

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΡΙΘΜΟΣ 1364**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ  
ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΠΟΛΩΝ ΙΣΧΥΟΣ 15KW**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:**

**ΑΡΓΥΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΜΠΟΡΛΑΣ ΜΑΡΙΟΣ**

**ΣΤΑΘΕΛΑΚΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:**

**ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ-ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ ΔΕΚΕΜΒΡΗΣ 2013**



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία ολοκληρώθηκε με την αμέριστη βοήθεια του καθηγητή κυρίου Χαραλαμπίκου Βασίλειο Νεκτάριο τον οποίο και ευχαριστούμε ιδιαίτερα.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη ..... 5

Πρόλογος .....6

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Αρχή λειτουργίας επαγωγικού κινητήρα .....12

1.2 Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο ..... 13

1.2.1 Εφαρμογές ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών ..... 15

1.2.2 Η ανάπτυξη της επαγόμενης ροπής στους επαγωγικούς κινητήρες .....15

1.2.3 Εκκίνηση επαγωγικού κινητήρα .....16

1.3 Μέρη που αποτελείται ο επαγωγικός κινητήρας .....17

1.4 Είδη προστασίας των ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών .....20

1.5 Απώλειες επαγωγικού κινητήρα .....20

1.6 Παραδοχές για τη μελέτη του μαγνητικού πεδίου ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού.....22

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μελέτη τριφασικού επαγωγικού κινητήρα τεσσάρων πόλων ισχύος 15 kw .....24

2.1 Διαστασολόγηση κινητήρα .....24

2.2 Τυλίγματα στάτη .....27

2.2.1. Υπολογισμός διαστάσεων των αυλακιών του στάτη .....32

2.3. Δρομέας .....37

2.3.1 Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα .....39

2.3.2 Υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα .....40

2.4 Υπολογισμός ρεύματος μαγνήτισης ..... 41

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος .....43

3.2 Υπολογισμός επαγωγικών αντιδράσεων .....45

3.3 Υπολογισμός  $V_{TH}$  και  $R_{TH}$  .....49

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Απώλειες και βαθμός απόδοσης.....51

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

5.1. Υπολογισμός χαρακτηριστικών λειτουργίας .....53

5.2 Χαρακτηριστική ροπής- ταχύτητας .....54

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

Συμπεράσματα .....59

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....60

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....62

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ .....62

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή πραγματοποιείται η μελέτη ενός τετραπολικού ασύγχρονου κινητήρα με τα εξής χαρακτηριστικά : Ονομαστική Ισχύς: 15kW, ονομαστική ταχύτητα: 1471rpm, συντελεστής ισχύος: 0.847 και βαθμός απόδοσης: 0.91, ενώ ο τρόπος συνδεσμολογίας του κινητήρα θα είναι σε τρίγωνο.

Σκοπός της μελέτης είναι η σχεδίαση του κινητήρα με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σε θεωρητικό επίπεδο (υπολογιστικά).

Η πτυχιακή περιλαμβάνει 6 κεφάλαια. Το πρώτο περιλαμβάνει την ιστορική εξέλιξη των ηλεκτρικών μηχανών, την αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων μηχανών καθώς και αναλυτική περιγραφή των μερών που αποτελείται ένας ασύγχρονος κινητήρας. Το δεύτερο περιλαμβάνει την μελέτη και σχεδίαση ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σε θεωρητικό επίπεδο. Συγκεκριμένα γίνεται αρχικά η διαστασιολόγηση του κινητήρα, και στην συνέχεια ο υπολογισμός των τυλιγμάτων του στάτη όπως ο αριθμός των σπειρών ανά φάση και ο αριθμός αγωγών ανά αυλάκι του στάτη, η επιλογή της μορφής του δρομέα και ο υπολογισμός του αριθμού των αγωγών του, ο υπολογισμός του ρεύματος μαγνήτισης. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ο υπολογισμός του ισοδύναμου κυκλώματος του κινητήρα όπου περιλαμβάνεται η εύρεση της αντίστασης του στάτη και του δρομέα ,ο υπολογισμός των επαγωγικών αντιδράσεων και ο υπολογισμός τάσεως και αντίστασης κατά Thevenin. Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται ο υπολογισμός των απωλειών και ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα. Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών λειτουργίας του κινητήρα (ολίσθηση, ονομαστική ροπή, ροπή ανατροπής, ροπή εκκίνησης και συντελεστή ισχύος) και την χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας.

