

**ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ  
ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ  
ΙΣΧΥΟΣ 3KW**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:  
ΤΣΙΜΟΥΡΤΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ:  
ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ  
ΚΑΛΑΝΤΖΟΠΟΥΛΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2013**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πατρών, στο τμήμα Ηλεκτρολογίας και έχει ως αντικείμενο την μελέτη και ανακατασκευή ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα ισχύος 3.5 kw.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εισηγητή και καθηγητή μου Δρ. Μηχανικό κ. Χαραλαμπίκο Βασίλειο για τον χρόνο που αφιέρωσε καθ' όλη την διάρκεια της εν λόγω πτυχιακής εργασίας, γεγονός που με βοήθησε να κατανοήσω βαθύτερα το υπό μελέτη αντικείμενο και να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου στον τομέα της ηλεκτρομηχανικής.

Στην συνέχεια, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον

κ. Καλαντζόπουλο Γεώργιο, ο οποίος με την εμπειρία του πάνω στις ηλεκτρικές μηχανές συνέβαλε σημαντικά στην ολοκλήρωση του πρακτικού μέρους της εν λόγω εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τον κ. Καλαντζόπουλο Αθανάσιο, ο οποίος με τις γνώσεις του βοήθησε και έλυσε όποιο πρόβλημα ή απορία προέκυψε κατά την εκπόνηση της εργασίας και ιδιαίτερα κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο την μελέτη και ανακατασκευή ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα ισχύος 3.5 kw. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η δομή των επαγωγικών κινητήρων αναφορικά μεταξύ άλλων με την συγκρότηση των τυλιγμάτων, την σύνδεση των φάσεων καθώς και τα χαρακτηριστικά ροπής – ταχύτητας, καταλήγοντας σε μία ιδιαίτερη αναφορά στα μοντέλα σχεδίασης κινητήρων, τα οποία έχουν καθιερωθεί από διάφορους παγκόσμιους φορείς, όπως η IEC και η NEMA. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η ανακατασκευή ενός επαγωγικού κινητήρα από την αφαίρεση των παλιών τυλιγμάτων έως και τη τοποθέτηση των νέων με λεπτομερή παράθεση των βημάτων και των μεθόδων που ακολουθήθηκαν. Η εν λόγω ανακατασκευή ολοκληρώνεται με τον τελικό έλεγχο της καινούργιας περιέλιξης. Εν συνεχεία, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δύο πειραμάτων, του πειράματος χωρίς φορτίο και του πειράματος ακινητοποιημένου δρομέα, με σκοπό τον προσδιορισμό των τιμών των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος του επαγωγικού κινητήρα, βάσει των προτύπων της IEC. Στο τελευταίο μέρος του εν λόγω κεφαλαίου υπολογίζεται το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thevenin, με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να καθορίσουμε επακριβώς την χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας του κινητήρα. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται θεωρητική μελέτη για την σχεδίαση ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα παρόμοιου με αυτόν που παρουσιάστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Πιο αναλυτικά, προσδιορίζονται οι τεχνικές προδιαγραφές του κινητήρα, υπολογίζονται μεταξύ άλλων οι διαστάσεις του κινητήρα, ο αριθμός και οι διαστάσεις των αυλακώσεων ανά πόλο και φάση, το ισοδύναμο κύκλωμα και οι επαγωγικές αντιδράσεις, καταλήγοντας στα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κινητήρα.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

- 1.1 Η δομή των επαγωγικών κινητήρων 1
- 1.2 Τυλίγματα στάτη εναλλασσομένου ρεύματος 2
  - 1.2.1 Συγκρότηση των τυλιγμάτων του στάτη 2
  - 1.2.2 Είδη τυλιγμάτων 2
  - 1.2.3 Τύποι των τυλιγμάτων του στάτη 3
  - 1.2.4 Ακέραιο και μικρυνμένο βήμα 5
- 1.3 Σύνδεση των άκρων των φάσεων στην πινακίδα 6
- 1.4 Αρχή λειτουργίας 8
- 1.6 Ολίσθηση του δρομέα 9
- 1.7 Απώλειες και διάγραμμα ροής 10
- 1.8 Χαρακτηριστικά ροπής – ταχύτητας 11
- 1.9 Κλάσεις σχεδίασης 12

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΑΠΟΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

- 2.1 Στοιχεία κινητήρα 15
- 2.2 Αφαίρεση τυλιγμάτων 16
- 2.3 Περιέλιξη του κινητήρα 16

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

- 3.1 Πείραμα χωρίς φορτίο 23
- 3.2 Επεξεργασία μετρήσεων πειράματος χωρίς φορτίο 24
- 3.3 Πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα 26
- 3.4 Επεξεργασία μετρήσεων πειράματος ακινητοποιημένου δρομέα 28
- 3.5 Υπολογισμός ισοδύναμου Thevenin του κυκλώματος εισόδου 29

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

- 4.1 Προδιαγραφές του κινητήρα 33
- 4.2 Διαστασιολόγηση του κινητήρα 34
- 4.3 Τυλίγματα στάτη 36
- 4.4 Υπολογισμός διαστάσεων αυλακώσεων στάτη 42
- 4.5 Δρομέας 48
  - 4.5.1 Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα 50
  - 4.5.2 Υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα 52
- 4.6 Υπολογισμός μαγνήτισης 53
- 4.7 Υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος 54
  - 4.7.1 Υπολογισμός επαγωγικών αντιδράσεων 57
- 4.8 Απώλειες και βαθμός απόδοσης 60

- 4.9 Υπολογισμός χαρακτηριστικών λειτουργίας





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

## 1.1 Η δομή των επαγωγικών κινητήρων

Σε σχέση με τις υπόλοιπες ηλεκτρικές μηχανές οι επαγωγικοί κινητήρες (induction motor) αποτελούνται από δύο τυλίγματα, ένα στον στάτη και ένα στον δρομέα όπου τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση. Το τύλιγμα του δρομέα είναι γνωστό και ως τύλιγμα τυμπάνου.

Ανάλογα δε με τις τάσεις τροφοδοσίας και τον τύπο του κινητήρα, τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται είτε σε αστέρα είτε σε τρίγωνο. Το τύλιγμα του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένο και τροφοδοτείται έμμεσα με εναλλασσόμενο ρεύμα από τον στάτη λόγω επαγωγής. Μιας και για την λειτουργία του ασύγχρονου κινητήρα απαιτείται η τροφοδότηση με εναλλασσόμενη τάση μόνο του ενός από τα δύο τυλίγματα (και συγκεκριμένα του τυλίγματος του στάτη), ο ασύγχρονος κινητήρας χαρακτηρίζεται και σαν κινητήρας απλής τροφοδότησης (single-fed motor). [1]

Ως προς την κατασκευή του τυλίγματος του δρομέα, οι ασύγχρονοι κινητήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

- Κινητήρες περιελιγμένου δρομέα ή δακτυλιοφόροι (wound rotor)
- Κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα ή τύπου κλωβού (squirrel-cage rotor)

Το τύλιγμα του στάτη των δακτυλιοφόρων κινητήρων αποτελεί και αυτό ένα τριφασικό τύλιγμα με ίσο αριθμό πόλων με το τύλιγμα του τυμπάνου . Σε κινητήρες αυτού του είδους υπάρχει η δυνατότητα, μέσω των ψηκτρών, παρεμβολής πρόσθετης εξωτερικής ωμικής αντίστασης σε σειρά με κάθε φάση του τυλίγματος του δρομέα. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλη ισχύ και σε περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων σε ροπή εκκίνησης. [1]

Στους κινητήρες τύπου κλωβού, το τύλιγμα του δρομέα αποτελείται από χάλκινες ή αλουμιένιες μπάρες (ράβδους) τοποθετημένες κατά μήκος των αυλακώσεων οι οποίες βραχυκυκλώνονται περιμετρικά στα δύο άκρα μέσω κατάλληλων δακτυλίων (shorting rings).

## **1.2 Τυλίγματα στάτη εναλλασσομένου ρεύματος**

### **1.2.1 Συγκρότηση των τυλιγμάτων του στάτη**

Το τύλιγμα του στάτη είναι κατασκευασμένο από ομάδες με χάλκινο σύρμα ή από χάλκινες μπάρες. Οι ομάδες ή οι μπάρες είναι τοποθετημένα μέσα σε κατάλληλες αυλακώσεις, οι οποίες βρίσκονται στην εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια του στάτη.

Τα τυλίγματα με ομάδες χρησιμοποιούνται κανονικά για κινητήρες με μικρή ισχύ, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε κινητήρες με μεγάλη ισχύ και μεγάλη τάση. Στα τυλίγματα των κινητήρων με μικρή ισχύ η διάμετρος του αγωγού σπάνια ξεπερνάει τα 3mm. Για μεγαλύτερες διατομές συνίσταται η χρήση δύο ή περισσότερων αγωγών σε παράλληλη σύνδεση.

Τα τυλίγματα με μπάρες χρησιμοποιούνται συνήθως στις μηχανές με μεγάλη ισχύ και χαμηλή τάση. Στην περίπτωση που έχουμε υψηλή ένταση ρεύματος δεν ενδείκνυται η χρήση στρογγυλού σύρματος. Στα τυλίγματα με μεγάλη ένταση δεν ενδείκνυται η χρήση μεγάλων μπαρών, επειδή δημιουργούνται παρασιτικά ρεύματα. Αντίθετα, ενδείκνυται η χρήση αγωγών ορθογώνιας διατομής, μονωμένων μεταξύ τους και συνδεδεμένων παράλληλα. [4]

### **1.2.2 Είδη τυλιγμάτων**

Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος κατασκευάζονται με τρία είδη τυλιγμάτων τα οποία είναι :

- Τυλίγματα με μία ομάδα / αυλάκωση [4]
- Τυλίγματα με δύο ομάδες / αυλάκωση [4]
- Τυλίγματα με μία και δύο ομάδες / αυλάκωση [4]

Τα τυλίγματα με μία ομάδα ανά αυλάκωση ονομάζονται και τυλίγματα με μια στρώση. Τα τυλίγματα με δύο ομάδες ανά αυλάκωση ονομάζονται και τυλίγματα με δύο στρώσεις και τέλος τα τυλίγματα με μία και δύο ομάδες ανά αυλάκωση ονομάζονται μεικτά τυλίγματα. [4]

Τα τυλίγματα μπορεί να είναι μονοφασικά, διφασικά ή τριφασικά. Τα πλέον διαδεδομένα τυλίγματα είναι τα τριφασικά, τα οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι προκύπτουν από τρία μονοφασικά κυκλώματα μετατοπισμένα μεταξύ τους κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες.

### 1.2.3 Τύποι των τυλιγμάτων του στάτη

Τα τυλίγματα των ασύγχρονων κινητήρων διακρίνονται σε 3 συστήματα τα οποία είναι :

- Ομόκεντρο [4]
- Βροχοειδές (συνήθως ονομάζεται 'στεφάνης') [4]
- Κυματοειδές [4]

Τα τρία συστήματα μπορούν να διακριθούν σε δύο τύπους :

1. Με ομώνυμους πόλους [4]
2. Με εναλλάξ πόλους [4]

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

1. Τυλίγματα με βήμα ακέραιο [4]
2. Τυλίγματα με βήμα σμικρυμένο [4]

Όπως προαναφέρθηκε, τα τυλίγματα μπορούν να πραγματοποιηθούν με μία και με δύο ομάδες σε κάθε αυλάκωση. Στα τυλίγματα με μία ομάδα ανά αυλάκωση οι αγωγοί κάθε αυλάκωσης αποτελούν ένα στοιχείο, ενώ στα τυλίγματα με δύο ομάδες ανά αυλάκωση οι αγωγοί κάθε αυλάκωσης αποτελούν δύο στοιχεία.

Το βήμα των αυλακιών  $y_a$  είναι ίσο με το πολικό βήμα  $y_\pi$  στα τυλίγματα με βήμα ακέραιο :

$$y_a = y_\pi = q/2 \cdot P [4]$$

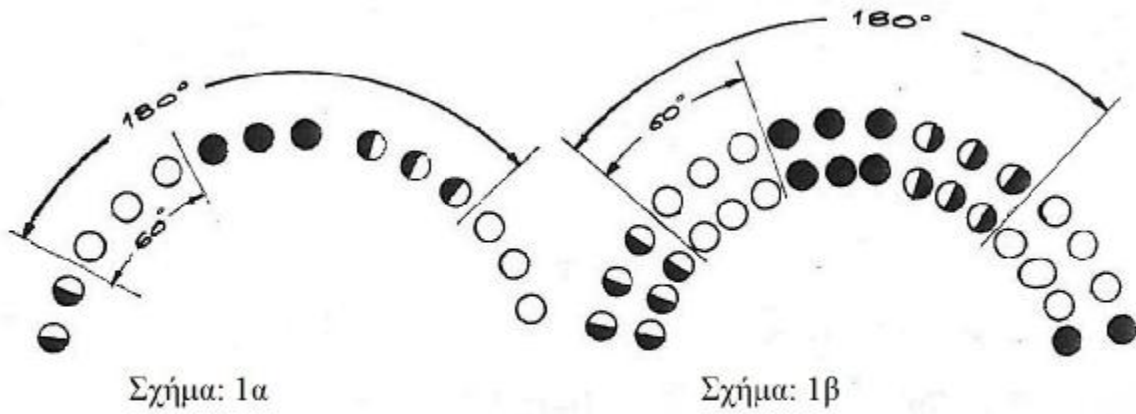
Όπου  $q$  το πλήθος των αυλακιών του στάτη και  $P$  οι πόλοι της μηχανής.

Στα τυλίγματα με βήμα σμικρυμένο το βήμα των αυλακιών  $y_a$  είναι πάντα μικρότερο του πολικού βήματος  $y_\pi$  :

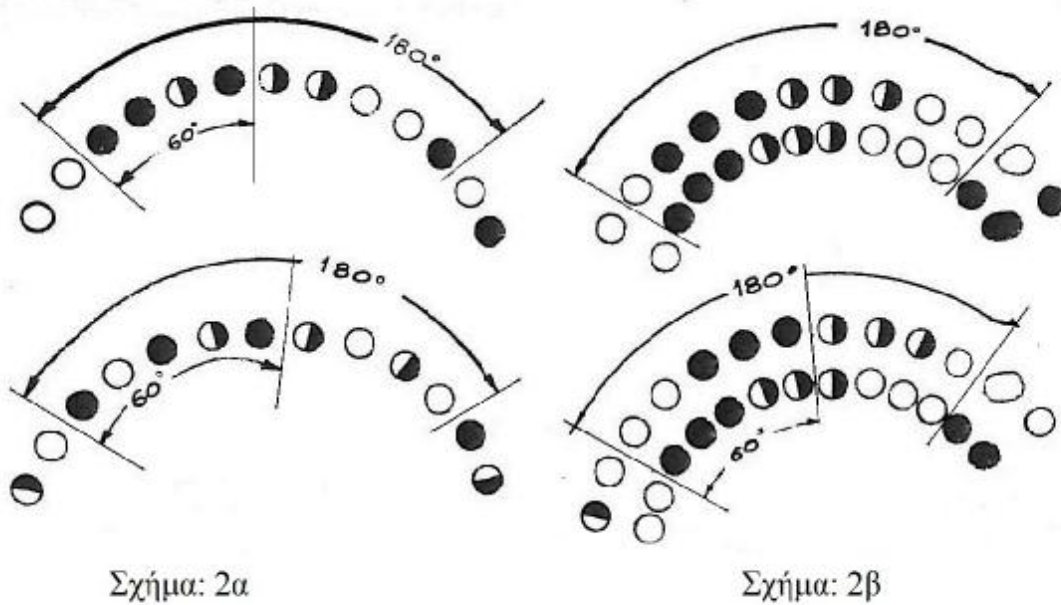
$$y_a < q/2 \cdot P [4]$$

Στα τυλίγματα με βήμα ακέραιο κάθε φάση συνήθως καταλαμβάνει το  $1/3$  του πολικού βήματος, δηλαδή τα στοιχεία κάθε φάσης είναι κατανομημένα συνήθως ομοιόμορφα κατά μήκος μιας ζώνης 60 ηλεκτρικών μοιρών (σχήμα 1α, 1β). [4]

Στα τυλίγματα με βήμα σμικρυμένο κάθε φάση καταλαμβάνει πάντα μια στρώση μεγαλύτερη του  $1/3$  του πολικού βήματος σχήμα 2α, 2β. [4]



Σχήμα 1: Βήμα ακέραιο.



Σχήμα 2: Βήμα σμικρυνόμενο.

Το βήμα των τυλιγμάτων με μία ομάδα ανά αυλάκωση μπορεί να θεωρηθεί ακέραιο, όταν προκύπτει λίγο διαφορετικό από το πολικό βήμα  $\gamma_p$ , αρκεί κάθε φάση να καταλαμβάνει συνεχώς το  $1/3$  του πολικού βήματος. Τόσο τα τυλίγματα με μια στρώση όσο και εκείνα με δύο στρώσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν με βήμα ακέραιο και βήμα σμικρυνόμενο. Συνήθως χρησιμοποιούμε το σμικρυνόμενο βήμα για τα τυλίγματα με δύο στρώσεις. [4]

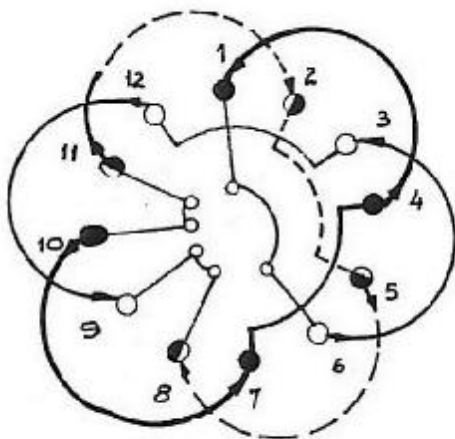
## 1.2.4 Ακέραιο και σμικρυσμένο βήμα

Όπως είπαμε τα τυλίγματα με ακέραιο αριθμό αυλακώσεων ανά πόλο και φάση μπορούν να πραγματοποιηθούν με βήμα ακέραιο ή σμικρυσμένο.

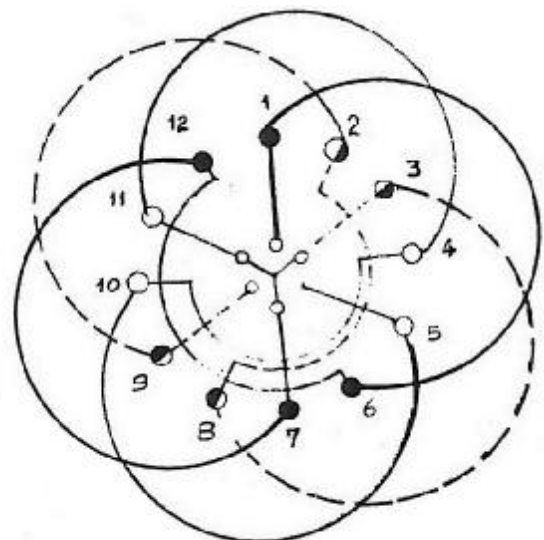
Πιο συγκεκριμένα, στα τυλίγματα με βήμα ακέραιο το βήμα των αυλακώσεων καθορίζεται από τη σχέση :

$$y_a = \frac{q}{3.2 * P} [4]$$

Οι μετωπικές συνδέσεις των ομάδων γίνονται με βάση το βήμα του τυλίγματος  $y_a$  με τέτοιον τρόπο, ώστε να πετυχαίνουμε ίσο αριθμό συγκροτημάτων με τους πόλους ή τα ζεύγη πόλων για τυλίγματα με πόλους εναλλάξ ή ομώνυμους αντίστοιχα. Οι ομάδες κάθε συγκροτήματος συνδέονται πάντα σε σειρά μεταξύ τους. Τα συγκροτήματα κάθε φάσεως συνδέονται είτε σε σειρά είτε παράλληλα είτε σειρά – παράλληλα. Η πραγματοποίηση της συνδέσεως των συγκροτημάτων κάθε φάσεως γίνεται πολύ εύκολα με την τοποθέτηση τόξων στις μετωπικές συνδέσεις. Τα τόξα για κάθε συγκρότημα έχουν όλα την ίδια φορά στα τυλίγματα με ομώνυμους πόλους (σχήμα α), ενώ στα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ έχουν αντίθετη φορά εναλλάξ (σχήμα β). [4]



Σχήμα α



Σχήμα β

Σχήμα 2 : Στο σχήμα α βλέπουμε το τυλίγμα με ομώνυμους, ενώ στο σχήμα β με πόλους εναλλάξ.

