 μάτσα.

Βοηθητικό τυλίγμα: Πόλοι εναλλάξ, 2 συγκροτήματα από 2 μάτσα.

11.10 Μονοφασικός Κινητήρας εν ώρα συναρμολόγησης



Στάτης κινητήρα με τα τυλίγματα του



Δρομέας του κινητήρα με το φυγοκεντρικό διακόπτη



Ο κινητήρας κατά τη συναρμολόγηση (α)



Ο κινητήρας κατά τη συναρμολόγηση (β)



Η τελική μορφή του κινητήρα με τον πυκνωτή

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Design And Testing of Electrical Machines – M. V. Deshpande
2. Electric Motors. – Edwin P. Anderson
3. Ηλεκτρικά Μηχανά Τόμος Β Εναλλασσομένου Ρεύματος – Ίδρυμα Ευγενίδου
4. Ηλεκτρικές Μηχανές AC/DC – Stephen J. Charman
5. Ηλεκτρικές Μηχανές Β – Α . Μ. Σαφάκας
6. Ηλεκτροτεχνία. – Γ. Γιαννόπουλος
7. Ηλεκτροτεχνία. – Σ. Τούλογλου, Γ. Βερναδάκης
8. Τυλίγματα Ηλεκτρικών Μηχανών – Στέλιου Αντωνοπούλου