Τέλος το έκτο κεφάλαιο περιέχει τα συμπεράσματα από την μελέτη και την σχεδίαση του επαγωγικού κινητήρα .

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

## ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Ηλεκτρική μηχανή (electric machine) είναι η συσκευή που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Μια τέτοια συσκευή, όταν χρησιμοποιείται για τη μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ονομάζεται γεννήτρια (generator). Όταν η συσκευή μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ονομάζεται κινητήρας (motor).

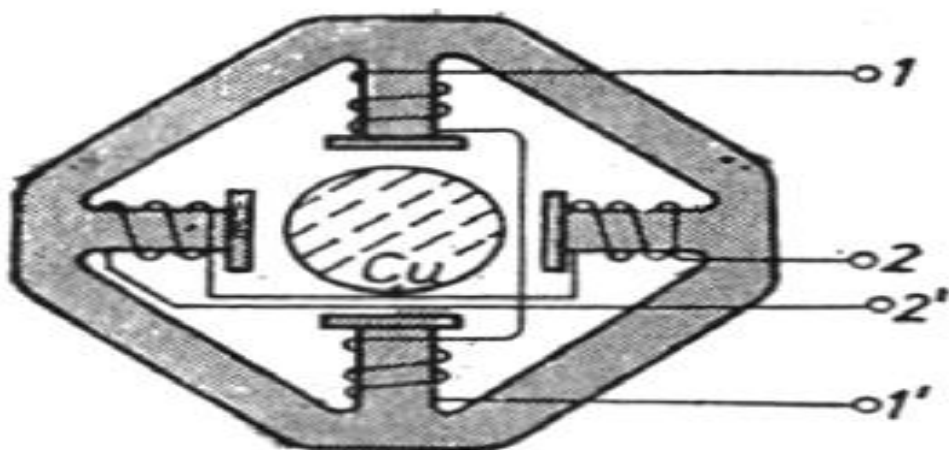
Από τα διάφορα είδη ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος, **ο τριφασικός ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας (induction motor)**, χρησιμοποιείται ευρύτατα στις βιομηχανικές εφαρμογές. Ενδεικτικό της καθολικής χρήσης της μηχανής αυτής είναι ότι, οι επαγωγικοί κινητήρες απορροφούν το 60% περίπου, της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ως κινητήρες, εξαιτίας των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν όταν λειτουργούν ως γεννήτριες. Για το λόγο αυτό οι επαγωγικές μηχανές αναφέρονται ως επαγωγικοί κινητήρες.

Η αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων κινητήρων διατυπώθηκε από τον N. Tesla στα τέλη της δεκαετίας του 1880. Επαγωγικοί κινητήρες με μορφή αντίστοιχη της σημερινής, ήταν εμπορικά διαθέσιμοι από το 1896. Από τότε έως το 1970, οι βελτιώσεις στην ποιότητα των υλικών κατασκευής, στις τεχνικές χύτευσης και στη μόνωση των τυλιγμάτων, επέτρεψε τη δραστική μείωση του μεγέθους και του κόστους κατασκευής των επαγωγικών κινητήρων.