Στα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ με μία ομάδα ανά αυλάκωση και με  $q$  ζυγό αριθμό, ο αριθμός των ομάδων σε κάθε συγκρότημα είναι το  $1 / 2$  του αριθμού των αυλακώσεων ανά πόλο και φάση, ενώ στα τυλίγματα με ομώνυμους πόλους ο αριθμός των ομάδων σε κάθε συγκρότημα είναι ίσος με  $q$ . Στα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ και με  $q$  μονό αριθμό τα

συγκροτήματα από ομάδες κάθε φάσης δεν είναι όλα ίσα. Τα τυλίγματα με δύο ομάδες ανά αυλάκωση γίνονται κυρίως βροχοειδή και κάθε ομάδα θα έχει πάντα μια πλευρά ενεργή στο πάνω στρώμα ενός συγκροτήματος και την άλλη στο κάτω στρώμα διαδοχικού συγκροτήματος της ίδιας φάσης ή αντίστροφα. Ακολούθως, τα στοιχεία του κάτω συγκροτήματος κάθε ζώνης θα πρέπει να συνδέονται με στοιχεία που αντιστοιχούν στο πάνω στρώμα της επόμενης ζώνης. [4]

Όπως προαναφέρθηκε, στα τυλίγματα με βήμα σμικρυμένο το βήμα των αυλακώσεων  $y_a$  είναι πάντα μικρότερο του πολικού βήματος  $y_p$ . Στα τυλίγματα με δύο ομάδες ανά αυλάκωση και βήμα σμικρυμένο τα στοιχεία του κάτω στρώματος ενός συγκροτήματος συνδέονται με εκείνα του πάνω στρώματος διαδοχικού συγκροτήματος της ίδιας φάσης. Σε αυτά τα τυλίγματα έχουμε μείωση κατά μία αυλάκωση της εξαπλώσης του συγκροτήματος κάθε φάσης, όταν μειώνουμε το βήμα των αυλακώσεων κατά μία μονάδα. [4]

### 1.3 Σύνδεση των άκρων των φάσεων στην πινακίδα

Τα άκρα των φάσεων μπορούν να συνδεθούν :

- Σε αστέρα Y
- Σε τρίγωνο  $\Delta$
- Σε διπλό αστέρα
- Σε διπλό τρίγωνο

Οι αρχές και τα τέλη των φάσεων συνδέονται σε ακροδέκτες που είναι τοποθετημένοι συνήθως σε ένα μονωμένο ακροκιβώτιο στην εξωτερική πλευρά του στάτη. Οι αρχές των τριών φάσεων δηλώνονται με τα γράμματα U, V, W και τα τέλη με τα γράμματα x, y, z (οι συμβολισμοί αυτοί χρησιμοποιούνταν παλαιότερα) ή U1, V1, W1 και U2, V2, W2 αντίστοιχα, οι οποίοι αποτελούν τους σύγχρονους συμβολισμούς. Το τυλίγμα U – x αποτελεί την πρώτη φάση, το V – y τη δεύτερη φάση και το W – z την τρίτη φάση. Αντίστοιχα για τους καινούργιους συμβολισμούς το τυλίγμα U1 – U2 αποτελεί την πρώτη φάση, το V1 – V2 τη δεύτερη φάση και το W1 – W2 την τρίτη φάση.

Οι τριφασικοί κινητήρες μπορεί να έχουν 3, 6 ή 12 ακροδέκτες. Η διάταξη των 3 ακροδεκτών χρησιμοποιείται όταν η σύνδεση σε αστέρα ή τρίγωνο έχει γίνει εσωτερικά στη μηχανή. Σε αυτή την περίπτωση, ο κινητήρας λειτουργεί κανονικά με την τάση που αναγράφεται στην ταμπέλα. Η διάταξη των 6 ακροδεκτών επιτρέπει την σύνδεση των τυλιγμάτων σε αστέρα και τρίγωνο. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να εφαρμόσουμε δύο τάσεις διαφορετικές,  $V_\pi$  σε τρίγωνο και  $\sqrt{3} \cdot V_\pi$  σε αστέρα.



Εικόνα 1 : Διάταξη 6 ακροδεκτών για σύνδεση αστέρα ή τρίγωνο.

Η διάταξη των 12 ακροδεκτών δίνει τη δυνατότητα συνδέσεως των τυλιγμάτων :

- 1) Σε διπλό τρίγωνο [4]
- 2) Σε διπλό αστέρα [4]
- 3) Σε τρίγωνο [4]
- 4) Σε αστέρα [4]

Έτσι μπορούμε να εφαρμόσουμε 4 τάσεις διαφορετικές:

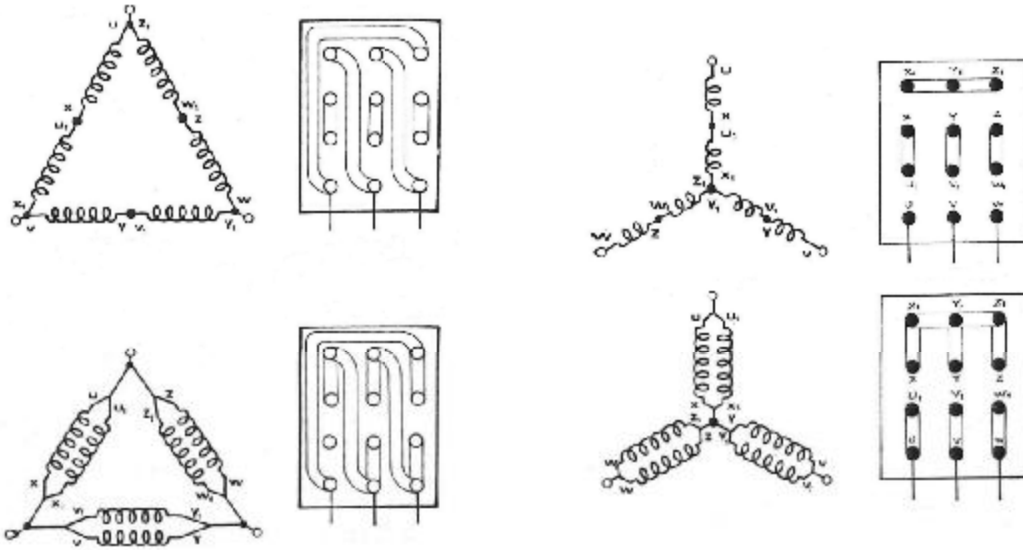
$V_{\pi} / 2$  στο διπλό τρίγωνο,  $\sqrt{3} \cdot V_{\pi} / 2$  στο διπλό αστέρα,  $V_{\pi}$  στο τρίγωνο,  $V_{\pi} \cdot \sqrt{3}$  στον αστέρα.

Η σύνδεση κατά τρίγωνο πραγματοποιείται με την τοποθέτηση τριών ελασμάτων όπως φαίνεται στο σχήμα 3α. Με το σύστημα των 12 άκρων η διαφοροποίηση στις συνδέσεις γίνεται με την αλλαγή των ελασμάτων στη σύνδεση των ακροδεκτών στην πινακίδα.

Το σχήμα 3α δείχνει τη σχηματική συνδεσμολογία και την διάταξη των ελασμάτων για την σύνδεση των φάσεων σε τρίγωνο και για την σύνδεση σε διπλό τρίγωνο.

Επιπρόσθετα, το σχήμα 3β δείχνει τη σχηματική συνδεσμολογία και τη διάταξη των ελασμάτων για τη σύνδεση των φάσεων σε αστέρα και για την σύνδεση σε διπλό αστέρα. [4]





Σχήμα 3α

Σχήμα 3β

Σχήμα 3 : Το σχήμα 3α μας δείχνει την συνδεσμολογία των ελασμάτων κατά διπλό τρίγωνο και το σχήμα 3β την συνδεσμολογία κατά διπλό αστέρα.

## 1.4 Αρχή λειτουργίας

Στον στάτη της μηχανής εφαρμόζεται τριφασική τάση με αποτέλεσμα οι αγωγοί του να διαρρέονται από τριφασικό σύστημα ρευμάτων. Αυτά τα ρεύματα παράγουν το πεδίο του στάτη  $B_s$  με ταχύτητα :

$$n_{sync} = \frac{60 * f_e}{P}$$

όπου  $n_{sync}$  η σύγχρονη ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου του στάτη σε rpm (revolution per minute),  $f_e$  η συχνότητα του δικτύου σε Hz και  $P$  τα ζεύγη των πόλων της μηχανής.

Το μαγνητικό πεδίο  $B_s$  καθώς διέρχεται πάνω από τους αγωγούς του δρομέα επάγει τάση στα άκρα τους.

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

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l [1]$$

όπου  $v$  η σχετική ταχύτητα των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο,  $B$  η μαγνητική επαγωγή του πεδίου του στάτη,  $l$  το ενεργό μήκος του αγωγού του δρομέα.

Η επαγόμενη ροπή στη μηχανή δίνεται από τη σχέση :

$$\tau_{ind} = k \cdot B_R \times B_S [1]$$

όπου  $B_S$  το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη,  $B_R$  το μαγνητικό πεδίο του δρομέα και  $k$  είναι ένας παράγοντας που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

Ο δρομέας στρέφεται με την ίδια φορά που στρέφεται το μαγνητικό πεδίο του στάτη, αλλά η ταχύτητα του ποτέ δεν γίνεται ίση με την σύγχρονη, επειδή σε μία τέτοια περίπτωση 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. Εάν η τάση  $e_{ind}$  ήταν μηδενική, οι αγωγοί του δρομέα δε θα διαρρέονταν από ρεύμα και δεν θα αναπτυσσόταν μαγνητικό πεδίο στον δρομέα. Η επαγόμενη ροπή θα ήταν μηδενική και θα επακολουθούσε επιβράδυνση του δρομέα λόγω των απωλειών τριβής. Επομένως, ένας επαγωγικός κινητήρας μπορεί να περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα, αλλά δεν είναι ποτέ δυνατό να περιστρέφεται με ταχύτητα ακριβώς ίση με αυτήν. [1]

## 1.6 Ολίσθηση 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 από τις τάσεις και τα ρεύματα του δρομέα, γίνεται αναφορά για την παραπάνω σχετική ταχύτητα. Δύο είναι συνήθως τα μεγέθη που περιγράφουν τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Το πρώτο από αυτά είναι η ταχύτητα ολίσθησης (slip speed), που ορίζεται ως η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από την σύγχρονη ταχύτητα και δίνεται από την εξίσωση :

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

με  $n_{slip}$  η ταχύτητα ολίσθησης της μηχανής και  $n_m$  η μηχανική ταχύτητα του άξονα περιστροφής.

Το δεύτερο μέγεθος με το οποίο εκφράζεται η σχετική κίνηση είναι η ολίσθηση (slip) και ουσιαστικά πρόκειται για σχετική ταχύτητα ολίσθησης εκφρασμένη σε εκατοστιαία ή σε ανά μονάδα (per – unit) βάση. Έτσι, η ολίσθηση ορίζεται από τη σχέση :

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \cdot 100\%$$

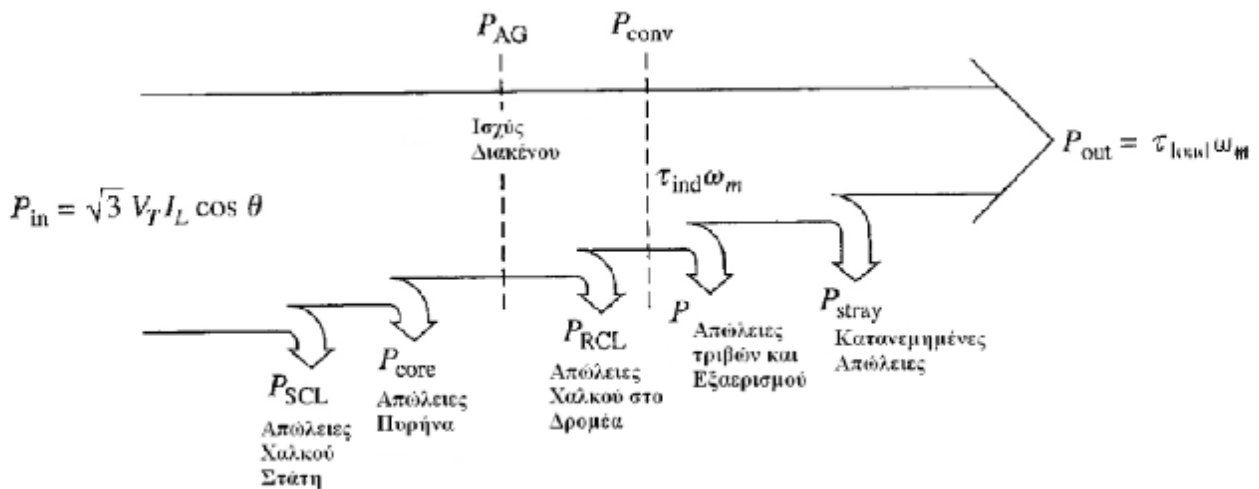
Παρατήρηση: Εάν ο δρομέας περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, είναι  $s = 0$ , ενώ, εάν ο δρομέας είναι ακίνητος, είναι  $s = 1$ .

Ακόμα, η ταχύτητα περιστροφής του άξονα της μηχανής μπορεί να εκφραστεί μέσω της ολίσθησης και της σύγχρονης ταχύτητας με την εξίσωση :

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

## 1.7 Απώλειες και διάγραμμα ροής

Ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί ως στρεφόμενος μετασχηματιστής. Η είσοδος του αποτελεί τριφασικό σύστημα τάσεων και ρευμάτων. Σε έναν κανονικό μετασχηματιστή η ηλεκτρική ισχύς εξόδου είναι η ισχύς στο δευτερεύον τύλιγμα. Στον επαγωγικό κινητήρα το δευτερεύον τύλιγμα (ο δρομέας) είναι βραχυκυκλωμένο και 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 στη μηχανική ισχύ εξόδου του εν λόγω κινητήρα παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής ισχύος του (σχήμα 4). [1]



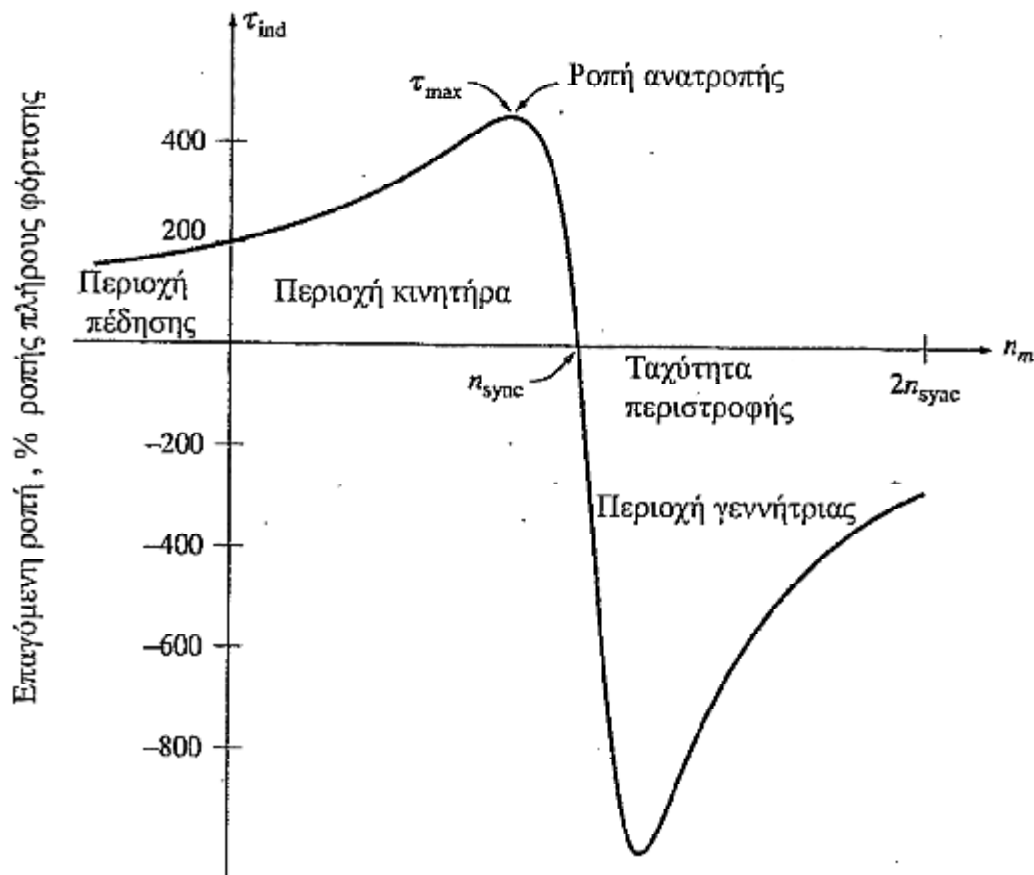
Σχήμα 4 : Το διάγραμμα ροής ισχύος ενός επαγωγικού κινητήρα.

Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου στον κινητήρα  $P_{in}$  έχει την μορφή τριφασικού συστήματος τάσεων και ρευμάτων. Το πρώτο είδος απωλειών που υπολογίζεται στον κινητήρα είναι οι ωμικές ( $3 \cdot I^2 \cdot R$ ) απώλειες στο τύλιγμα του στάτη (απώλειες χαλκού στο στάτη -  $P_{SCL}$ ). Έπειτα, κάποιο ποσό ισχύος χάνεται με την μορφή απωλειών υστέρησης και απωλειών εξαιτίας των δινορρευμάτων στο στάτη (απώλειες πυρήνα -  $P_{core}$ ). 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  $P_{AG}$  (air - gap power). Ένα μέρος της ισχύος που μεταφέρεται στον δρομέα χάνεται με την μορφή ωμικών απωλειών

$(3 \cdot I^2 \cdot R)$  στα τυλίγματα του δρομέα (απώλειες χαλκού στον δρομέα –  $P_{RCL}$ ), ενώ η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική ( $P_{conv}$ ). Από αυτή την ισχύ αφαιρούνται τελικά οι απώλειες τριβής και εξαερισμού  $P_{F\&W}$ , καθώς και οι κατανεμημένες απώλειες  $P_{misc}$ . Η εναπομείνουσα μηχανική ισχύ αποτελεί την ισχύ εξόδου  $P_{out}$  της μηχανής. [1]

## 1.8 Χαρακτηριστικά ροπής – ταχύτητας

Η καμπύλη ροπής – ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα (σχήμα 5) δίνει τις εξής πληροφορίες:



Σχήμα 5 : Η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, όπου φαίνονται η περιοχή πέδησης και η περιοχή λειτουργίας.