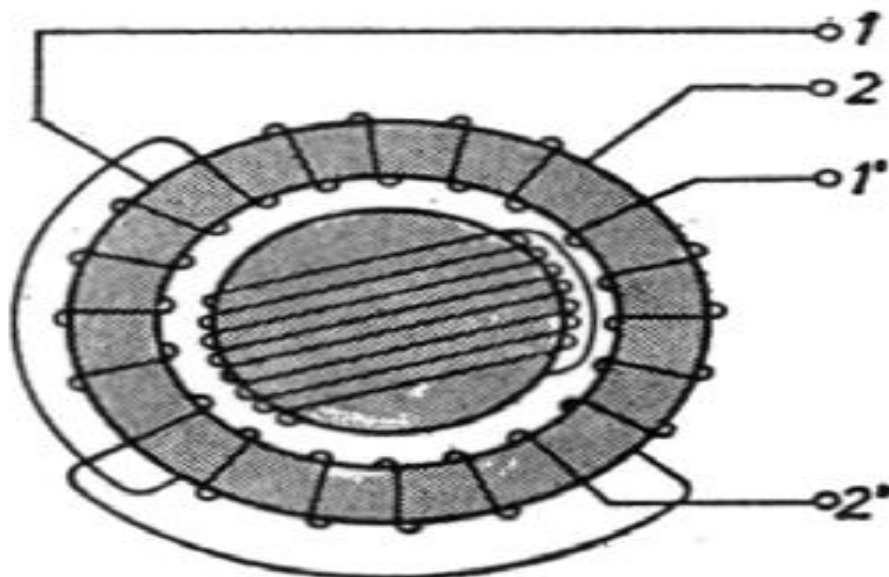
Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ένας σημερινός ασύγχρονος κινητήρας των 100hp, έχει τις ίδιες διαστάσεις με ένα κινητήρα 7.5hp του 1897.

Η μείωση στις διαστάσεις των επαγωγικών κινητήρων δεν έχει συνοδευτεί από ουσιαστική βελτίωση του βαθμού απόδοσης, έως την πετρελαϊκή κρίση του 1973, εξαιτίας του μικρού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως, στη συνέχεια, όλοι οι κατασκευαστές ανέπτυξαν *επαγωγικούς κινητήρες με το χαρακτηριστικό υψηλής απόδοσης (high efficiency induction motors)*. Οι κινητήρες αυτοί, αν και έχουν μεγαλύτερο κόστος από τους τυπικούς επαγωγικούς κινητήρες, αποκτούν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς.

Ο Faraday ανακάλυψε το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής περίπου το 1831 και ο Maxwell διατύπωσε τις εξισώσεις του ηλεκτρισμού το 1860. Οι συνθήκες λοιπόν ήταν ώριμες για την εφεύρεση της μηχανής επαγωγής, που οφείλεται σε δύο ανθρώπους που δούλεψαν παράλληλα. Αυτοί είναι ο Galileo Ferraris (1885) και ο Nicola Tesla (1886). Οι μηχανές επαγωγής τους φαίνονται στα παρακάτω σχήματα. (σχήμα 1, σχήμα 2)



Σχήμα 1. Κινητήρας επαγωγής του Ferraris (1885)



Σχήμα 2. Κινητήρας επαγωγής του Tesla (1887)

Και οι δύο μηχανές τροφοδοτούνταν από διφασική εναλλασσόμενη πηγή τάσης και γι' αυτό υπάρχουν τα διφασικά συγκεντρωμένα τυλίγματα (1-1' και 2-2') στο σιδηρομαγνητικό πυρήνα του στάτη.

Στην κατασκευή του Ferraris ο δρομέας ήταν κατασκευασμένος από έναν χάλκινο κύλινδρο, ενώ στου Tesla ο δρομέας ήταν ένας σιδηρομαγνητικός κύλινδρος με βραχυκυκλωμένο τυλίγμα. Αν και οι σύγχρονοι κινητήρες επαγωγής έχουν πιο περίτεχνη τοπολογία και η απόδοσή τους είναι πολύ καλύτερη, η βασική αρχή έμεινε κατά βάση η ίδια.

Δηλαδή, πολυφασικό εναλλασσόμενο τύλιγμα στο στάτη δημιουργεί κινούμενο (στρεφόμενο) πεδίο που επάγει τάσεις, οι οποίες με τη σειρά τους παράγουν ρεύματα στο βραχυκλωμένο ή κλειστό τύλιγμα του δρομέα. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του πεδίου του στάτη και των επαγόμενων στο δρομέα ρευμάτων παράγει ροπή και κάνει τον κινητήρα επαγωγής να λειτουργεί. Αν η ροπή σε μηδενική ταχύτητα δρομέα είναι μη μηδενική, ο κινητήρας επαγωγής μπορεί να ξεκινήσει αυτόνομα. Το τριφασικό εναλλασσόμενο δίκτυο, ικανό για τη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις ώστε να τροφοδοτεί κινητήρες επαγωγής και άλλους καταναλωτές, προτάθηκε από τον Dolivo-Dobronosky γύρω στα 1880.

Το 1889, ο Dolivo-Dobronosky εφηύρε τον κινητήρα επαγωγής με τυλιγμένο δρομέα και ακόλουθα το δρομέα κλωβού με μια τοπολογία πολύ παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται σήμερα. Επίσης εφηύρε το δρομέα διπλού κλωβού.

Γύρω στα **1900 ο κινητήρας επαγωγής ήταν έτοιμος για ευρεία βιομηχανική χρήση**. Δεν αποτελεί έκπληξη λοιπόν ότι πριν το 1910 οι αμαξοστοιχίες, με το που κινούνταν με κινητήρες επαγωγής, έφταναν τα 200 km/h.

Ωστόσο, τουλάχιστον για τις μεταφορές, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος κατέλαβαν το μεγαλύτερο μερίδιο μέχρι το 1985, οπότε και αναπτύχθηκαν inverter τεχνολογίας IGBT, PWM. Αυτό επέτρεψε την κατασκευή μετατροπέων, που οδήγησαν στη δυναμική επιστροφή των κινητήρων επαγωγής σε εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας σε όλη τη βιομηχανία.

Κυρίως λόγω των ηλεκτρονικών ισχύος και του ψηφιακού ελέγχου, ο κινητήρας επαγωγής, παρά την πολύχρονη παρουσία του στη βιομηχανία, μπορεί να θεωρηθεί αντικείμενο υψηλής και σύγχρονης τεχνολογίας με ευρεία χρήση στην ηλεκτροκίνηση.

Η ευημερία μιας κοινωνίας σχετίζεται άμεσα με την ικανότητα να παράγει αγαθά και υπηρεσίες. Η παραγωγή αγαθών και υπηρεσιών σχετίζεται έντονα με τη χρήση της ενέργειας με έξυπνο τρόπο.

Η ενέργεια διατίθεται ως επί το πλείστον σε λίγες μορφές : θερμική, μηχανική και ηλεκτρική. Η ηλεκτρική ενέργεια, μετρούμενη σε kwh, αντιπροσωπεύει, με ανοδική τάση μάλιστα, περισσότερο του 30% της συνολικά χρησιμοποιούμενης ενέργειας. Ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται άμεσα για την παραγωγή θερμότητας ή για φωτισμό. Το μεγαλύτερο μέρος της, όμως, μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια με τη βοήθεια ηλεκτρικών κινητήρων.

Μεταξύ των ηλεκτρικών κινητήρων, οι κινητήρες επαγωγής είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται περισσότερο τόσο σε οικιακές συσκευές όσο και στη βιομηχανία.