- Η επαγόμενη ροπή του επαγωγικού κινητήρα είναι μηδενική στη σύγχρονη ταχύτητα όπως προαναφέρθηκε. [1]
- Υπάρχει μία μέγιστη ροπή που είναι αδύνατο να ξεπεραστεί. Αυτή η ροπή ονομάζεται ροπή ανατροπής ή ροπή κατάρρευσης (pullout – breakdown torque) και είναι συνήθως δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή του κινητήρα κατά την πλήρη φόρτιση. [1]
- Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα θα πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερη από την 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. [1]
- Αν ο δρομέας του κινητήρα περιστρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την σύγχρονη ταχύτητα, η φορά περιστροφής της επαγόμενης ροπής αντιστρέφεται, με αποτέλεσμα η μηχανή να λειτουργεί ως γεννήτρια. [1]
- 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. Αυτό το στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σκοπό το απότομο σταμάτημα του κινητήρα που ονομάζεται ακαριαία πέδηση (plugging). [1]

## 1.9 Κλάσεις σχεδίασης

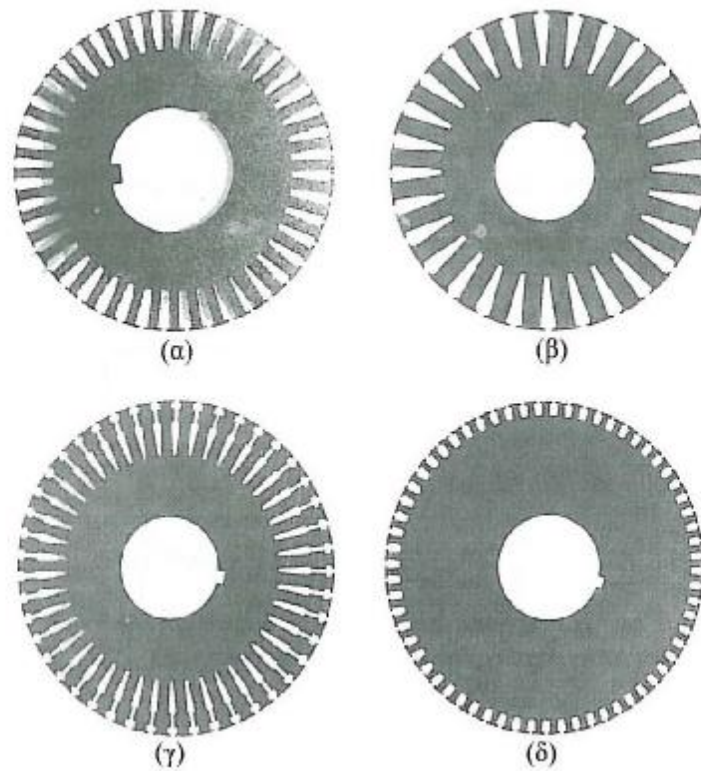
Με την μεταβολή των χαρακτηριστικών του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα είναι δυνατή η υλοποίηση μεγάλης ποικιλίας χαρακτηριστικών ροπής – ταχύτητας. Με σκοπό να βοηθήσουν τη βιομηχανία στην επιλογή των κατάλληλων κινητήρων σε διαφορετικές εφαρμογές και σε όλα τα εύρη ισχύος, η National Electrical Manufacturers Association (NEMA) στις ΗΠΑ και η International Electrotechnical Commission (IEC) στην Ευρώπη έχουν θεσπίσει μια σειρά από τυποποιημένες σχεδιάσεις κινητήρων με διαφορετικές χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας. Οι τυποποιημένες αυτές σχεδιάσεις ονομάζονται κλάσεις σχεδίασης (design classes). Οι κλάσεις αυτές και οι ιδιότητες τους αναλύονται παρακάτω :

- ΚΛΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ A: Οι κινητήρες κλάσης A είναι κινητήρες με τυποποιημένη σχεδίαση που παρουσιάζουν κανονική ροπή εκκίνησης, κανονικό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2α οι ράβδοι του δρομέα είναι αρκετά μεγάλες και τοποθετούνται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα. Μια τέτοια σχεδίαση παρουσιάζει μικρή αντίσταση (λόγο της μεγάλης διατομής των ράβδων) και μικρή αντίσταση διαρροής (λόγο της θέσης των ράβδων κοντά στον στάτη). Αφού η αντίσταση του δρομέα είναι μικρή, η ροπή ανατροπής εμφανίζεται σε μια ταχύτητα πολύ κοντά στη σύγχρονη. Το σημαντικότερο πρόβλημα αυτής της κλάσης σχεδίασης είναι το υψηλό ρεύμα εκκίνησης λόγω της μικρής αντίστασης του δρομέα. Τα τυπικά ρεύματα εκκίνησης για τέτοιους κινητήρες είναι 500% ως 800% του ονομαστικού ρεύματος. Για τέτοιου είδους κινητήρες με μέγεθος από 7,5 hp θα πρέπει να

χρησιμοποιείται μία μέθοδος μείωσης της τάσης κατά την εκκίνηση, για να μην έχουμε μεγάλες πτώσεις τάσης. Στο παρελθόν οι κινητήρες κλάσης A σχεδιάζονταν για εφαρμογές κάτω από 7,5 hp και πάνω από 200 hp. Σήμερα έχουν αντικατασταθεί από τους κινητήρες κλάσης B που θα αναλυθούν παρακάτω. Τυπικές εφαρμογές αυτών των κινητήρων είναι η οδήγηση ανεμιστήρων, φουσερών, αντλιών, τόνων και άλλων εργαλειομηχανών. [1]

- **ΚΛΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ B:** Οι κινητήρες αυτοί έχουν κανονική ροπή εκκίνησης, μικρότερο ρεύμα εκκίνησης (σε σχέση με τους κινητήρες κλάσης A) και χαμηλή ολίσθηση. Σε αυτή την κλάση σχεδιάσης υπάρχουν μεγάλες ράβδοι που βρίσκονται βαθιά στον δρομέα (εικόνα 2β). Στην ονομαστική λειτουργία όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων στο δρομέα είναι μικρή, το ρεύμα ρέει ομοιόμορφα σ' όλη τη διατομή των ράβδων. Έτσι, η ενεργός διατομή των ράβδων είναι μεγάλη και η αντίσταση του δρομέα μικρή, όπως στους κινητήρες κλάσης A. Κατά την εκκίνηση, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μεγάλη, οι αντιδράσεις σκέδασης των ράβδων είναι υψηλές. Το ρεύμα του δρομέα ρέει μόνο από τις περιοχές των ράβδων που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι οποίες έχουν μικρές αντιδράσεις. Με τον τρόπο αυτό η ενεργός διατομή των ράβδων μειώνεται και η αντίσταση του δρομέα εμφανίζεται αυξημένη κατά την εκκίνηση, όπως στους κινητήρες κλάσης D. Οι εφαρμογές αυτών των κινητήρων είναι παρόμοιες με αυτές των κινητήρων κλάσης A, μόνο που προτιμούνται εξαιτίας του μικρότερου ρεύματος εκκίνησης. [1]
- **ΚΛΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ C:** Οι κινητήρες κλάσης C παρουσιάζουν μεγάλη ροπή εκκίνησης, μικρό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο (μικρότερη από 5%). Στους κινητήρες κλάσης C, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ταχύτητα είναι εντονότερη και επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με διπλό κλωβό. Ο κινητήρας φέρει ένα τύλιγμα κλωβού, το οποίο αποτελείται από ράβδους μεγάλης διατομής τοποθετημένες στο εσωτερικό του δρομέα (εικόνα 2γ). Ένας δεύτερος ανεξάρτητος κλωβός από ράβδους μικρής διατομής, βρίσκεται στην επιφάνεια του δρομέα (εικόνα 2γ). Στην κανονική λειτουργία του κινητήρα, το ρεύμα του δρομέα ρέει και από τα δύο τυλίγματα κλωβού και ο κινητήρας εμφανίζει μικρή αντίσταση στο δρομέα. Κατά την εκκίνηση, το ρεύμα κυκλοφορεί κυρίως από το εξωτερικά τοποθετημένο τύλιγμα κλωβού, με την υψηλή αντίσταση Η ροπή ανατροπής είναι λίγο μικρότερη από αυτή των κινητήρων κλάσης A. Οι κινητήρες αυτού του είδους είναι ακριβότεροι από τους κινητήρες των προηγούμενων κλάσεων. Οι κινητήρες αυτοί συνήθως χρησιμοποιούνται σε φορτία που απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης, όπως φορτισμένες αντλίες, συμπιεστές, μεταφορείς και άλλα παρόμοια φορτία. [1]
- **ΚΛΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ D:** Οι κινητήρες κλάσης D έχουν πάρα πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης (πάνω από 275% της ονομαστικής ροπής) και μικρό ρεύμα εκκίνησης, αλλά παρουσιάζουν υψηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο. Ουσιαστικά πρόκειται για απλούς επαγωγικούς κινητήρες κλάσης A, που διαθέτουν όμως ράβδους μικρότερης διατομής κατασκευασμένες από υλικό μεγαλύτερης αντίστασης κοντά στην επιφάνεια του στάτη (εικόνα 2δ). Η μεγάλη αντίσταση στον δρομέα μετακινεί τη μέγιστη ροπή σε πολύ μικρή ταχύτητα. Επίσης, είναι δυνατή η μετακίνηση της

μέγιστης ροπής στη μηδενική ταχύτητα. Η ολίσθηση αυτών των κινητήρων στην πλήρη φόρτιση είναι αρκετά υψηλή λόγω της μεγάλης αντίστασης του δρομέα που διαθέτουν. Αυτού του είδους οι κινητήρες έχουν εφαρμογή στην επιτάχυνση φορτίων με μεγάλη αδράνεια όπως οι ιδιαίτερα μεγάλοι σφόνδυλοι που χρησιμοποιούνται σε διατρητικές πρέσες ή ψαλίδια. [1]



Εικόνα 2 : Τα δυναμοελάσματα που σχηματίζουν τους δρομείς των επαγωγικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου κλωβού.

- (α): Κλάση σχεδίασης Α
- (β): Κλάση σχεδίασης Β
- (γ): Κλάση σχεδίασης Γ
- (δ): Κλάση σχεδίασης Δ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΑΠΟΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

### 2.1 Στοιχεία κινητήρα

Αρχικά, πριν γίνει η εξαγωγή των παλιών τυλιγμάτων παίρνουμε κάποιες πληροφορίες για τους πόλους του κινητήρα. Ο κινητήρας αυτός ήταν κατασκευασμένος με τέσσερις πόλους, δύο πραγματικούς και δύο φανταστικούς, ή αλλιώς με πόλους ομώνυμους και με 36 αυλακώσεις. Η ταμπέλα του κινητήρα μάς δίνει τα χαρακτηριστικά του (εικόνα 3).



Εικόνα 3 : Ταμπέλα του επαγωγικού κινητήρα.

Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα είναι :

- Ισχύς: 4 hp, 3kw
- Ονομαστικές στροφές: 1430 rpm
- Ονομαστική τάση τροφοδοσίας: 220V Δ / 380V Υ
- Ονομαστικό ρεύμα: 11,7A Δ / 7,6A Υ
- Συντελεστής ισχύος: 0,82
- Συχνότητα: 50 Hz
- Κλάση σχεδίασης: B



## 2.2 Αφαίρεση τυλιγμάτων

Για την αφαίρεση των τυλιγμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία: καλέμι και σφυρί. Αφού αφαιρέθηκαν τα καπάκια του κινητήρα και αποκαλύφθηκαν τα τυλίγματα εφαρμόσαμε το καλέμι υπό μία γωνία πάνω στις ομάδες των τυλιγμάτων και χτυπώντας το κόψαμε τα τυλίγματα. Η μέθοδος αυτή δεν τραυμάτισε τον πυρήνα του κινητήρα, επειδή το καλέμι ήταν τροχισμένο σε ένα ιδιαίτερο σχήμα, όπου χτυπώντας το με το σφυρί προχωρούσε εφαπτόμενα στον πυρήνα χωρίς να τον χτυπάει. Αφού τέλειωσε το κόψιμο των τυλιγμάτων από την μία μεριά του κινητήρα, μπορούσαν να τραβηχτούν από την άλλη μεριά για να βγουν από τις αυλακώσεις, αφού ήταν πλέον ελεύθερα. Επειδή τα τυλίγματα είχαν βερνικωθεί και είχαν κολλήσει μέσα στις αυλακώσεις, χρησιμοποιήθηκε μεγάλη τσιμπίδα για να έχουμε μακρύ μοχλοβραχίονα, ώστε να απαιτείται λιγότερη δύναμη. Αφού βγήκαν τα τυλίγματα, έγινε καθάρισμα των αυλακώσεων με γυαλόχαρτο.

## 2.3 Περιέλιξη του κινητήρα

Από τα παλιά τυλίγματα πήραμε κάποιες πληροφορίες για την παλιά περιέλιξη:

- Διάμετρος σύρματος : Η διάμετρος του σύρματος ήταν 1,14 mm, η οποία μετρήθηκε με μικρόμετρο αφού πρώτα θερμάνθηκε ώστε να αφαιρεθεί η μόνωση που είχε απομείνει (βερνίκι) που δημιουργούσε ένα επιπλέον στρώμα πάχους.
- Αριθμός αγωγών : Οι αγωγοί ήταν 36 αφού μετρήθηκαν τα σύρματα ενός από τα μάτσα.

Αρχικά μονώθηκαν οι αυλακώσεις του στάτη. Έπειτα πήραμε ένα κομμάτι σύρμα και το διαμορφώσαμε έτσι, ώστε να σχηματίζει το τόξο της μικρότερης σπείρας (εικόνα 4), για να μπορούμε να βρούμε το πλάτος της ομάδας και να φτιάξουμε το σπείρες στο καλούπι.



Εικόνα 4 : Εδώ φαίνεται ο πυρήνας του στάτη με τις αυλακώσεις

Η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε για να φτιάξουμε την περιέλιξη στον κινητήρα ονομάζεται πλεκτό. Τοποθετούμε πρώτα τις τρεις πρώτες ομάδες από την μία πλευρά (εικόνα 6) και αφού ολοκληρώσουμε την τοποθέτηση των υπολήπων, βάζουμε και τις άλλες πλευρές στις αυλακώσεις που απομένουν. Πριν από την εισαγωγή των τυλιγμάτων τοποθετήθηκαν τα μονωτικά φύλλα στις αυλακώσεις του κινητήρα, τα οποία είναι από ένα υλικό που ονομάζεται hostaphan, το οποίο παράγεται σε μορφή ρολών από πολυεστερικό πλαστικό. Έχει καλές μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες και είναι κατάλληλο για μετασχηματιστές και ηλεκτρικές μηχανές για την μόνωση αυλακώσεων και κεφαλών.

Το καλούπι που χρησιμοποιήθηκε ήταν ενσωματωμένο σε έναν κινητήρα για να περιστρέφεται και ένα στροφόμετρο μας έδειχνε τις στροφές ώστε να κατασκευάσουμε τον σωστό αριθμό σπειρών. Το πλάτος ρυθμίστηκε από το σύρμα που είχαμε κατασκευάσει αρχικά και αφού το τοποθετήσαμε στο καλούπι, κόψαμε έναν μεταλλικό αποστάτη σε ένα ορισμένο μήκος (εικόνα 5). Στην συνέχεια τον τοποθετήσαμε μεταξύ των δύο καλουπιών και σφίξαμε τα παξιμάδια για να διατηρηθεί το πλάτος στο σωστό μήκος.



Εικόνα 5 : Κατασκευή των τριών ομάδων στο καλούπι όπου φαίνεται και το ηλεκτρόδιο ρύθμισης του πλάτους των ομάδων.

Η τοποθέτηση των τυλιγμάτων αρχίζει με την αρχή του σύρματος της πρώτης ομάδας στο κάτω μέρος της αυλάκωσης και το τέλος της στο πάνω, ώστε να ακολουθήσει το δεύτερο με την ίδια τοποθέτηση ως το τρίτο. Τα δύο άκρα από την ομάδα τοποθετούνται μέσα σε μακαρόνια. Όταν η κάθε ομάδα τοποθετείται στην αυλάκωση, σκεπάζεται από πάνω με επιπρόσθετη μόνωση hostaphan.



Εικόνα 6 : Η τοποθέτηση της πρώτης ομάδας



Εικόνα 7 : Λεπτομέρεια των τυλιγμάτων.



Εικόνα 8 : Η συνέχιση της διαδικασίας.

Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την ένωση των έξι άκρων των τυλιγμάτων χρησιμοποιώντας ασημοκόλληση, ώστε να εξασφαλισθεί η ηλεκτρική σύνδεση όλων των τυλιγμάτων και να αποκτήσουμε έξι ελεύθερους ακροδέκτες, οι οποίοι θα τοποθετηθούν στο ακροκιβώτιο για να γίνουν οι κατάλληλες συνδέσεις τροφοδοσίας. Πλέον, το τριφασικό τύλιγμα έχει κατασκευαστεί.



Εικόνα 9 : Ολοκλήρωση της τοποθέτησης των τυλιγμάτων στο στάτη. Σε αυτήν την εικόνα φαίνονται και οι γεφυρωμένοι ακροδέκτες.

Ανάμεσα στις ομάδες τοποθετούνται επιπλέον φύλλα μόνωσης Prespan, ώστε να εξασφαλίζεται η απομόνωση των φάσεων. Τέλος, τα τυλίγματα δένονται με νάιλον ταινία, ώστε να συγκρατούνται στη θέση τους και περνιούνται με βερνίκι, το οποίο δημιουργεί ένα φιλμ γύρω από την περιέλιξη αλλά συνάμα γεμίζει τους κενούς χώρους μέσα στις αυλακώσεις και τις κεφαλές της περιέλιξης (τα τυλίγματα που βρίσκονται εκτός των αυλακώσεων). Ο εμποτισμός με βερνίκι είναι πολύ σημαντική διαδικασία, επειδή εκτός από την μονωτική του ιδιότητα, βελτιώνει σημαντικά και την απαγωγή θερμότητας της ηλεκτρικής μηχανής. [3]



Εικόνα 10 : Δέσιμο των τυλιγμάτων του κινητήρα.

Με την ολοκλήρωση όλης της διαδικασίας γίνεται ένας τυπικός έλεγχος της ποιότητας της εργασίας για να δούμε εάν τυχόν έχουν γίνει λάθη. Με ένα πολύμετρο μετράμε τις ωμικές αντιστάσεις των τριών τυλιγμάτων οι οποίες πρέπει να βγουν ίδιες και στις τρεις φάσεις. Στην περίπτωση που έχουμε διαφορετικά αποτελέσματα στις τρεις μετρήσεις, έχουμε κάνει λάθος τον αριθμό των αγωγών σε ορισμένες από τις ομάδες. Στην συνέχεια, ελέγχουμε με το πολύμετρο εάν υπάρχει ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ των τριών φάσεων και της κάθε φάσης με το σώμα της μηχανής. Ενδέχεται στην διαδικασία της περιέλιξης να χτυπήθηκε κάποιο από τα τυλίγματα και να υπάρξει στην λειτουργία του κινητήρα βραχυκύκλωμα ή διαρροή ρεύματος προς το σώμα του κινητήρα. Τέλος, ελέγχουμε με ένα αμπερόμετρο εάν ο κινητήρας τραβάει και στις τρεις φάσεις το ίδιο ρεύμα. Το τύλιγμα του στάτη είναι πλέον έτοιμο. Επιπλέον, έγινε αλλαγή των ρουλιών και βάφτηκε το εξωτερικό μέρος της μηχανής.



Εικόνα 11 : Ο δρομέας της μηχανής με τοποθετημένα τα καινούργια ρουλιμάν.

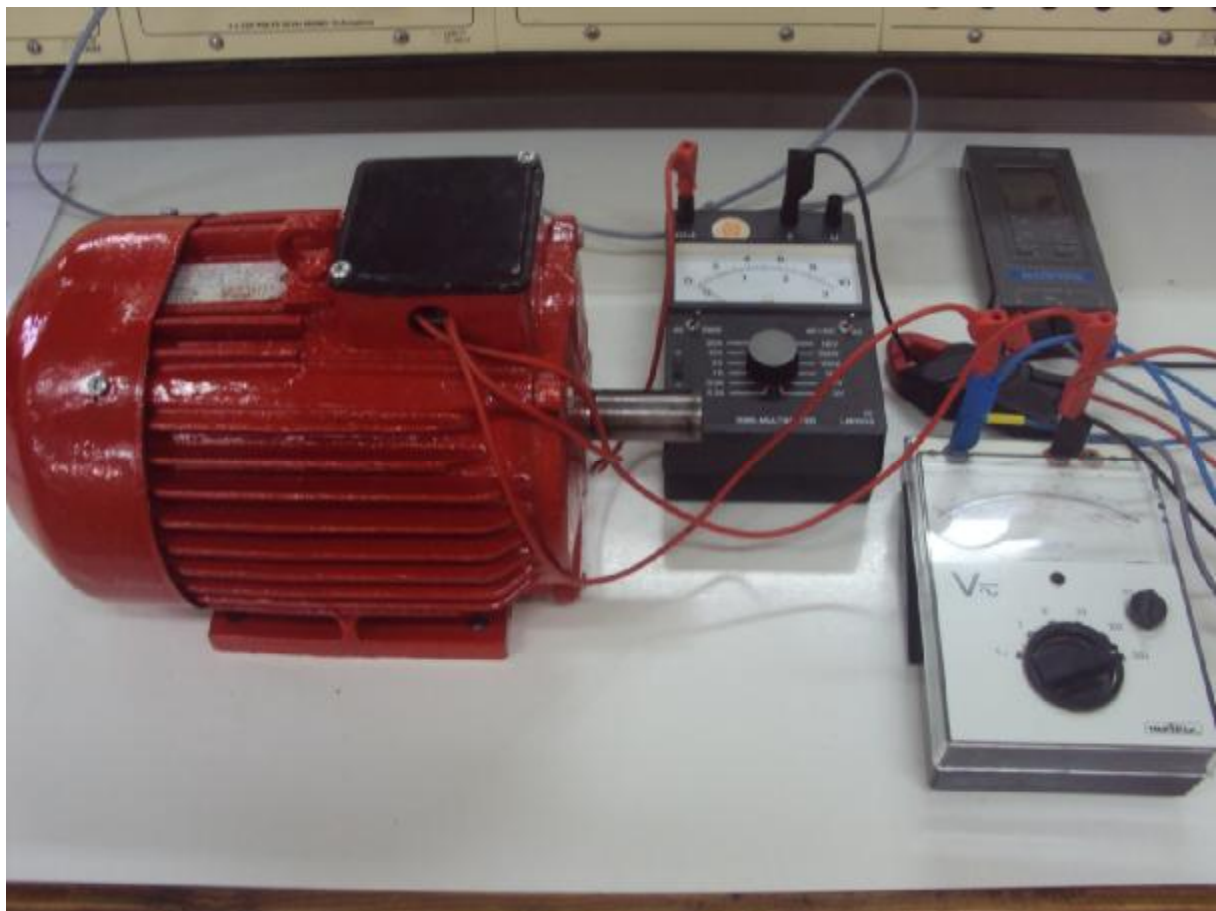


Εικόνα 12 : Ολοκλήρωση της εργασίας με το βήσιμο του κινητήρα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

### 3.1 Πείραμα χωρίς φορτίο

Με το πείραμα χωρίς φορτίο (no – load test) υπολογίζουμε τις απώλειες περιστροφής του κινητήρα και παρέχονται πληροφορίες σχετικά με το ρεύμα μαγνήτισης. Η διαδικασία που ακολουθείται για το εν λόγω πείραμα είναι σύμφωνη με τα πρότυπα της IEC. Η διάταξη που θα χρησιμοποιήσουμε είναι αυτή της εικόνας 13, η οποία περιλαμβάνει ένα βολτόμετρο, ένα αμπερόμετρο και έναν αναλυτή ενέργειας. Αρχικά, τροφοδοτούμε τον κινητήρα με την ονομαστική του τάση προσαυξημένη κατά 110% (επειδή ο αυτομετασχηματιστής του εργαστηρίου δεν μπορεί να δώσει παραπάνω από 400V, αρχίζουμε με τάση 398V) και στην συνέχεια καταγράφουμε τις ενδείξεις των οργάνων για 10 τιμές ρεύματος μέχρι το 20% της ονομαστικής τιμής της τάσης (80V) με φθίνουσα σειρά. Τα αποτελέσματα του πειράματος αναγράφονται στον πίνακα 1.