Αυτό συμβαίνει διότι παραδοσιακά οι βιομηχανικοί κινητήρες επαγωγής τροφοδοτούνται απευθείας από το τριφασικό εναλλασσόμενο δίκτυο μέσω απλών διακοπών ισχύος και επαρκούς προστασίας. Επιπλέον, κινητήρες επαγωγής μικρής ισχύος, που συναντώνται σε οικιακές συσκευές, τροφοδοτούνται απευθείας από το μονοφασικό δίκτυο. Ακόμη είναι κατασκευαστικά στιβαροί και απλοί εξασφαλίζοντας περιορισμένο κόστος κατασκευής. Τα βολικά αυτά χαρακτηριστικά αυτών των κινητήρων επαγωγής συνέβαλαν στην καθιέρωσή τους. Σήμερα, στις ανεπτυγμένες χώρες αντιστοιχούν περισσότερα από 3 kw ηλεκτρικών κινητήρων ανά άτομο, και η πλειονότητά τους είναι κινητήρες επαγωγής.



Παρά το γεγονός ότι ακόμη οι περισσότεροι κινητήρες επαγωγής τροφοδοτούνται απευθείας από το δίκτυο, περίπου το 10% πλέον χρησιμοποιεί μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος για τον έλεγχο της ταχύτητας. Κινητήρες επαγωγής με μετατροπείς μεταβλητής ταχύτητας χρησιμοποιούνται κυρίως στις μεταφορές, σε αντλίες και συμπιεστές, σε ανεμιστήρες, στη ρομποτική, σε υβριδικά ή ηλεκτρικά οχήματα. Τέλος προβλέπεται ότι στην επόμενη δεκαετία, το 50% των κινητήρων επαγωγής θα οδηγείται πλήρως από ηλεκτρονικά ισχύος. Το ποσοστό αυτό θα φτάνει το 60-70% στις αναπτυγμένες χώρες.

## **ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΠΟΥ ΣΗΜΑΔΕΨΑΝ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ:**

- Καλύτερα μονωτικά υλικά και συστήματα ψύξης.
- Όλο και καλύτερα αναλυτικά μοντέλα μόνιμης κατάστασης.
- Φθινοί μετατροπείς IGBT PWM χαμηλών απωλειών και υψηλής πυκνότητας ισχύος.
- Ντετερμινιστές και στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης του σχεδιασμού.
- Νέες μέθοδοι για κατασκευή και δοκιμή των μηχανών επαγωγής.
- Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και σε συνδυασμό με κυκλωματικά μοντέλα για εκτενή ανάλυση μηχανών με κρίσιμη μαγνητική και ηλεκτρική φόρτιση.

## **ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΤΟΥ ΔΙΑΚΕΝΟΥ ΚΑΙ ΚΛΕΙΣΙΜΟ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΩΣΕΩΝ ΑΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ**

Η αύξηση του μήκους του διακένου ελαττώνει τις διακυμάνσεις του πεδίου στην επιφάνεια του δρομέα, αλλά επίσης αυξάνει το ρεύμα μαγνήτισης και ταυτόχρονα ελαττώνει το συντελεστή ισχύος. Σε ασύγχρονες μηχανές δρομέα, το μήκος του διακένου παίζει σημαντικό ρόλο όταν μελετάμε τις αρμονικές του πεδίου στην επιφάνεια του δρομέα. Εάν το μήκος του διακένου αυξηθεί, η κατανομή του πεδίου θα εξομαλυνθεί στην επιφάνεια του δρομέα. Ωστόσο, ένα ακόμα μεγαλύτερο μήκος διακένου θα προκαλέσει αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης της μηχανής και κατά συνέπεια αύξηση των απωλειών χαλκού στο στάτη. Το ελάχιστο των απωλειών βρίσκεται μεταξύ της αύξησης των απωλειών χαλκού του στάτη και ελάττωσης των απωλειών στο δρομέα από ρεύματα αυτεπαγωγής των αρμονικών. Η κατανομή του πεδίου μπορεί να εξομαλυνθεί κατασκευάζοντας όσο το δυνατό μικρότερο το άνοιγμα των αυλάκωσης του στάτη. Το ελάχιστο μέγεθος ενός τυποποιημένου ανοίγματος αυλάκωσης καθορίζεται κυρίως από τα κριτήρια που θέτει ο κατασκευαστής για τα τυλίγματα. Άλλο όριο είναι η τιμή της επαγωγιμότητας σκέδασης, επειδή όσο πιο στενό είναι το άνοιγμα της αυλάκωσης, τόσο την αυξάνει.

Επιπλέον η μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανοίγματος της αυλάκωσης του στάτη καθώς και η χρήση ημι-μαγνητικών σφηνών, μπορούν να αξιοποιηθούν ώστε να ελαττωθούν οι αρμονικές μαγνητικής διαπερατότητας στη ροή του διακένου. Διαγράμματα της ροής σε μηχανές με ανοικτή αυλάκωση και με μηχανή με τροποποιημένο άνοιγμα παρουσιάστηκαν από τους **Pyrhonen** και **Kurronen (1991)**. Στο μοντέλο αυτό υπήρχαν, σε κάθε δόντι του δρομέα, πολύ

μικρά εξογκώματα από τη μεριά του διακένου. Έχειδειχθεί ότι η κατανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής είναι πιο ομοιόμορφη στο τροποποιημένο μοντέλο σε σχέση με το παραδοσιακό. Τα εξογκώματα οδηγούν το πεδίο γύρω από την ανοικτή αυλάκωση και προκαλούν ελάττωση της βύθισης του πεδίου. Βέβαια η δημιουργία αυτών των εξογκωμάτων είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί κατασκευαστικά.

Ο πλέον αποτελεσματικός τρόπος να μειωθούν οι μαγνητικές αρμονικές είναι να κλείσουν οι αυλακώσεις με ημι-μαγνητικές σφήνες. Ο σκοπός της σφήνας είναι να οδηγήσει τη ροή κάτω από το άνοιγμα της αυλάκωσης. Η ημι-μαγνητική σφήνα συνήθως κατασκευάζεται από υλικά με μικρή σχετική μαγνητική διαπερατότητα. Ο συντελεστής ισχύος της μηχανής και οι απώλειες λόγω των αρμονικών μπορούν να βελτιωθούν με την επιλογή τόσο του κατάλληλου υλικού για την κατασκευή της σφήνας, όσο και από το γεωμετρικό της σχήμα. Αύξηση της μαγνητικής διαπερατότητας της σφήνας εξομαλύνει το πεδίο, αλλά επίσης αυξάνει το διάρρευμα. Οι **Pyrhonen** και **Kurronen (1991)** έχουν δείξει την επίδραση των σφηνών σε σχέση με τις παραδοσιακές μηχανές.

## ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Οι βασικές ιδέες που διέπουν τη λειτουργία των επαγωγικών κινητήρων αναπτύχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1880 από τον Nicola Tesla, ο οποίος απέκτησε την πατέντα αυτής της ιδέας του το 1888. Εκείνο τον καιρό παρουσίασε μια δημοσίευση στο Αμερικανικό Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων Μηχανικών (American Institute of Electrical Engineers - AIEE, προπομπό της σημερινής IEEE) στο οποίο περιέγραφε τις βασικές αρχές των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα μαζί με τις απόψεις του για δυο ακόμη σημαντικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, το σύγχρονο κινητήρα και τον κινητήρα μαγνητικής αντίστασης.

Αν και η βασική ιδέα για τον επαγωγικό κινητήρα περιγράφηκε στα 1888, ο ίδιος ο κινητήρας δεν εξελίχθηκε ως τελική μορφή. Αρχικά, υπήρξε μια περίοδος γρήγορης εξέλιξης που ακολουθήθηκε από μια σειρά καθυστερήσεων και από εξελικτικές βελτιώσεις που συνεχίζονται ακόμη και σήμερα.

Ο επαγωγικός κινητήρας θεωρούνταν αντικειμενικά μοντέρνος μεταξύ του 1888 και του 1895. Εκείνη την περίοδο οι πηγές τάσης δυο και τριών φάσεων είχαν αναπτυχθεί ώστε να μπορεί να παραχθεί το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής. Ακόμη τα διανεμημένα τυλίγματα είχαν αναπτυχθεί και είχε εισαχθεί ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού. Στα 1896 ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας με πλήρεις τις λειτουργίες του και κοινώς αναγνωρισμένος ήταν εμπορικά διαθέσιμος.