Εικόνα 13 : Πειραματική διάταξη χωρίς φορτίο.



V (Volt)	I (Ampere)	P (Watt)	cosφ	P <sub>K</sub> (watt)
398	3.6	302	0.123	239.8
380	3.2	280	0.133	224.7
340	2.6	202	0.131	165.5
300	2.2	180	0.157	153.9
260	1.8	141	0.171	123.5
220	1.5	117	0.2	104.9
180	1.2	96.3	0.247	88.5
140	1.0	79	0.333	73.6
100	0.8	68	0.5	64.5
80	0.7	63	0.64	60.4

Πίνακας 1 : Μετρήσεις πειράματος χωρίς φορτίο.

### 3.2 Επεξεργασία μετρήσεων πειράματος χωρίς φορτίο

Με απευθείας μέτρηση των τυλιγμάτων βρίσκουμε την ωμική αντίστασή τους, η οποία είναι ίση με  $R_s = 1.8 \Omega$  για καθεμία φάση.

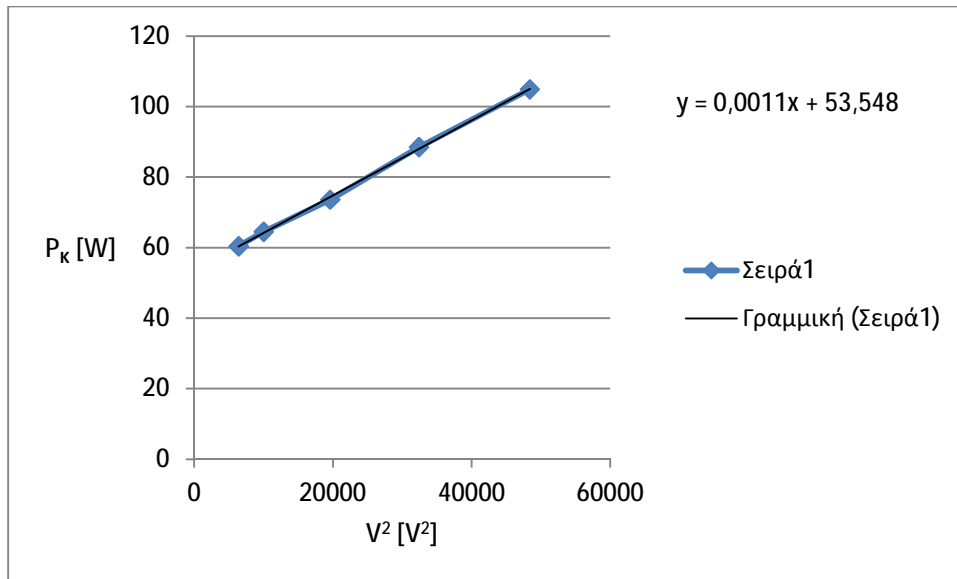
Στην συνέχεια υπολογίζουμε τις απώλειες σιδήρου μαζί με τις μηχανικές από τη σχέση:

$$P_K = P - 3 \cdot I_s^2 \cdot R_s - P_{MHX}$$

,όπου P η ηλεκτρική ισχύς που τραβάει ο κινητήρας,  $I_s$  το ρεύμα ανά φάση και  $P_{MHX}$  οι μηχανικές απώλειες. Τα αποτελέσματα των τιμών αναγράφονται στον πίνακα 1.

Με τις τιμές των απωλειών και τις τιμές της τάσης (αρχίζοντας για τιμές απωλειών και τάσης από 104.9W και 220V αντίστοιχα) κατασκευάζουμε το διάγραμμα  $P_K - V^2$  (σχήμα 6) και καταγράφουμε την τιμή του σημείου όπου η γραφική τέμνει τον άξονα y. Για την πραγματοποίηση της γραφικής χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Excel.

Αυτή η τιμή αντιστοιχεί στις μηχανικές απώλειες  $P_{MHX} = 53.54 W$ .

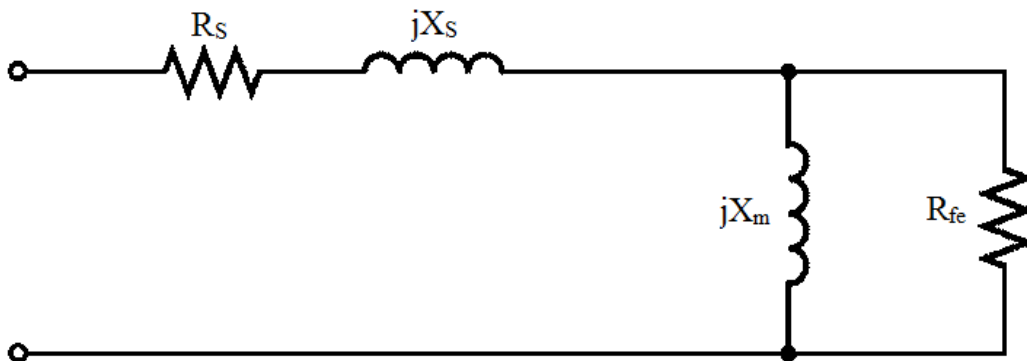


Σχήμα 6 : Γραφική παράσταση  $P_K - V^2$

Για να υπολογίσουμε τις απώλειες σιδήρου χρησιμοποιούμε την σχέση :

$$P_{fe} = P - 3 \cdot I_s^2 \cdot R_s - P_{MHX} = 280 - 3 \cdot 3.2^2 \cdot 1.8 - 53.54 = 171.16 \text{ W}$$

Η τιμή του ρεύματος αντιστοιχεί στην τιμή τάσης  $V = 380\text{V}$ .



Σχήμα 7 : Ισοδύναμο κύκλωμα πειράματος χωρίς φορτίο

Στην συνέχεια, υπολογίζουμε την αντίσταση  $R_{fe}$  που αντιστοιχεί στις απώλειες σιδήρου :

$$R_{fe} = \frac{3 \cdot V_s^2}{P_{fe}} = \frac{3 \cdot 380^2}{171.16} = 2531 \Omega$$

Ακολούθως, υπολογίζουμε την σύνθετη αντίσταση του κινητήρα :

$$z = \frac{V_s/\sqrt{3}}{I} = \frac{380/\sqrt{3}}{3.2} = 68.6 \Omega$$

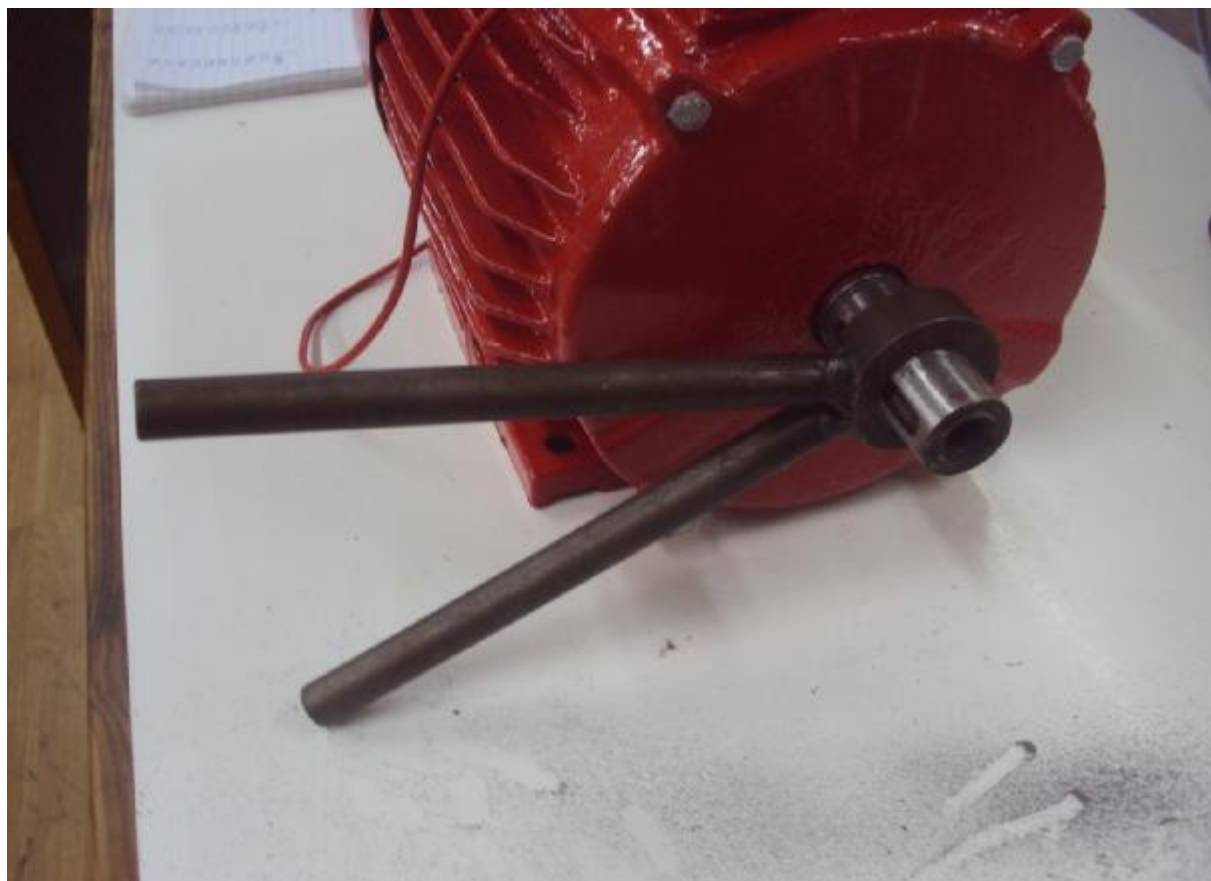
Οι τιμές του ρεύματος και της τάσης αντιστοιχούν στις τιμές 3.2 A και 380 V.

$$z = \sqrt{(x_s + x_m)^2 + R_s^2} \rightarrow (x_s + x_m) = \sqrt{z^2 - R_s^2} \rightarrow (x_s + x_m) = \sqrt{68.6^2 - 1.8^2} \rightarrow (x_s + x_m) = 68.6 \Omega$$

Όπου  $x_s$  η σύγχρονη αντίδραση του στάτη και  $x_m$  η αντίσταση μαγνήτισης. Επειδή η  $R_{fe}$  είναι πολύ μεγάλη, την αγνοούμε.

### 3.3 Πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα

Το πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα (locked – rotor test) πραγματοποιείται με σκοπό τον προσδιορισμό των παραμέτρων του κυκλώματός του. Πάλι η διαδικασία που ακολουθείται είναι σύμφωνη με τα πρότυπα της IEC. Τα όργανα που χρησιμοποιούνται είναι ίδια με τα όργανα του πειράματος χωρίς φορτίο. Για να διεξαχθεί το πείραμα, ο δρομέας ακινητοποιείται, ώστε να μην μπορεί να κινηθεί. Για να το πετύχουμε αυτό, χρησιμοποιούμε την διάταξη της εικόνας 14, όπου προσαρμόζεται στον άξονα του δρομέα ένα είδος φρένου, με αποτέλεσμα να τον ακινητοποιεί. Αφού ο δρομέας ακινητοποιηθεί, εφαρμόζουμε χαμηλή τάση ονομαστικής συχνότητας  $f = f_N$ . Η ολίσθηση θα γίνει ένα ( $s = 1$ ). Στην συνέχεια, αυξάνουμε την τάση μέχρι το ρεύμα γραμμής να γίνει  $I = 1.5 \cdot I_N$ . Καταγράφουμε τις ενδείξεις τάσης, ρεύματος και ισχύς των οργάνων για τουλάχιστον 10 τιμές ρεύματος με φθίνουσα σειρά και περίπου ίσα διαστήματα μεταξύ 150% και 10% του ονομαστικού ρεύματος. Τα αποτελέσματα του πειράματος αναγράφονται στον πίνακα 2.

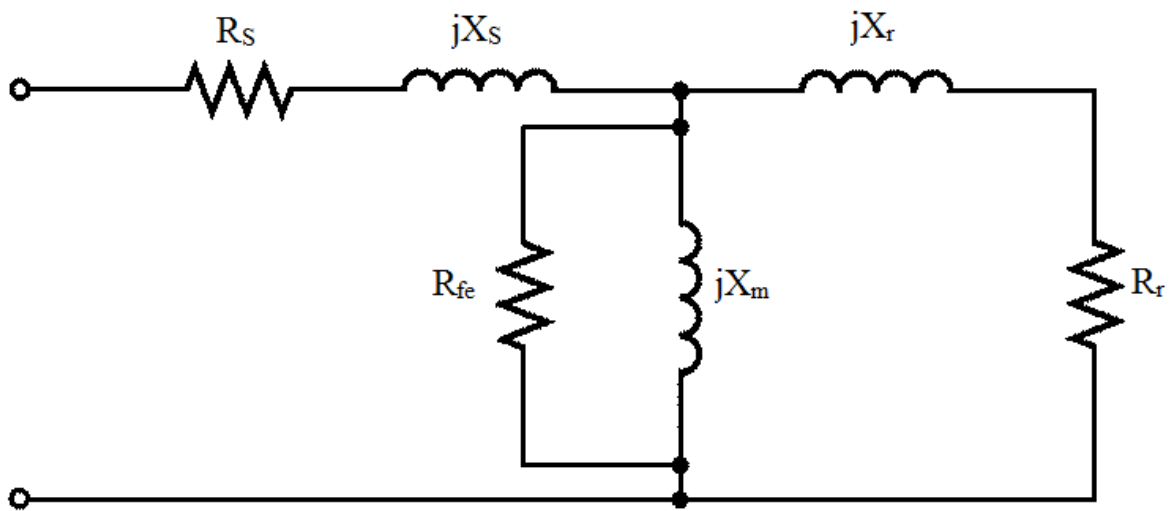


Εικόνα 14 : Διάταξη φρεναρίσματος δρομέα

V (Volt)	I (Ampere)	P (watt)
115	10	1053
107.5	9	905
97.5	8	728
86.6	7	560
75.2	6	424
63.0	5	294
50.0	4	181
39.0	3	108
26.0	2	50
17.4	1.4	22

Πίνακας 2 : Μετρήσεις πειράματος ακινητοποιημένου δρομέα.

### 3.4 Επεξεργασία μετρήσεων πειράματος ακινητοποιημένου δρομέα



Σχήμα 8 : Πειραματικό κύκλωμα ακινητοποιημένου δρομέα. Οι  $R_{fe}$  και  $jX_m$  είναι πολύ μεγαλύτερες από την  $R_r + jX_r$  γι' αυτό και δεν λαμβάνονται υπόψη .

Αρχικά, υπολογίζουμε την σύνθετη αντίσταση του κινητήρα :

$$z = \frac{V/\sqrt{3}}{I} = \frac{115/\sqrt{3}}{10} = 6.64 \Omega$$

Οι τιμές της τάσης και του ρεύματος αντιστοιχούν στις τιμές 115V και 10A.

Ο καθορισμός του συντελεστή ισχύος ( $\cos\varphi$ ) προκύπτει από τον παρακάτω τύπο :

$$P = \sqrt{3} \cdot V_{\Pi} \cdot I_{\gamma\rho} \cdot \cos\varphi \rightarrow \cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_{\Pi} \cdot I_{\gamma\rho}} = \frac{1053}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 10} = 0.53$$

Στην συνέχεια, υπολογίζουμε την ολική αντίσταση του κινητήρα :

$$R_{o\lambda} = (R_s + R_r) = z \cdot \cos\varphi \rightarrow R_{o\lambda} = 3.52 \Omega$$

Έπειτα, την αντίσταση του δρομέα :

$$R_r = R_{o\lambda} - R_s = 3.52 - 1.8 = 1.72 \Omega$$

Στη φάση αυτή γυρίζουμε πίσω στο πείραμα χωρίς φορτίο και υπολογίζουμε την ολική σύγχρονη αντίδραση :

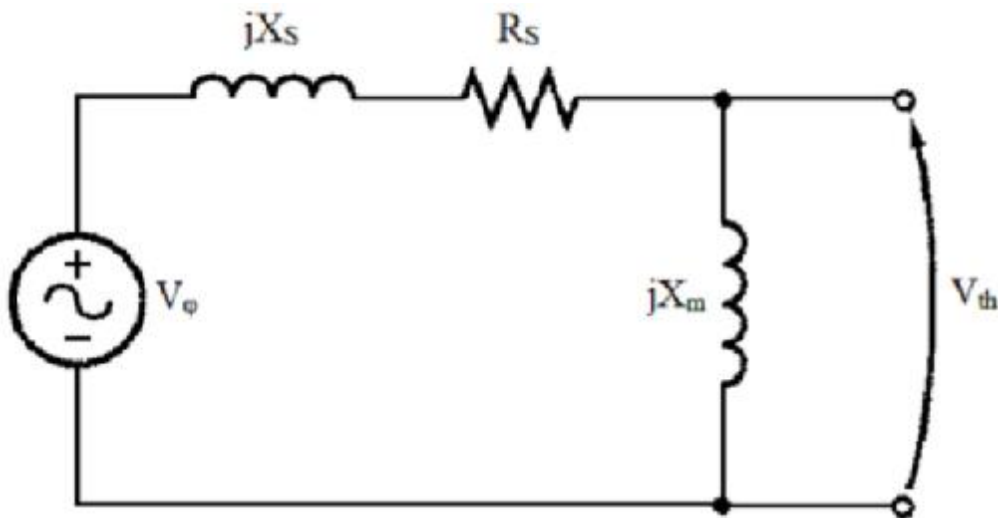
$$x_{o\lambda} = \sqrt{z^2 - (R_s + R_r)^2} = \sqrt{z^2 - R_{o\lambda}^2} \rightarrow x_{o\lambda} = \sqrt{6.64^2 - 3.52^2} = 5.6 \Omega$$

Η σύγχρονη αντίδραση του στάτη ( $x_s$ ) και η αντίδραση του δρομέα ( $x_r$ ) έχουν την μισή τιμή της ολικής αντίδρασης :

$$x_s = x_r = \frac{x_{o\lambda}}{2} = \frac{5.6}{2} = 2.8 \Omega$$

### 3.5 Υπολογισμός ισοδύναμου Thevenin του κυκλώματος εισόδου

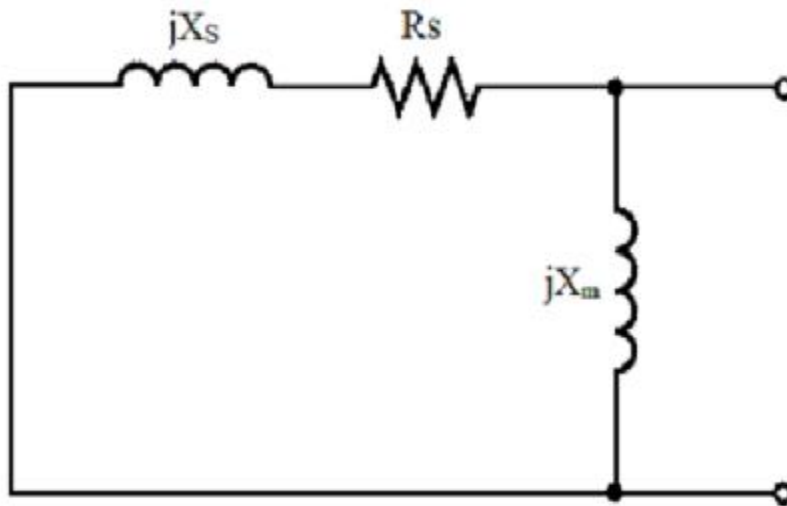
Σύμφωνα με το θεώρημα Thevenin, κάθε γραμμικό κύκλωμα που μπορεί να χωριστεί σε δύο σημεία από το υπόλοιπο σύστημα, είναι δυνατό να αντικατασταθεί από μια πηγή τάσης σε σειρά με μια σύνθετη αντίσταση. Για τον υπολογισμό του ισοδύναμου Thevenin της εισόδου ενός επαγωγικού κινητήρα υπολογίζεται η  $V_{TH}$  του ανοικτού κυκλώματος (σχήμα 9). Για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης Thevenin μηδενίζεται η φασική τάση και προσδιορίζεται η  $Z_{th}$  (σχήμα 10).



Σχήμα 9 : Η ισοδύναμη τάση κατά Thevenin

Ο κανόνας του διαιρέτη τάσης δίνει την εξίσωση :

$$V_{th} = V_{\phi} \cdot \frac{jx_m}{R_s + jx_s + jx_m} = 230 \cdot \frac{65.8}{1.8 + 2.8 + 65.8} = 220.6 V$$



Σχήμα 10 : Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση κατά Thevenin

Η σύνθετη αντίσταση Thevenin δίνεται από την σχέση :

$$z_{th} = \frac{jx_m \cdot (R_s + jx_s)}{R_s + j(x_s + x_m)} = \frac{j65.8 \cdot (1.8 + j2.8)}{1.8 + j(2.8 + 65.8)} = 1.64 + j2.71 \Omega$$

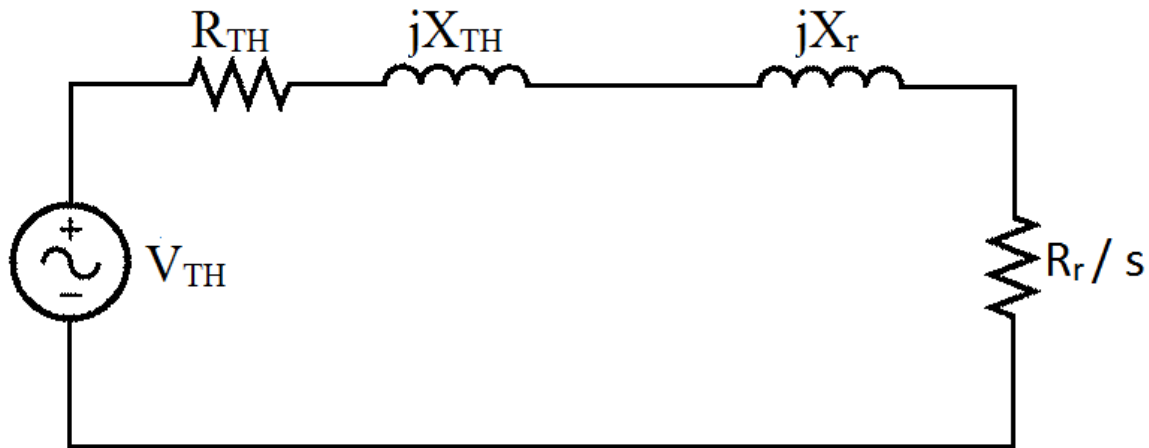
Οπότε  $R_{th} = 1.64 \Omega$  και  $jx_{th} = j2.71 \Omega$

Το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 11. Σε αυτό το κύκλωμα το ρεύμα  $I_2$  δίνεται από τη σχέση :

$$I_2 = \frac{V_{th}}{R_{th} + R_r/s + jx_{th} + jx_r} = \frac{220.6}{1.64 + 1.72/0.047 + 2.71 + 2.8} = 5.7 A$$

Όπου  $s$  η ολίσθηση :

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} = \frac{1500 - 1430}{1500} = 0.047$$



Σχήμα 11 : Το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα.

Με  $n_s$  την σύγχρονη ταχύτητα του πεδίου και  $n_m$  οι ονομαστικές στροφές του κινητήρα σε rpm. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε τα ακόλουθα :

- Ροπή εκκίνησης
- Ροπή ανατροπής
- Ονομαστική ροπή
- Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας

Στην αρχή πρέπει να υπολογίσουμε την ισχύ διακένου :

$$P_{AG} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_r/s = 3 \cdot 5.7^2 \cdot 1.72/0.047 = 3567.4 \text{ W}$$

Έπειτα, υπολογίζουμε την επαγόμενη ροπή από τη σχέση :

$$t_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} = \frac{3567.4}{157.1} = 22.7 \text{ Nm}$$

,όπου  $\omega_{sync}$  η σύγχρονη κυκλική συχνότητα του κινητήρα και υπολογίζεται από την σχέση :

$$\omega_{sync} = 2 \cdot \pi \cdot n_s = 2 \cdot 3.14 \cdot 1500/60 = 157.1 \text{ rad/s}$$

Η ισχύς που μετατρέπεται σε μηχανική στον επαγωγικό κινητήρα είναι ίση με :

$$P_{conv} = t_{ind} \cdot \omega_m = 22.7 \cdot 149.7 = 3398.19 \text{ W}$$

,όπου  $\omega_m$  η ονομαστική κυκλική συχνότητα του κινητήρα και υπολογίζεται από την σχέση :

$$\omega_m = 2 \cdot \pi \cdot n_m = 2 \cdot 3.14 \cdot 1430 = 149.7 \text{ rad/s}$$



Η ισχύς εξόδου υπολογίζεται από την σχέση :

$$P_{out} = P_{conv} - P_{MHX} = 3398.19 - 53.54 = 3344.7 \text{ W}$$

Συνεπώς, η ονομαστική ροπή υπολογίζεται από την σχέση :

$$\tau_{load} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{3344.7}{149.7} = 22.34 \text{ Nm}$$

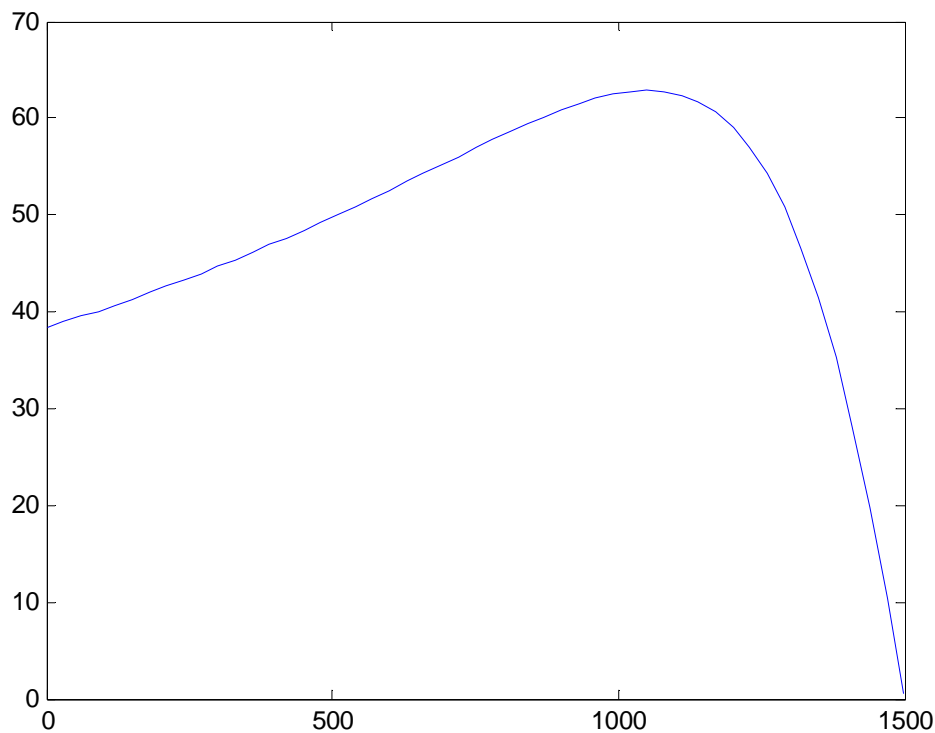
Η ροπή ανατροπής από τη σχέση :

$$\begin{aligned} \tau_{max} &= \frac{3 \cdot V_{th}^2}{2 \cdot \omega_{sync} \left[ R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (x_{th} + x_r)^2} \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 220.6^2}{2 \cdot 157.1 \cdot \left[ 1.64 + \sqrt{1.64^2 + (2.71 + 2.8)^2} \right]} = 62.88 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Η ροπή εκκίνησης από την σχέση :

$$\begin{aligned} \tau_{start} &= \frac{3 \cdot V_{th}^2 \cdot R_r}{\omega_{sync} \cdot \left[ (R_{th} + R_r)^2 + (x_{th} + x_r)^2 \right]} = \frac{3 \cdot 220.6^2 \cdot 1.72}{157.1 \cdot \left[ (1.64 + 1.72)^2 + (2.71 + 2.8)^2 \right]} \\ &= 38.4 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 12) όπου πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα Matlab. Παρατηρούμε ότι οι τιμές μέγιστης ροπής και ροπής εκκίνησης στην καμπύλη ταιριάζουν με τους υπολογισμούς που κάναμε παραπάνω.



Σχήμα 12 : Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

### 4.1 Προδιαγραφές του κινητήρα

Στο παράδειγμα που ακολουθεί αναφέρονται τα βασικά βήματα για την σχεδίαση ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα. Το πρώτο βήμα είναι ο προσδιορισμός των τεχνικών προδιαγραφών του κινητήρα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα οι προδιαγραφές είναι οι ακόλουθες:

- ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ: 3kW
- ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ: 1500στρ./λεπτό
- ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (ΠΟΛΙΚΗ): 400V
- ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ: 50Hz
- ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΑΣΕΩΝ: 3
- ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ: Αστέρας
- ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ: 0,82
- ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ: 0,865 [6]

- ΡΟΠΗ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ (Locked Rotor Torque): 2 (2 φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική). [6]
- ΡΕΥΜΑ ΜΕ ΑΚΙΝΗΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΡΟΜΕΑ (Locked Rotor Current): 6 (έξι φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό) [6]
- ΡΟΠΗ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ: 2,5 (2,5 φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική) [6]
- ΚΛΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ: Β (Έχει σχέση με την μορφή της χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας του κινητήρα)

Ορισμένα από τα παραπάνω στοιχεία (π.χ. συντελεστής απόδοσης, συντελεστής ισχύος, ροπή κλπ) θα επιδιώξουμε να τα πετύχουμε κατά την σχεδίαση του κινητήρα. Εάν δεν τα καταφέρουμε, θα πρέπει να αλλάξουμε κάποια από τα χαρακτηριστικά του κινητήρα μας. Στην συνέχεια, αρχίζουμε την σχεδίαση με την αρχική διαστασιολόγηση του κινητήρα. Κατά την διάρκεια της σχεδίασης αρκετές από τις διαστάσεις θα αλλάξουν!

## 4.2 Διαστασιολόγηση του κινητήρα

Ξεκινάμε με τον υπολογισμό της εσωτερικής διαμέτρου του στάτη  $D_{IS}$  η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2P}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{P}{f} \cdot \frac{S_{gap}}{C_0}} \quad (1)$$

Στην παραπάνω σχέση  $p_i$  είναι τα ζεύγη πόλων,  $f$  η συχνότητα λειτουργίας,  $S_{gap}$  η φαινόμενη ισχύς διακένου,  $\lambda$  ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα και  $C_0$  μια σταθερά. Η ισχύς διακένου υπολογίζεται από την σχέση:

$$S_{gap} = \frac{K_E \cdot P_n}{n_N \cdot \cos\varphi}$$

Στην παραπάνω σχέση  $P_n$  είναι η ονομαστική ισχύς,  $n_N$  ο βαθμός απόδοσης και  $\cos\varphi$  ο συντελεστής ισχύος.

Όπου:

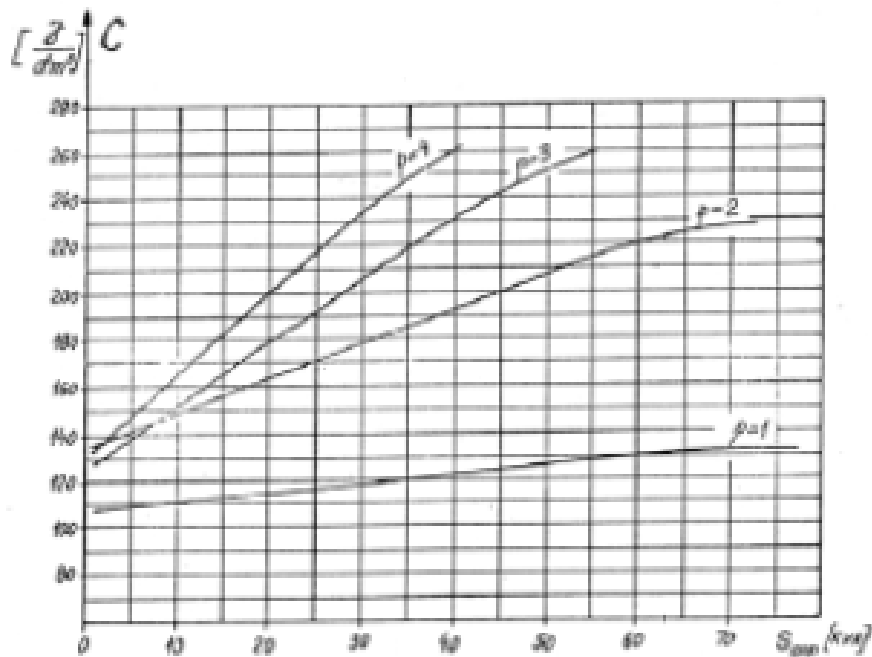
$$K_E = \frac{E_A}{V_\varphi} \approx 0,98 - 0,005 \cdot P = 0,98 - 0,005 \cdot 2 = 0,97$$

Άρα:

$$S_{gap} = \frac{K_E \cdot P_n}{\eta_N \cdot \cos\varphi} = \frac{0,97 \cdot 3000W}{0,865 \cdot 0,82} = 4102,6VA$$

Ο συντελεστής  $\lambda$  είναι ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα και όταν πρόκειται για τετραπολικούς κινητήρες παίρνει τιμή μεταξύ 1,2 και 1,8 (εμπειρική τιμή – από τον πίνακα 15.1 σελ. 449). Στη συγκεκριμένη μελέτη επιλέγουμε τιμή ίση με 1,5.

Το  $C_0$  ονομάζεται σταθερά του Esson και μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά. Εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως οι σπείρες ανά φάση, η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο του κινητήρα, η πυκνότητα του ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη κλπ. Δύναται όμως να υπολογιστεί και από την παρακάτω γραφική παράσταση η οποία ισχύει για μικρής ισχύος κινητήρες:



Σχήμα 13: Υπολογισμός του συντελεστή Esson

Από το παραπάνω διάγραμμα παίρνουμε μία προσεγγιστική τιμή:

$$C_0 \approx 130 \times 10^3 \text{ J/m}^3$$

Αντικαθιστώντας όλα τα παραπάνω στην σχέση (1) υπολογίζουμε:

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 2}{\pi \cdot 1,5} \cdot \frac{2}{50} \cdot \frac{4102,6}{130 \cdot 10^3}} = 0,093 \text{ m} = 9,3 \text{ cm}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε το μήκος του πυρήνα. Θα χρησιμοποιήσουμε την σχέση:

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \rightarrow L = \lambda \cdot \tau \rightarrow L = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot P} = \frac{1,5 \cdot 3,14 \cdot 0,093}{2 \cdot 2} \text{ m} = 0,109 \text{ m} = 10,9 \text{ cm}$$

, όπου  $\tau$  είναι το πολικό βήμα, δηλαδή η απόσταση ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς πόλους (pole pitch):

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot P} = \frac{3,14 \cdot 0,093m}{2 \cdot 2} = 0,073m = 7,3cm$$

Η εξωτερική διάμετρος του κινητήρα υπολογίζεται αρχικά από την εμπειρική σχέση:

$$\frac{D_{IS}}{D_{out}} = 0,62 \rightarrow D_{out} = \frac{D_{IS}}{0,62} = 0,15m = 150cm$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από εμπειρικά δεδομένα που εμφανίζονται στον πίνακα 3:

$\frac{D_{in}}{D_{out}}$	2	4	6	8
	0.54 - 0.58	0.61 - 0.63	0.68 - 0.71	0.72 - 0.74

Πίνακας 3

Αυτό που απομένει είναι να υπολογίσουμε το διάκενο μεταξύ του δρομέα και του στάτη. Το διάκενο υπολογίζεται από την σχέση:

$$g = (0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3}m = (0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{3000}) \cdot 10^{-3}m = 0,27mm$$

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι τα διάκενα είναι συγκεκριμένα, π.χ. 0,35mm, 0,4mm, 0,45mm, 0,5mm κλπ. Εμείς θα διαλέξουμε το μικρότερο διάκενο ίσο με 0,35mm. Ένα πολύ μικρό διάκενο προκαλεί μαγνητικά πεδία με υψηλότερες αρμονικές και μεγαλύτερες απώλειες, ενώ ένα μεγάλο διάκενο μειώνει τον συντελεστή ισχύος και την απόδοση του κινητήρα.

### 4.3 Τυλίγματα στάτη

Η μελέτη των τυλιγμάτων του στάτη ξεκινά με την επιλογή του αριθμού των αυλακώσεων, μέσα στις οποίες θα μπουν τα τυλίγματα. Για να υπολογίσουμε τον συνολικό αριθμό των αυλακώσεων χρησιμοποιούμε την σχέση:

$$N_S = 2 \cdot P \cdot q \cdot m$$

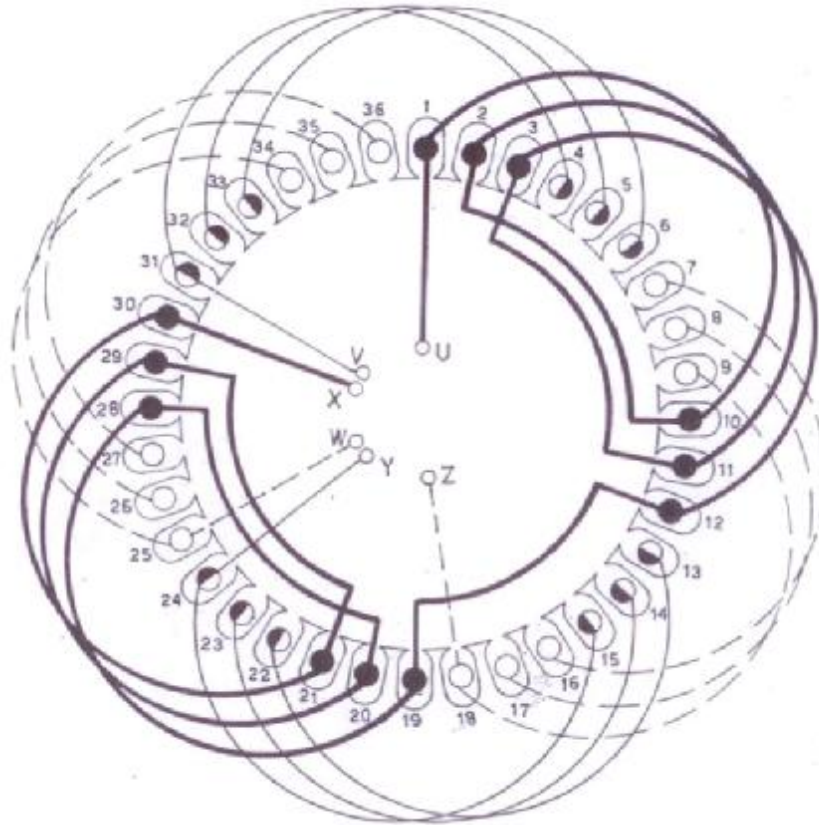
, όπου  $P$  τα ζεύγη πόλων,  $m$  ο αριθμός των φάσεων και  $q$  ο αριθμός των αυλακώσεων ανά φάση και πόλο. Επιλέγουμε τρία αυλακώσεις ανά φάση και πόλο άρα:

$$N_S = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 = 36 \text{ αυλακώσεις}$$

Το πολικό βήμα θα είναι:

$$y_{\pi} = \frac{36}{2 \cdot 2} = 9 \text{ αυλάκια}$$

Θα φτιάξουμε ένα τύλιγμα με μια στρώση (ένα μάτσο ανά αυλάκωση), με δυο πραγματικούς και δυο φανταστικούς πόλους, το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 14 : Το τύλιγμα της Μηχανής. 36 αυλακώσεις, 4 πόλοι (δύο πραγματικοί και δύο φανταστικοί)

Ο συντελεστής τυλίγματος δίνεται από την σχέση:

$$K_{\tau} = K_W = \frac{\sin \frac{q \cdot a}{2}}{q \cdot \sin \frac{a}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \cdot 20}{2}}{3 \cdot \sin \frac{20}{2}} = 0,96$$

, όπου  $a$  είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών αυλακώσεων σε ηλεκτρικές μοίρες, οι οποίες δίνονται από την σχέση:

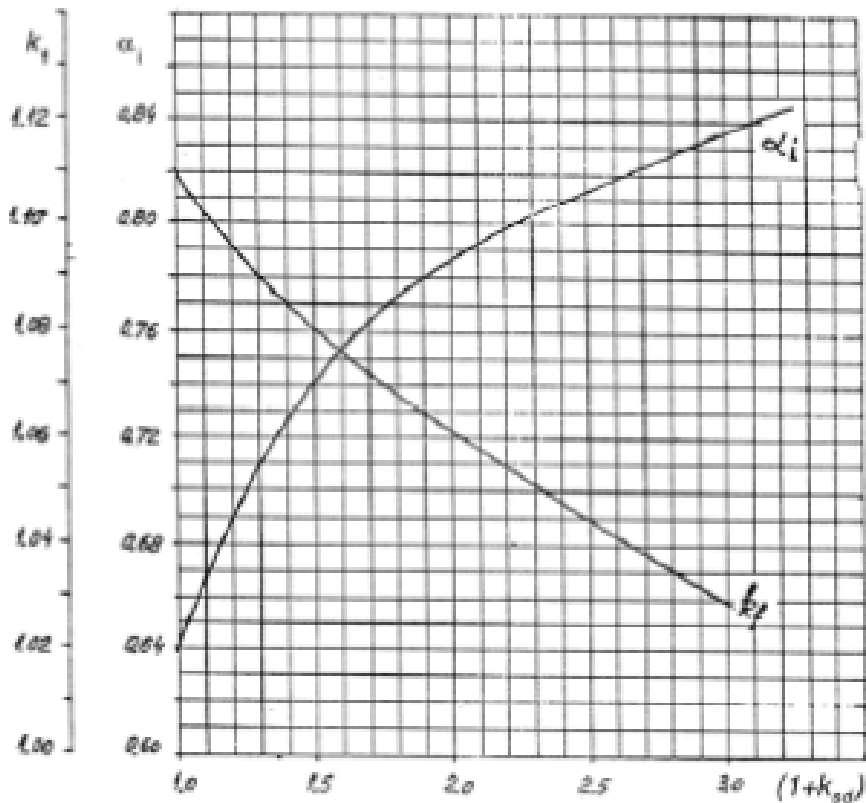
$$a = P \cdot a_r$$

, όπου  $a_r$  η γεωμετρική γωνία ( $360^\circ/36$  αυλακώσεις= $10^\circ$  στην περίπτωση μας).

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τον αριθμό αγωγών ανά φάση. Ο υπολογισμός στηρίζεται στην μαγνητική ροή που περνά από το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα και δίνεται από την σχέση:

$$\varphi = a_i \cdot \tau \cdot L \cdot B_g$$

, όπου  $\varphi$  η μαγνητική ροή,  $\tau$  το πολικό βήμα σε μέτρα,  $L$  το μήκος του πυρήνα άρα και του διακένου και  $B_g$  η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο. Η σταθερά  $a_i$  ονομάζεται flux density shape factor και προσδιορίζεται από την παρακάτω γραφική παράσταση:



Σχήμα 15 : Form Factor  $K_f$  και flux density shape factor  $a_i$  σαν συνάρτηση του  $1+K_{ST}$

Όπως φαίνεται και από το σχήμα, η σταθερά εξαρτάται από το  $1+K_{ST}$  που ονομάζεται tooth saturation factor. Υποθέτουμε ότι η παραπάνω σταθερά παίρνει τιμή ίση με 1,5 άρα από την γραφική παράσταση το  $a_i=0,73$ . Αναλυτικός υπολογισμός του  $1+K_{ST}$  θα γίνει αργότερα σε άλλη φάση της μελέτης.

Για μηχανές με τέσσερις πόλους συνίσταται η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο να είναι μεταξύ 0,65-0,78T [6]. Εμείς θα διαλέξουμε μια μαγνητική επαγωγή ίση με 0,7T. Άρα, η μαγνητική ροή στο διάκενο θα είναι ίση με:

$$\varphi = 0,73 \cdot 0,073 \cdot 0,109 \cdot 0,7 = 4 \cdot 10^{-3} Wb$$

Στην συνέχεια, υπολογίζουμε τον αριθμό των αγωγών ανά φάση, ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$W_i = \frac{K_E \cdot V_\phi}{4 \cdot K_f \cdot K_\tau \cdot f \cdot \phi}$$

, όπου η σταθερά  $K_f$  ονομάζεται form factor και εξαρτάται από τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού του πυρήνα και παίρνει τιμές  $1,02 < K_f < 1,11$ . Όπως και με την σταθερά  $a_i$  την βρίσκουμε από την εικόνα 15. Στην εν λόγω περίπτωση παίρνει τιμή 1,07.

Άρα:

$$W_i = \frac{K_E \cdot V_\phi}{4 \cdot K_f \cdot K_\tau \cdot f \cdot \phi} = \frac{0,97 \cdot 400 / \sqrt{3}}{4 \cdot 1,07 \cdot 0,96 \cdot 50 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 276 \text{ σπειρες} / \text{φάση}$$

Εν συνεχεία, υπολογίζουμε τον αριθμό αγωγών ανά αυλάκι:

$$n_s = \frac{a_i \cdot W_i}{P \cdot q} = \frac{1 \cdot 276}{2 \cdot 3} = 46 \text{ αγωγοί} / \text{αυλάκι}$$

Ο συντελεστής  $a_i$  εκφράζει τον αριθμό των παράλληλων αγωγών που στην περίπτωσή μας είναι 1.

Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε την διατομή των αγωγών που θα χρησιμοποιήσουμε στον στάτη. Το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα μας θα είναι ίσο με:

$$I_{ov} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_\pi \cdot \cos\phi \cdot \eta} = \frac{3000W}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,82 \cdot 0,865} = 6,1A$$

Για να υπολογίσουμε την διατομή των αγωγών, θα επιλέξουμε μια πυκνότητα ρεύματος. Για κινητήρες τεσσάρων πόλων συνίσταται η πυκνότητα ρεύματος να βρίσκεται μεταξύ:

$$I_{cos} = (4 \dots 7)A/mm^2$$

Όσο μεγαλώνει η πυκνότητα του ρεύματος, μειώνεται η διατομή των αγωγών αλλά μεγαλώνουν οι απώλειες χαλκού. Επιλέγουμε μια πυκνότητα ρεύματος ίση με  $5 A/mm^2$ , για να μην έχουμε μεγάλες απώλειες και υπολογίζουμε την διατομή:

$$A_{cu} = \frac{I_{ov}}{J_{cos}} = \frac{6,1A}{5A/mm^2} = 1,22mm^2$$

Η διάμετρος του αγωγού θα είναι ίση με:



$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{cu}}{\pi}} = 1,24mm$$

Από τον πίνακα της επόμενης σελίδας επιλέγουμε την αμέσως επόμενη τυποποιημένη διάμετρο η οποία είναι 1,25mm. Εάν η διάμετρος είναι μεγαλύτερη από 1,3mm τότε για κινητήρες μικρής ισχύος επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε παράλληλους κλάδους μικρότερης διαμέτρου.

Rated diameter [mm]	Insulated diameter [mm]
0.3	0.327
0.32	0.348
0.33	0.359
0.35	0.3795
0.38	0.4105
0.40	0.4315
0.42	0.4625
0.45	0.4835
0.48	0.515
0.50	0.536
0.53	0.567
0.55	0.5875
0.58	0.6185
0.60	0.639
0.63	0.6705
0.65	0.691
0.67	0.7145
0.70	0.742
0.71	0.7525
0.75	0.749
0.80	0.8455
0.85	0.897
0.90	0.948
0.95	1.0
1.0	1.051
1.05	1.102
1.10	1.153
1.12	1.173
1.15	1.2035
1.18	1.2345
1.20	1.305
1.25	1.305
1.30	1.356
1.32	1.3765
1.35	1.407
1.40	1.4575
1.45	1.508
1.5	1.559

Πίνακας 4 : Τυποποιημένες διαμέτροι αγωγών σάτη.

## 4.4 Υπολογισμός διαστάσεων αυλακώσεων στάτη

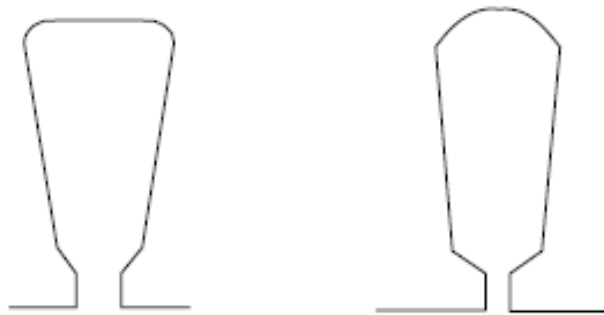
Από την στιγμή που γνωρίζουμε την διατομή των αγωγών και τον αριθμό τους, μπορούμε να υπολογίσουμε τη απαιτούμενη διατομή των αυλακώσεων του στάτη από την σχέση:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_i \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}}$$

Όπου  $K_{fill}$  είναι μια σταθερά (fill factor), η οποία εξαρτάται από το πάχος της μόνωσης που χρησιμοποιούμε και για κινητήρες μικρότερους από 10kW παίρνει τιμές από 0,35 έως 0,4. Επιλέγουμε τιμή 0,4 οπότε η διατομή των αυλακώσεων θα είναι ίση με:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_i \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}} = \frac{\pi \cdot 1,25^2 \cdot 1 \cdot 46}{4 \cdot 0,4} = 141 \text{mm}^2$$

Η μορφή των αυλακώσεων του στάτη έχει συνήθως μία από τις παρακάτω μορφές:



Σχήμα 16 : Τυπική μορφή αυλακώσεων του στάτη.

Το σχήμα 15 της επόμενης σελίδας απεικονίζει αναλυτικά τις διαστάσεις που θα πρέπει να υπολογιστούν. Κάποιες από τις διαστάσεις αυτές υπολογίζονται εμπειρικά από την βιομηχανική εμπειρία. Πιο συγκεκριμένα:

$b_{os} = 2 - 3 \text{mm}$ , επιλέγουμε 2,5mm.

$h_{os} = 0,5 - 1 \text{mm}$ , επιλέγουμε 0,5mm.

$h_w = 1 - 4 \text{mm}$ , επιλέγουμε 1mm.

Εάν υποθέσουμε ότι όλη η μαγνητική ροή περνά μέσα από το «δόντι» του στάτη, τότε ισχύει η σχέση:

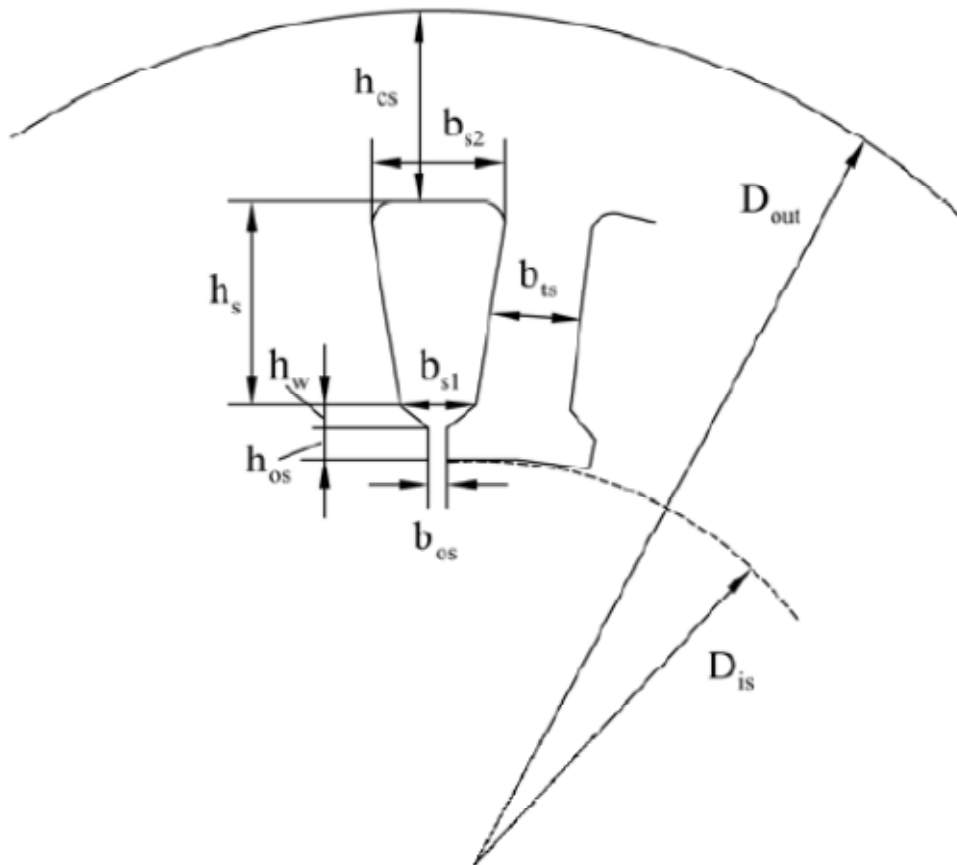
$$B_g \cdot \tau_s \cdot L = B_{ts} \cdot b_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe}$$

Αριστερά της εξίσωσης είναι η μαγνητική ροή στο διάκενο και δεξιά η μαγνητική ροή στο «δόντι» του αυλακιού. Ο  $K_{Fe}$  είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα της μόνωσης μεταξύ των μεταλλικών φύλλων από τα οποία αποτελείται ο στάτης και  $B_{ts}$  είναι η μαγνητική επαγωγή στον στάτη, η οποία συνίσταται να παίρνει τιμές μεταξύ 1,5T έως 1,65T. [6] Η μαγνητική επαγωγή είναι φυσικά μεγαλύτερη σε σχέση με την μαγνητική επαγωγή του διακένου λόγω της παρουσίας του σιδηρομαγνητικού υλικού.

Άρα:

$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s \cdot L}{B_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe}} = \frac{0,7 \cdot 8,1 \cdot 10^{-3}}{1,55 \cdot 0,96} = 3,8 \cdot 10^{-3} m$$

Θα πρέπει να τονιστεί ότι το πλάτος του δοντιού δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από 3,5mm για κατασκευαστικούς λόγους.



Σχήμα 17 : Οι διαστάσεις του στάτη αναλυτικά.

Από την γεωμετρία της αυλάκωσης προκύπτει ότι:

$$b_{s1} = \frac{\pi \cdot (D_{is} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_s} - b_{ts}$$

$$= \frac{\pi \cdot (93 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 1) \cdot 10^{-3}}{36} - 3,8 \cdot 10^{-3}$$

$$\rightarrow b_{s1} = 4,6 \cdot 10^{-3} m = 4,6 mm$$

Επίσης:

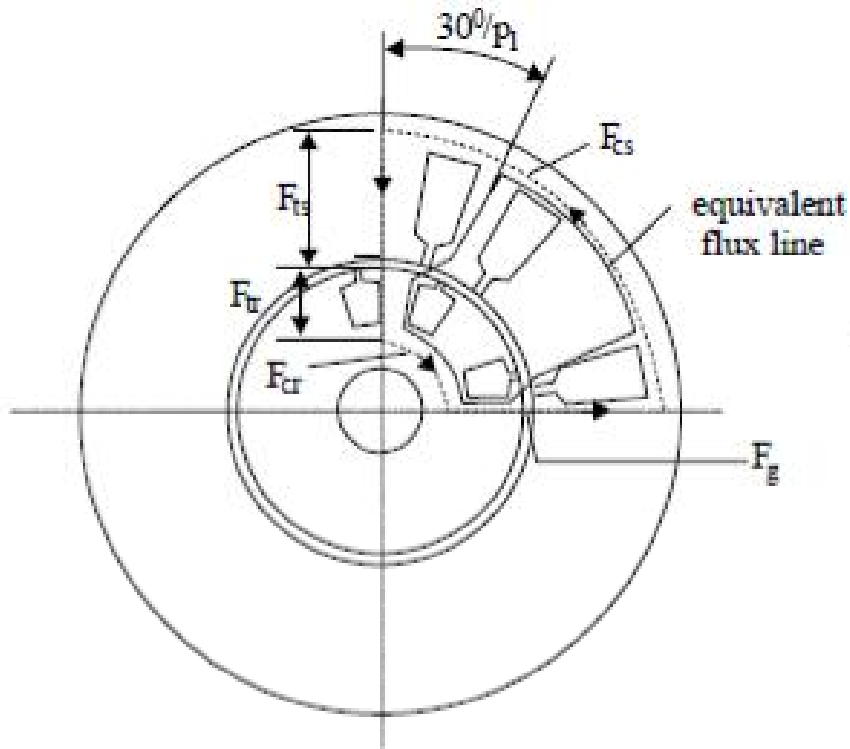
$$b_{s2} = \sqrt{4 \cdot A_{su} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_s}\right) + b_{s1}^2} = \sqrt{4 \cdot 141 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{36}\right) + 4,6^2} mm = 4,7 mm$$

$$A_{su} = h_s \cdot \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot A_{su}}{(b_{s1} + b_{s2})} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot 141}{(4,6 + 4,7)} = 30 mm$$

Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε τον συντελεστή  $1+K_{st}$  (tooth saturation factor), στον οποίο αυθαίρετα είχαμε δώσει μία τιμή ίση με 1,5. Ο συντελεστής δίνεται από την σχέση:

$$1 + K_{st} = 1 + \frac{F_{mts} + F_{mtr}}{F_{mg}}$$

Όπου  $F_{mts}$ ,  $F_{mtr}$  και  $F_{mg}$  είναι η μαγνητευρτική δύναμη στον στάτη, στον δρομέα και στο διάκενο αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 18.

Η μαγνητεγερτική δύναμη στο διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα δίνεται από την σχέση:

$$F_{mg} = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0}$$

, όπου  $K_C$  είναι ο συντελεστής Carter (Carter coefficient) που δίνεται από την σχέση:

$$K_C = \frac{B_{g1max}}{B_{g1}}$$

, όπου  $B_{gmax}$  είναι η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο χωρίς ανώτερες αρμονικές και  $B_g$  είναι η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο με ανώτερες αρμονικές (αναφέρεται στην βασική).

Ο συντελεστής Κάρτερ μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά αλλά χρειάζονται κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του δρομέα. Για να συνεχίσουμε την μελέτη, θεωρούμε μία τυπική τιμή για τον συντελεστή αυτόν ίση με 1,2. Προκύπτει λοιπόν ότι:

$$F_{mg} = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} = 1,2 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,7}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 233At$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη στον στάτη  $F_{mts}$ , δίνεται από την σχέση:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w)$$

, όπου  $H_{ts}$  είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου στον στάτη.

Από τον πίνακα 5 που ακολουθεί, παίρνουμε συνηθισμένες (τυποποιημένες) τιμές της καμπύλης μαγνήτισης για σιδηρομαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές μηχανές:

B[T]	H[A/m]	B[T]	H[A/m]
0.05	22.8	1.05	237
0.1	35	1.1	273
0.15	45	1.15	310
0.2	49	1.2	356
0.25	57	1.25	417
0.3	65	1.3	482
0.35	70	1.35	585
0.4	76	1.4	760
0.45	83	1.45	1050
0.5	90	1.5	1340
0.55	98	1.55	1760
0.6	106	1.6	2460
0.65	115	1.65	3460
0.7	124	1.7	4800
0.75	135	1.75	6160
0.8	148	1.8	8270
0.85	162	1.85	11170
0.9	177	1.9	15220
0.95	198	1.95	22000
1.0	220	2.0	34000

Πίνακας 5

Επιλέγοντας  $B_{ts}=1,55T$  (συνήθως παίρνει τιμές μεταξύ  $1,5T - 1,65T$ ) προκύπτει ότι  $H_{ts}=1760At$ .

Άρα:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w) = 1760 \cdot (30 + 0,5 + 1) \cdot 10^{-3} = 55,44At$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη στον δρομέα υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_{mtr} = K_{st} \cdot F_{mg} - F_{mts} = 0,5 \cdot 233 - 55,44 = 61,06At$$

Οι τιμές των  $F_{mts}$  και  $F_{mtr}$  πρέπει να είναι κοντά. Εάν το  $F_{mtr} \ll F_{mts}$ , θα πρέπει να θεωρήσουμε μικρότερη μαγνητική επαγωγή στο διάκενο και να επιστρέψουμε στον υπολογισμό της μαγνητικής ροής  $\Phi$ .

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το  $h_{cs}$  (βλέπε εικόνα 4). Αυτό δίνεται από την σχέση:

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{IS} - 2 \cdot (h_{os} + h_w + h_s))}{2} = \frac{150 - (90 + 2 \cdot (0,5 + 1 + 30))}{2} \rightarrow h_{cs}$$

$$= \frac{150 - 156}{2}$$

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η εξωτερική διάμετρος του κινητήρα, όπως τον υπολογίσαμε στην αρχή, είναι μικρή. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος θα είναι η μείωση των διαστάσεων των αυλακώσεων του στάτη μέσω της αύξησης της πυκνότητας ρεύματος.

Θα θεωρήσουμε μια νέα πυκνότητα ρεύματος ίση με  $7A/mm^2$  και θα υπολογίσουμε εκ νέου την επιφάνεια της αυλάκωσης και τις επιμέρους διαστάσεις της.

Επιλέγουμε μια πυκνότητα ρεύματος ίση με  $7 A/mm^2$  και υπολογίζουμε εκ νέου την διατομή των αγωγών:

$$A_{cu} = \frac{I_{ov}}{J_{cos}} = \frac{6,1A}{7A/mm^2} = 0,87mm^2$$

Η διάμετρος του αγωγού (όπως προκύπτει και από τον πίνακα 5) θα είναι ίση με:

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{cu}}{\pi}} = 1,05mm$$

Η νέα επιφάνεια της αυλάκωσης θα είναι:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_i \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}} = \frac{\pi \cdot 1,05^2 \cdot 1 \cdot 46}{4 \cdot 0,4} = 99mm^2$$

$$b_{s2} = \sqrt{4 \cdot A_{su} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_s}\right) + b_{s1}^2} = \sqrt{4 \cdot 99 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{36}\right) + 4,6^2}mm = 4,64mm$$

$$A_{su} = h_s \cdot \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot A_{su}}{(b_{s1} + b_{s2})} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot 99}{(4,6 + 4,7)} = 21,5mm$$

Με τα νέα δεδομένα υπολογίζουμε πάλι την διάσταση  $h_{cs}$  από την σχέση:

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{IS} - 2 \cdot (h_{os} + h_w + h_s))}{2} = \frac{150 - (93 + 2 \cdot (0,5 + 1 + 21,5))}{2} \rightarrow h_{cs} = 5mm$$

Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε την μαγνητική επαγωγή στον στάτη και συγκεκριμένα στον χώρο μεταξύ των αυλακώσεων και της εξωτερικής περιμέτρου  $B_{cs}$  (Back core flux density). Η συγκεκριμένη μαγνητική ροή θα υπολογιστεί από την σχέση:

$$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot h_{cs}} = \frac{4 \cdot 10^{-3}Wb}{2 \cdot 0,109m \cdot 5 \cdot 10^{-3}m} = 3,67T$$



Η συγκεκριμένη τιμή της μαγνητικής επαγωγής είναι πολύ μεγάλη, εάν λάβουμε υπόψη μας ότι θέλουμε να βρίσκεται μεταξύ 1,4T-1,7T. Αναφορικά με την επίλυση του προβλήματος, υπάρχουν τρεις δυνατότητες:

1. Να αυξήσουμε την εξωτερική διάμετρο του στάτη.
2. Να εισάγουμε μια μεγαλύτερη τιμή για τον συντελεστή  $\lambda$  (stack aspect ratio), γεγονός που θα οδηγήσει σε μικρότερη εσωτερική διάμετρο του στάτη άρα και σε μικρότερο δρομέα.
3. Να μειώσουμε και άλλο το  $h_s$ , δηλαδή να μειώσουμε την διατομή των αυλακώσεων, το οποίο δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση μας.

Επιλέγουμε την πρώτη δυνατότητα. Για να μειωθεί η μαγνητική επαγωγή στον πυρήνα του στάτη σε τιμή ίση με 1,5T, θα πρέπει το  $h_{cs}$  να γίνει ίσο με:

$$h_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot B_{cs}} = \frac{4 \cdot 10^{-3} Wb}{2 \cdot 0,109m \cdot 1,5T} = 12,2mm$$

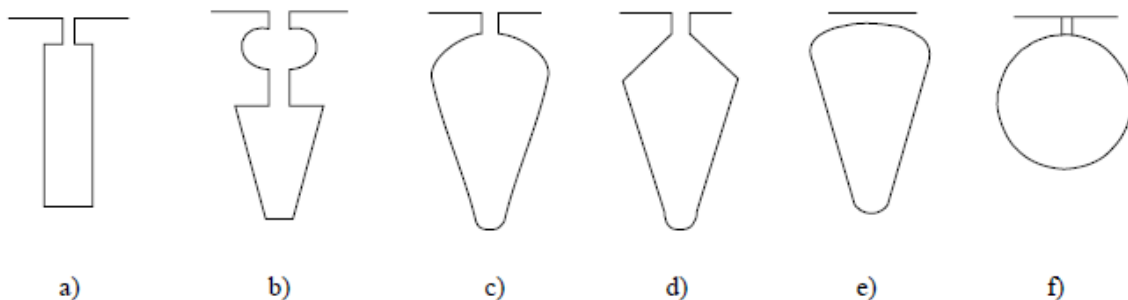
Επομένως, η εξωτερική διάμετρος θα πρέπει να αυξηθεί κατά  $2 \cdot (12,2 - 5)mm = 14,4mm$ .

Άρα η εξωτερική διάμετρος της μηχανής θα είναι:

$$D_{out} = 150 + 14,4 = 164,4 = 165mm$$

## 4.5 Δρομέας

Αρχικά θα υπολογίσουμε τη μορφή και τον αριθμό των αγωγών του δρομέα. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζονται οι τυπικές μορφές των αγωγών του δρομέα:



Σχήμα 19: Τυπικές μορφές αγωγών δρομέα.

Για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών που θα ακολουθήσουν, επιλέγουμε την πρώτη μορφή. Στην συνέχεια, θα επιλέξουμε τον αριθμό των αγωγών. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τυποποιημένες τιμές που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία:

$2p_1$	$N_s$	$N_r$ – skewed rotor slots
2	24	18, 20, 22, 28, 30, 33, 34
	36	25, 27, 28, 29, 30, 43
	48	30, 37, 39, 40, 41
4	24	16, 18, 20, 30, 33, 34, 35, 36
	36	28, 30, 32, 34, 45, 48
	48	36, 40, 44, 57, 59
	72	42, 48, 54, 56, 60, 61, 62, 68, 76
6	36	20, 22, 28, 44, 47, 49
	54	34, 36, 38, 40, 44, 46
	72	44, 46, 50, 60, 61, 62, 82, 83
8	48	26, 30, 34, 35, 36, 38, 58
	72	42, 46, 48, 50, 52, 56, 60
12	72	69, 75, 80
	90	86, 87, 93, 94

Πίνακας 6 : Αριθμός αγωγών δρομέα σε συνάρτηση με τον αριθμό των πόλων και τον αριθμό των αυλακώσεων του στάτη.

Διαλέγουμε 28 αγωγούς και συνεχίζουμε με τον υπολογισμό του ονομαστικού ρεύματος ενός αγωγού του δρομέα:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_{w1} \cdot I_{1n} \cdot K_I}{N_r}$$

Όπου :

$$K_I = 0,8 \cdot \cos\varphi + 0,2 = 0,856$$

Το  $\cos\varphi$  είναι ο συντελεστής ισχύος της μηχανής που θέλουμε να επιτύχουμε (0,82 στην περίπτωση μας).

Άρα:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_{w1} \cdot I_{1n} \cdot K_I}{N_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 276 \cdot 0,96 \cdot 6,1 \cdot 0,856}{28} = 296,4A$$

Για κινητήρες με μεγάλη απόδοση θα πρέπει η πυκνότητα ρεύματος στον αγωγό (μπάρα) του δρομέα να είναι ίση με  $3,42A/mm^2$ . Για να το επιτύχουμε αυτό, θα πρέπει η διατομή της κάθε μπάρας του δρομέα να είναι ίση με:

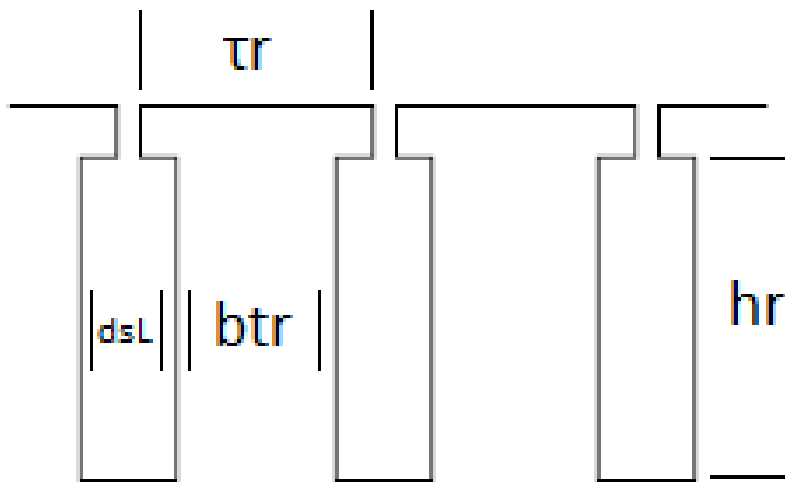
$$A_b = \frac{296,4A}{3,42 A/mm^2} = 86,6mm^2$$

Το ρεύμα στους δακτυλίους που βραχυκυκλώνουν τις μπάρες του δρομέα (end ring current) θα είναι ίσο με:

$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot P}{N_r}} = \frac{296,4A}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 2}{28}} = 673,63A$$

Η διατομή του δακτυλίου βραχυκύκλωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{673,63A}{0,8 \cdot 3,42 A/mm^2} = 242,66mm^2$$



Σχήμα 20 : Οι βασικές διαστάσεις των αγωγών του δρομέα.

#### 4.5.1 Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα.

Θα υπολογίσουμε αρχικά την απόσταση ανάμεσα σε δυο αγωγούς του δρομέα (Rotor slot pitch).

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot (D_{is} - 2g)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (93 - 2 \cdot 0,35)}{28} = 13 = 10,3mm$$

Θεωρώντας ότι η μαγνητική επαγωγή στο «δόντι» του δρομέα είναι ίση με 1,6T, υπολογίζουμε την διάσταση  $b_{tr}$  από την σχέση:

$$b_{tr} \cdot K_{fe} \cdot B_{tr} = B_g \cdot \tau_r$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει θεωρώντας ότι η μαγνητική ροή στο δόντι του στάτη και στο διάκενο είναι ίδια.

Άρα, προκύπτει ότι:

$$b_{tr} = \frac{B_g \cdot \tau_r}{K_{fe} \cdot B_{tr}} = \frac{0,7T \cdot 10,3 \cdot 10^{-3}}{0,96 \cdot 1,6T} = 4,7 \cdot 10^{-3} mm$$

Λόγω της πολύ μικρής απόστασης του δρομέα από την εσωτερική περιφέρεια του στάτη θεωρούμε κατά προσέγγιση ότι η διάμετρος του δρομέα είναι ίση με:

$$D_{re} = D_{is} = 93mm$$

Επομένως, η περιφέρεια του δρομέα θα είναι:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot \frac{93}{2} = 292mm$$

Από το σχήμα των αγωγών προκύπτει ότι:

$$d_{SL} = \tau_r - b_{tr} = 10,3mm - 4,7mm = 5,6mm$$

Το βάθος του αγωγού θα είναι:

$$h_r = \frac{A_b}{d_{SL}} = \frac{86,6mm^2}{5,6mm} = 15,5mm$$

Οι άλλες δυο διαστάσεις  $b_{or}$  και  $h_{or}$  παίρνουν τυποποιημένες τιμές 1,5mm και 0,5mm αντίστοιχα.

Γνωρίζοντας τις ακριβείς διαστάσεις του δρομέα και των αγωγών του, θα υπολογίσουμε την μαγνητεγερτική δύναμη στο «δόντι» του δρομέα. Εάν θέλουμε η μαγνητική επαγωγή να είναι ίση με 1,6T, τότε από τον πίνακα 3 για το υλικό που χρησιμοποιείται η ένταση του μαγνητικού πεδίου θα είναι 2460A/m. Άρα, η μαγνητεγερτική δύναμη που απαιτείται είναι ίση με:

$$F_{mtr} = H_{tr} \cdot (h_r + h_{or} + d_{SL}) = 2450 \cdot A/m \cdot (15,5 + 0,5 + 5,6) \cdot 10^{-3}m = 52,9At$$

Η τιμή που υπολογίσαμε είναι κοντά στη μαγνητεγερτική δύναμη του στάτη  $F_{mts}$  όπως πρέπει να είναι κάτι που κάνει την σχεδίαση μέχρι τώρα αποδεκτή.

Αυτό που απομένει είναι ο υπολογισμός της απόστασης του δρομέα πίσω (κάτω) από τα αυλάκια. Η μαγνητική επαγωγή στο χώρο αυτό του δρομέα θα πρέπει να είναι μεταξύ 1,4T και 1,7T. Επιλέγοντας τιμή ίση με 1,6T, έχουμε:

$$h_{cr} = \frac{\Phi}{2} \cdot \frac{1}{L \cdot B_{cr}} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{1}{0,109 \cdot 1,6T} = 11,5mm$$

#### 4.5.2 Υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα.

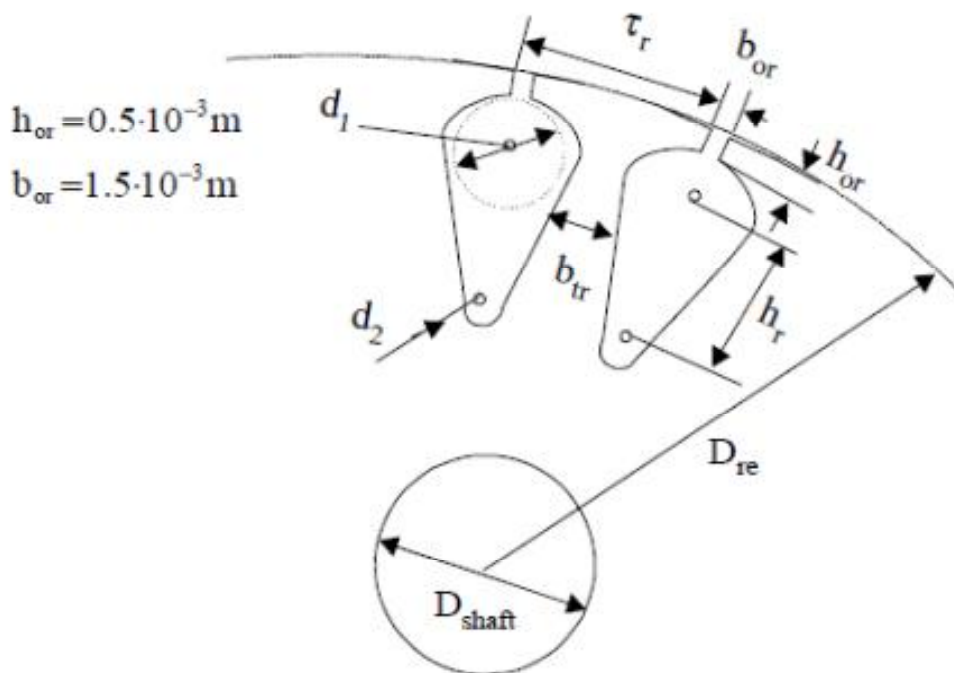
Στην συνέχεια, θα υπολογίσουμε την διάμετρο του άξονα της μηχανής. Η μέγιστη δυνατή διάμετρος εξαρτάται από τις διαστάσεις του δρομέα και των αυλακιών και παίρνει τιμή ίση με:

$$D_{shaft} \leq D_{is} - 2 \cdot (h_r + h_{or} + h_{cr}) - 2 \cdot g$$
$$\rightarrow D_{shaft} \leq 93 - 2 \cdot (15,5 + 0,5 + 11,5) - 2 \cdot 0,35 = 37,3mm$$

Η ροπή στον άξονα του κινητήρα (και υποθέτοντας μια ολίσθηση ίση με 0,02) υπολογίζεται ως εξής:

$$T = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{3000W}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot (1 - 0,02)} = 19,5Nm$$

Με βάση την βιομηχανική εμπειρία για μια τέτοια ροπή η διάμετρος του άξονα είναι ικανοποιητική.



Σχήμα 21 : Γενική μορφή του δρομέα και του άξονα του.

## 4.6 Υπολογισμός ρεύματος μαγνήτισης

Έχοντας καθορίσει τις διαστάσεις της μηχανής μας και γνωρίζοντας την απαιτούμενη μαγνητεγερτική δύναμη, ώστε να έχουμε την μαγνητική επαγωγή που θέλουμε στα διάφορα σημεία του κινητήρα, θα υπολογίσουμε το ρεύμα μαγνήτισης που απαιτείται για την δημιουργία των πεδίων αυτών.

Αρχικά, θα υπολογίσουμε την ολική μαγνητεγερτική δύναμη που απαιτείται, η οποία είναι το άθροισμα των επιμέρους μαγνητεγερτικών δυνάμεων (σχήμα 18):

$$F_{1m} = 2 \cdot (K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} + F_{mts} + F_{mtr} + F_{mcs} + F_{mcr})$$

, όπου  $K_C$  είναι ο συντελεστής Carter για τον οποίο είχαμε έως τώρα θεωρήσει μια τυπική τιμή ίση με 1,2. Τώρα που γνωρίζουμε τις διαστάσεις του κινητήρα, μπορούμε να τον υπολογίσουμε αναλυτικά ως εξής:

$$K_C = K_{C1} \cdot K_{C2}$$

Όπου:

$$K_{C1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1}$$

$$K_{C2} = \frac{\tau_r}{\tau_s - \gamma_2}$$

Και:

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{5 \cdot g + b_{os}} = \frac{2,5^2}{5 \cdot 0,35 + 2,5} = 1,47$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5 \cdot g + b_{or}} = \frac{1,5^2}{5 \cdot 0,35 + 1,5} = 0,69$$

Άρα:

$$K_{C1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} = \frac{8,1}{8,1 - 1,47} = 1,22$$

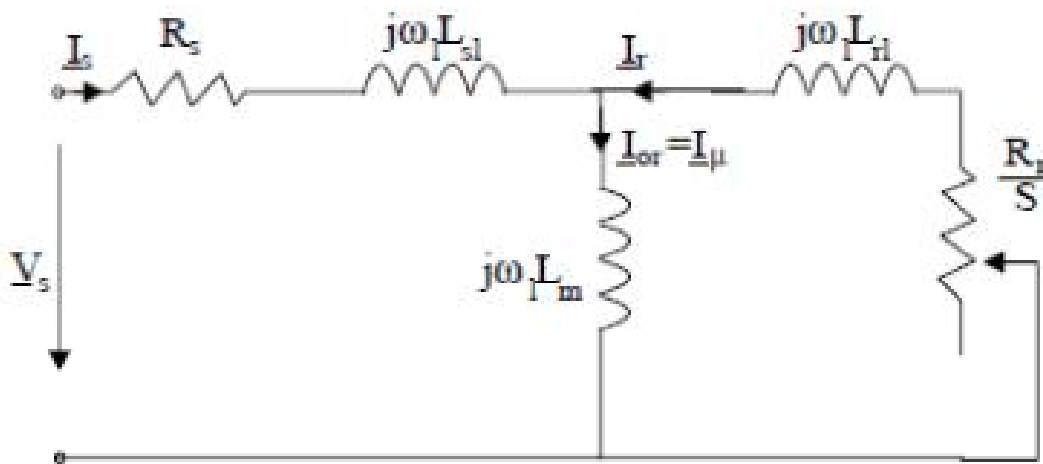
$$K_{C2} = \frac{\tau_r}{\tau_s - \gamma_2} = \frac{10,3}{10,3 - 0,69} = 1,07$$

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1,22 \cdot 1,07 = 1,3$$

Η τιμή του συντελεστή είναι κοντά στην τιμή 1,2 που υποθέσαμε αρχικά, επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι υπολογισμοί μας έως τώρα είναι σωστοί.

## 4.7 Υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα είναι το παρακάτω:



Σχήμα 22: Ισοδύναμο κύκλωμα

Στο παραπάνω ισοδύναμο δεν εμφανίζεται η ωμική αντίσταση  $R_{fe}$  που αντιστοιχεί στις απώλειες σιδήρου. Η ωμική αντίσταση (ανά φάση) του στάτη δίνεται από την σχέση:

$$R_s = \rho_{CO} \cdot \frac{l_c \cdot W_i}{A_{CO} \cdot a_i}$$

, όπου  $\rho_{CO}$  είναι η ειδική αντίσταση του χαλκού στους  $80^\circ\text{C}$  και  $l_c$  είναι το μήκος του τυλίγματος κάθε φάσης:

$$l_c = 2 \cdot (L + l_{end})$$

, όπου  $L$  είναι το μήκος του στάτη και  $l_{end}$  είναι το μήκος του τυλίγματος που είναι ουσιαστικά έξω από τις αυλακώσεις του στάτη. Το μήκος  $l_{end}$  για μηχανές τεσσάρων πόλων δίνεται προσεγγιστικά από την σχέση:

$$l_{end} = 2 \cdot y - 0,02m$$

, όπου  $y$  είναι το βήμα του τυλίγματος. Στην περίπτωσή μας ισχύει:

$$\frac{y}{\tau} = \frac{7}{9} \rightarrow y = \frac{7}{9} \cdot \tau = \frac{7}{9} \cdot 0,073m = 0,0567m$$

Άρα:

$$l_{end} = 2 \cdot y - 0,02m = 2 \cdot 0,0567 - 0,02 = 0,0934m$$

Η ειδική αντίσταση του χαλκού στους 20°C είναι  $1,78 \times 10^{-8} \Omega m$ . Στους 80°C (ενδεικτική περίπτωση θερμοκρασίας κατά την λειτουργία της μηχανής) η ειδική αντίσταση θα είναι ίση με:

$$\rho_{80} = \rho_{20} \cdot \left( 1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20) \right) = 2,17 \cdot 10^{-8} \Omega m$$

Το συνολικό μήκος του τυλίγματος κάθε φάσης θα είναι:

$$l_c = 2 \cdot (L + l_{end}) = 2 \cdot (0,109 + 0,0934) = 0,3114m$$

Η αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη θα είναι ίση με:

$$R_S = \rho_{CO} \cdot \frac{l_c \cdot W_i}{A_{CO} \cdot a_i} = 2,17 \cdot 10^{-8} \Omega m \cdot \frac{0,3114m \cdot 276}{0,87 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot 1} = 2,14 \Omega$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την αντίσταση του δρομέα. Η συνδυασμένη αντίσταση των αγωγών του δρομέα και των δακτυλίων βραχυκύκλωσης δίνεται από την σχέση:

$$R_{be} = \rho_{Al} \cdot \left[ \frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin\left(\frac{\pi P_1}{N_r}\right)} \right]$$

Στην παραπάνω σχέση ο συντελεστής  $K_R$  ονομάζεται skin effect resistance coefficient. Η ειδική αντίσταση του αλουμινίου στους 20°C είναι ίση με  $3,1 \times 10^{-8} \Omega m$  (οι αγωγοί του δρομέα είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο). Το μήκος του τομέα του δακτυλίου βραχυκύκλωσης που αντιστοιχεί σε έναν αγωγό του δρομέα θα είναι

$$l_{er} = \frac{\pi \cdot (D_{er} - b)}{N_r}$$

, όπου  $b$  είναι το ύψος (ή βάθος) του δακτυλίου βραχυκύκλωσης:

$$b = h_r + h_{or} + d_{SL} = 15,43 + 0,5 + 5,61 = 21,54mm$$

$$D_{er} = D_{re} - 3,5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot g = 0,093 - 0,0035 - 2 \cdot 0,0035 = 0,0825m$$



Συνεπώς, το μήκος του τομέα του δακτυλίου βραχυκύκλωσης θα είναι:

$$l_{er} = \frac{\pi \cdot (D_{er} - b)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (0,0825 - 0,02154)}{28} = 6,8 \cdot 10^{-3} m$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε την σταθερά  $K_R$  από την σχέση:

$$K_R = \frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \xi \cdot \frac{(\sinh 2\xi + \sin 2\xi)}{(\cos 2\xi - \cos 2\xi)} \approx \xi$$

, όπου

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s}$$

Το  $h_r$  είναι το βάθος των αγωγών του δρομέα και ο συντελεστής  $\beta_s$  είναι ο λόγος του βάθους του αγωγού προς το μέρος εκείνο του αγωγού που διαπερνάται από μαγνητικό πεδίο. Ο συντελεστής δίνεται από την σχέση:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \rho_{Al}}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 1,25 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,1 \cdot 10^{-8}}} = 79,5 m^{-1}$$

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s} = 79,5 m^{-1} \cdot 0,01543 m \cdot 1 = 1,21$$

Άρα, η αντίσταση του δρομέα στους  $80^\circ C$  θα είναι ίση με:

$$\begin{aligned} R_{be}^{80} &= \rho_{Al} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{273} (80 - 20) \right] \cdot \left[ \frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin\left(\frac{\pi P_1}{N_r}\right)} \right] \\ &= 3,1 \cdot 10^{-8} \left[ 1 + \frac{1}{273} (80 - 20) \right] \\ &\quad \cdot \left[ \frac{0,109 \cdot 1,21}{86,6 \cdot 10^{-6}} + \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 242,66 \cdot 10^{-3} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{28}\right)} \right] = 0,6943 \cdot 10^{-4} \Omega \end{aligned}$$

Η παραπάνω αντίσταση είναι η πραγματική αντίσταση του δρομέα. Στο ισοδύναμο κύκλωμα η αντίσταση είναι ανοιγμένη στον στάτη. Η ανοιγμένη αντίσταση υπολογίζεται από την σχέση:

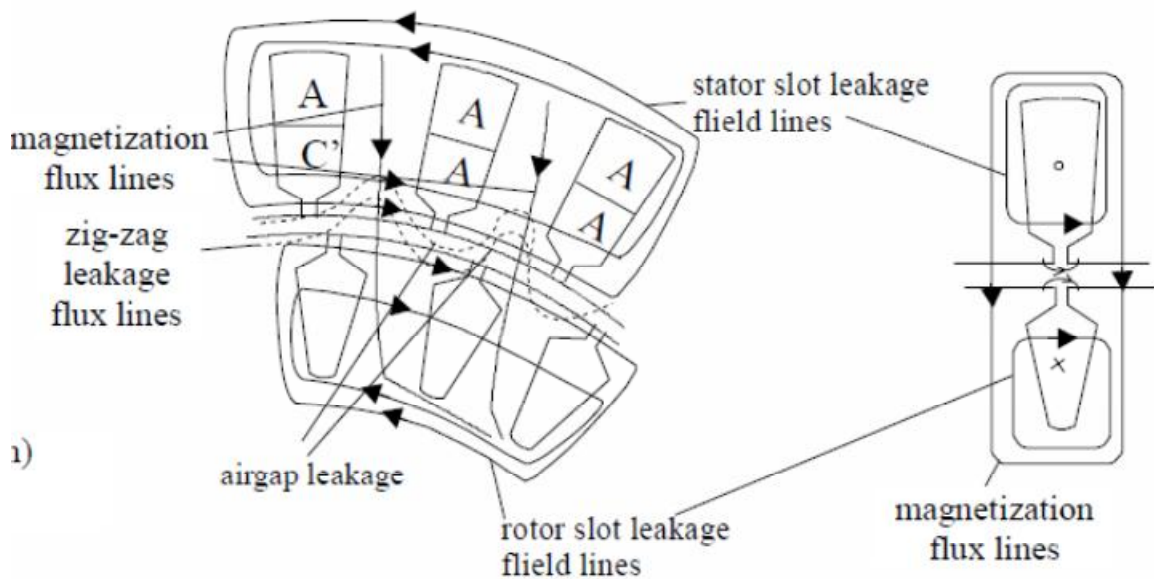
$$R_2 = \frac{4 \cdot m}{N_r} \cdot (W_i \cdot K_{w1}) \cdot R_{be}^{80} = \frac{4 \cdot 3}{28} \cdot (276 \cdot 0,96) \cdot 0,6943 \cdot 10^{-4} \Omega = 2,09 \Omega$$

### 4.7.1 Υπολογισμός επαγωγικών αντιδράσεων

Σε μια επαγωγική μηχανή ένα μέρος του μαγνητικού πεδίου διαπερνά τόσο τον στάτη όσο και τον δρομέα (magnetization flux lines – αμοιβαία ροή), ενώ υπάρχουν και δυναμικές γραμμές που περνούν μόνο από τον στάτη ή μόνο από τον δρομέα (leakage flux lines – ροή σκέδασης). Τόσο η αμοιβαία ροή όσο και η ροή σκέδασης στο εσωτερικό ενός επαγωγικού κινητήρα απεικονίζονται στο σχήμα της επόμενης σελίδας. Η επαγωγική αντίδραση του στάτη (ανά φάση) δίνεται από τη σχέση:

$$X_{SL} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_1 \cdot L \cdot \frac{W_i^2}{p_1 \cdot q} \cdot (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{er})$$

όπου  $\lambda_s$ ,  $\lambda_{ds}$ ,  $\lambda_{er}$  αποτελούν συντελεστές που ονομάζονται slot coefficient, differential coefficient και end ring coefficient αντίστοιχα.



Σχήμα 23 : Αμοιβαία ροή και ροή διαρροής στο εσωτερικό μιας επαγωγικής μηχανής.

Ο συντελεστής  $\lambda_s$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_s = \left[ \frac{2}{3} \cdot \frac{h_s}{(b_{s1} + b_{s2})} + \frac{2 \cdot h_w}{(b_{os} + b_{s1})} + \frac{h_{os}}{b_{os}} \right] \cdot \left( \frac{1 + 3\beta}{4} \right)$$

, όπου  $\beta = y/\tau = 7/9$ . Οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης αντιστοιχούν στις διαστάσεις των αυλακώσεων του στάτη (σχήμα 17). Αντικαθιστώντας τις τιμές στην παραπάνω εξίσωση, έχουμε:

$$\lambda_s = \left[ \frac{2}{3} \cdot \frac{h_s}{(b_{s1} + b_{s2})} + \frac{2 \cdot h_w}{(b_{os} + b_{s1})} + \frac{h_{os}}{b_{os}} \right] \cdot \left( \frac{1 + 3\beta}{4} \right)$$

$$= \left[ \frac{2}{3} \cdot \frac{21,5}{4,6 + 4,64} + \frac{2 \cdot 1}{2,5 + 4,6} + \frac{0,5}{2,5} \right] \cdot \left( \frac{1 + 3 \cdot 7/9}{4} \right) = 1,67$$

Ο συντελεστής  $\lambda_{ds}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_{ds} = \frac{0,9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_{w1}^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{st})}$$

, όπου

$$C_s = 1 - 0,033 \cdot \frac{b_{os}^2}{g \cdot \tau_s}$$

και

$$\gamma_{ds} = (0,18 \cdot \sin\varphi_1 + 1,24) \cdot 10^{-2}$$

$$\varphi_1 = \pi \cdot (6\beta - 5,5)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$\gamma_{ds} = (0,18 \cdot \sin\varphi_1 + 1,24) \cdot 10^{-2} = 1,15 \cdot 10^{-2}$$

$$C_s = 1 - 0,033 \cdot \frac{b_{os}^2}{g \cdot \tau_s} = 1 - 0,033 \cdot \frac{2,5^2}{0,35 \cdot 8,1} = 0,927$$

και

$$\lambda_{ds} = \frac{0,9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_{w1}^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{st})} = \frac{0,9 \cdot 8,1 \cdot 10^{-3} \cdot 3^2 \cdot 0,96^2 \cdot 0,927 \cdot 1,15 \cdot 10^{-2}}{1,35 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0,5)} = 0,908$$

Ο συντελεστής  $\lambda_{er}$  για τύλιγμα μονού στρώματος (single layer winding) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_{er} = 0,67 \cdot \frac{q}{L} \cdot (l_{end} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0,67 \cdot \frac{3}{0,109} \cdot \left( 0,0934 - 0,64 \cdot \frac{7}{9} \cdot 0,073 \right) \rightarrow \lambda_{ec}$$

$$= 0,4675$$

Από τα παραπάνω υπολογίζεται η επαγωγική αντίδραση του στάτη από τη σχέση:

$$\begin{aligned}
X_{SL} &= 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_1 \cdot L \cdot \frac{W_i^2}{p_1 \cdot q} \cdot (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{er}) \\
&= 2 \cdot 1,126 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,109 \cdot \frac{276^2}{2 \cdot 3} \cdot (1,67 + 0,908 + 0,4675) \\
&= 2,97\Omega
\end{aligned}$$

Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα (δεν είναι ανοιγμένη στο στάτη) δίνεται από τη σχέση:

$$X_{be} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_X + \lambda_{dr} + \lambda_{er})$$

, όπου

$$\lambda_r = 0,66 + \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot d_{SL}} + \frac{h_{or}}{b_{or}} = 0,66 + \frac{2 \cdot 15,43}{3 \cdot 5,61} + \frac{0,5}{1,5} = 2,823$$

(Θα πρέπει να διευκρινιστεί εάν ο παραπάνω τύπος ισχύει για δρομείς με αγωγούς ορθογώνιας διατομής.)

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} \cdot \left(\frac{N_r}{6 \cdot P}\right)^2$$

Ο συντελεστής  $\gamma_{dr}$  δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{dr} = 9 \cdot \left(\frac{6 \cdot P}{N_r}\right)^2 \cdot 10^{-2} = 1,653 \cdot 10^{-2}$$

Άρα:

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} \cdot \left(\frac{N_r}{6 \cdot P}\right)^2 = \frac{0,9 \cdot 10,3 \cdot 1,653 \cdot 10^{-2}}{1,35 \cdot 0,35} \cdot \left(\frac{28}{6 \cdot 2}\right)^2 = 1,763$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τον συντελεστή  $\lambda_{er}$  από τη σχέση:

$$\lambda_{er} = \frac{2,3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r}\right)} \cdot \log \left[ \frac{4,7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a} \right]$$

Στην παραπάνω σχέση το  $D_{er} = 0,08895m$  και το  $b$  (το βάθος του δακτυλίου βραχυκύκλωσης) είναι ίσο με:

$$b = h_r + h_{or} + d_{SL} = 15,43 + 0,5 + 5,61 = 21,54mm$$

Το  $a$  είναι το πλάτος του δακτυλίου βραχυκύκλωσης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{A_{er}}{b} = \frac{242,66 \text{ mm}^2}{21,54 \text{ mm}} = 11,26 \text{ mm}$$

Άρα:

$$\begin{aligned} \lambda_{er} &= \frac{2,3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r}\right)} \cdot \log\left[\frac{4,7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a}\right] \\ &= \frac{2,3 \cdot (88,95 - 21,54)}{28 \cdot 109 \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{28}\right)} \cdot \log\left[\frac{4,7 \cdot (88,95 - 21,54)}{21,54 + 2 \cdot 11,26}\right] = 0,22 \end{aligned}$$

Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε τον συντελεστή επιδερμικού φαινομένου  $K_X$  (skin effect coefficient for leakage reactance) από την σχέση:

$$K_x = \frac{3 \cdot [\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)]}{2 \cdot \xi \cdot [\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)]} = 0,949$$

Στην παραπάνω σχέση το  $\xi=1,21$ . Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι ίση με:

$$\begin{aligned} X_{be} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 0,109 \cdot (2,823 \cdot 0,949 + 1,763 + 0,22) \\ &= 2 \cdot 10^{-4} \Omega \end{aligned}$$

Η ανοιγμένη στο στάτη επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι:

$$X_2 = 4 \cdot m \cdot \frac{(W_1 \cdot K_{w1})^2}{N_r} \cdot X_{be} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(276 \cdot 0,96)^2}{28} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \Omega = 6,01 \Omega$$

Οι παραπάνω τιμές αφορούν ακινητοποιημένο δρομέα. Για ονομαστική ταχύτητα οι τιμές διαφοροποιούνται λίγο, κυρίως λόγω εξάλειψης του επιδερμικού φαινομένου. Μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά.

Απομένει ο υπολογισμός της αντίδρασης μαγνήτισης από τη σχέση:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{ph}}{I_\mu}\right)^2 - R_s^2} - X_{sl} = \sqrt{\left(\frac{230}{2,18}\right)^2 - 2,14^2} - 2,97 = 102,51 \Omega$$

## 4.8 Απώλειες και βαθμός απόδοσης

Το επόμενο βήμα της μελέτης περιλαμβάνει τον υπολογισμό των απωλειών του κινητήρα καθώς και του βαθμού απόδοσης. Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα υπολογίζονται από την σχέση:

$$P_{\alpha\pi} = P_{cu} + P_{Al} + P_{fe} + P_{MHX} + P_{KAT}$$

, όπου  $P_{Al}$  είναι οι απώλειες στον δρομέα του οποίου οι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο. Αναλυτικά:

- Απώλειες χαλκού στον στάτη:

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{ov}^2 \cdot R_s = 3 \cdot 6,1^2 \cdot 2,14W = 239W$$

- Απώλειες στον δρομέα:

$$P_{Al} = 3 \cdot I_{rn}^2 \cdot R_r = 3 \cdot K_f^2 \cdot I_n^2 \cdot R_r = 3 \cdot 0,856^2 \cdot 6,1^2 \cdot 2,09 = 114W$$

Οι μηχανικές απώλειες υπολογίζονται προσεγγιστικά από την εμπειρική σχέση:

$$P_{MHX} = 0,008 \cdot P_{ov} = 0,008 \cdot 3000W = 24W$$

Οι κατανεμημένες απώλειες υπολογίζονται και αυτές εμπειρικά από τη σχέση:

$$P_{KAT} = 0,01 \cdot 3000W = 30W$$

Οι απώλειες σιδήρου εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στον στάτη, επειδή στον δρομέα η συχνότητα του ρεύματος είναι πολύ μικρή. Οι απώλειες σιδήρου στον στάτη χωρίζονται σε απώλειες στα «δόντια» (ανάμεσα στα λούκια)  $p_{tl}$  (stator teeth fundamental losses) και στο πυρήνα που βρίσκεται πίσω (πάνω) από τα λούκια  $p_{yl}$  (back iron losses – yoke).

Οι απώλειες στα δόντια υπολογίζονται από τη σχέση:

$$p_{t1} = K_t \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts}^{1,7} \cdot G_{t1}$$

, όπου  $p_{10} = 2 - 3W/kg$  και  $K_t$  αποτελεί έναν συντελεστή που εξαρτάται από την ποιότητα του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα. Η παράμετρος  $G_{tl}$  είναι το βάρος των δοντιών του πυρήνα (stator tooth weight) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G_{t1} = \gamma_{iron} \cdot N_s \cdot b_{ts} \cdot (h_s + h_w + h_{os}) \cdot L \cdot K_{Fe}$$

$$\rightarrow G_{t1} = 7800 \cdot 36 \cdot 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot (21,5 + 1 + 0,5) \cdot 10^{-3} \cdot 0,109 \cdot 0,96 = 2,568kgr$$

$$p_{t1} = K_t \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts}^{1,7} \cdot G_{t1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,55^{1,7} \cdot 2,568 W = 27,5W$$

Οι απώλειες στον υπόλοιπο πυρήνα δίνονται από τη σχέση:

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{cs}^{1,7} \cdot G_{y1}$$

Όπου:

$$\begin{aligned} G_{y1} &= \gamma_{iron} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [D_{out}^2 - (D_{out} - 2 \cdot h_{cs})^2] \cdot L \cdot K_{Fe} \\ \rightarrow G_{y1} &= 7800 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [0,164^2 - (0,164 - 2 \cdot 0,0122)^2] \cdot 0,109 \cdot 0,96 \rightarrow G_{y1} = 4,758W \end{aligned}$$

Επομένως, οι απώλειες στον υπόλοιπο πυρήνα θα είναι:

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{cs}^{1,7} \cdot G_{y1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot 1,5^{1,7} \cdot 4,758 W = 48,34W$$

Οι συνολικές απώλειες σιδήρου θα είναι ίσες με:

$$P_{fe} = 27,5W + 48,34W = 75,84W$$

Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα θα είναι:

$$P_{\alpha\pi} = P_{cu} + P_{Al} + P_{fe} + P_{MHX} + P_{KAT} = 239 + 114 + 24 + 30 + 75,84 W = 482,84W$$

Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα θα είναι:

$$\eta = \frac{3000W}{3000 + 484,84W} \cdot 100\% = 86\%$$

## 4.9 Υπολογισμός χαρακτηριστικών λειτουργίας

Το ρεύμα του κινητήρα χωρίς φορτίο (το ενεργό, δεν συμπεριλαμβάνεται το ρεύμα μαγνήτισης) είναι ίσο με:

$$I_0 = \frac{P_{fe} + P_{MHX} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot R_s}{3 \cdot V_{ph}} = \frac{75,84 + 24 + 3 \cdot 2,18^2 \cdot 2,14}{3 \cdot 230} = 0,19A$$

Η ολίσθηση υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_{Al} = s \cdot P_{AG} \rightarrow s = \frac{P_{Al}}{P_{AG}} = \frac{114W}{3000 + 114 + 24 + 30W} = 0,036 = 3,6\%$$

Η ονομαστική ροπή είναι ίση με:

$$T_n = \frac{3000W}{2\pi \cdot \frac{50}{2} (1 - 0,036)} = \frac{3000}{151,34} = 19,8Nm$$

Η ροπή ανατροπής υπολογίζεται από την σχέση:

$$T_{bk} = \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}}$$

Όπου:

$$C_1 = 1 + \frac{X_{sl}}{X_m} = 1 + \frac{2,97}{102,51} = 1,03$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των παραμέτρων, η ροπή ανατροπής είναι ίση με:

$$T_{bk} = \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}} = 38,9Nm$$

Το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα είναι ίσο με:

$$I_{LR} = \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2}} = \frac{230}{\sqrt{(2,14 + 2,09)^2 + (3,21 + 6,01)^2}} = 22,7A$$

Η ροπή εκκίνησης είναι ίση με:

$$T_{LR} = \frac{3 \cdot I_{LR}^2 \cdot R_r}{\omega_s} = \frac{3 \cdot 22,7^2 \cdot 2,09}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60}} = 20,5Nm$$

Τέλος, ο συντελεστής ισχύος της μηχανής δίνεται από την σχέση:

$$\cos\varphi = \frac{P_n}{3 \cdot V_{ph} \cdot I_n \cdot \eta} = \frac{3000}{3 \cdot 230 \cdot 6,1 \cdot 0,86} = 0,82$$



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Stephen J. Chapman “Ηλεκτρικές μηχανές”
2. Παντελής Μαλατέστας “Ηλεκτρικές Μηχανές”
3. Πάννη Ξυπέρα “Ηλεκτρικές Μηχανές”
4. Στέλιος Αντωνόπουλος “Τυλίγματα Ηλεκτρικών Μηχανών”
5. International Standar IEC “Rotating electrical machines”
6. Ion Boldea & Syed A. Nasar “The Induction Machines Desing Handbook”