Στις μέρες μας έχουν αναπτυχθεί νέες αλυσίδες παραγωγής επαγωγικών κινητήρων υψηλής απόδοσης απ' όλους σχεδόν τους κατασκευαστές. Αυτοί οι νέοι κινητήρες κερδίζουν συνέχεια όλο και μεγαλύτερο μέρος της αγοράς των επαγωγικών κινητήρων. Με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης των κινητήρων αυτών σε σχέση με τους παραδοσιακούς κινητήρες τυπικής απόδοσης χρησιμοποιούνται αρκετές μέθοδοι κατασκευής. Ανάμεσα σ' αυτές είναι:

- Η χρήση μεγαλύτερης ποσότητας χαλκού στα τυλίγματα του στάτη με σκοπό τη μείωση των απωλειών χαλκού.

- Η αύξηση του μήκους του πυρήνα στο στάτη και στο δρομέα με σκοπό την αύξηση της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο της μηχανής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του μαγνητικού κορεσμού της μηχανής και τελικά τη μείωση των απωλειών πυρήνα.
- Η χρήση περισσότερου χάλυβα στο στάτη της μηχανής, πράγμα που επιτρέπει τη μεταφορά μεγαλύτερης ποσότητας θερμότητας από τον κινητήρα προς το περιβάλλον ελαττώνοντας τη θερμοκρασία λειτουργίας. Μετά απ' αυτή την εξέλιξη ο ανεμιστήρας του δρομέα ξανασχεδιάστηκε, ώστε να μειωθούν οι απώλειες εξερισμού.
- Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του στάτη είναι από ειδικό υψηλής ποιότητας ηλεκτρικό χάλυβα, ο οποίος παρουσιάζει μικρές απώλειες υστέρησης.
- Ο χάλυβας της μηχανής παράγεται σε εξαιρετικά μικρά πάχη (δηλαδή τα δυναμοελάσματα βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους) και διαθέτει μεγάλη εσωτερική ειδική αντίσταση. Οι δυο αυτές ιδιότητες τείνουν να μειώσουν τις απώλειες των δινορρευμάτων.
- Η κατασκευή του κινητήρα γίνεται με μεγάλη προσοχή, ώστε το διάκενο να είναι ομοιόμορφο και να μειώνονται έτσι οι κατανεμημένες απώλειες του φορτίου.

Η NEMA έχει υιοθετήσει μια τυποποιημένη μέθοδο που βοηθά στη σύγκριση της απόδοσης των κινητήρων. Αυτή βασίζεται στη Μέθοδο B της τυποποίησης 112 της IEEE που ονομάζεται "Διαδικασία Δοκιμής Πολυφασικών Επαγωγικών Κινητήρων και Γεννητριών " ( "Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators"). Επίσης, η NEMA έχει εισάγει μια νέα προδιαγραφή που λέγεται ονομαστική απόδοση (nominal efficiency) και θ' αναγράφεται στις πινακίδες των μελλοντικών κινητήρων κλάσης A, B και C. Η ονομαστική απόδοση προσδιορίζει τη μέση απόδοση ενός μεγάλου αριθμού κινητήρων συγκεκριμένων προδιαγραφών και εγγυάται κάποια ελάχιστη απόδοση για όλους αυτούς τους κινητήρες.

Άλλοι οργανισμοί τυποποίησης έχουν επίσης εκδώσει κανονισμούς για την απόδοση των επαγωγικών κινητήρων. Οι πιο σημαντικοί απ' αυτούς είναι ο Βρετανικός κανονισμός (**BS-269**), ο κανονισμός της IEC (IEC 34-2) και ο Ιαπωνικός κανονισμός (JEC-37). Όμως οι τεχνικές μέτρησης της απόδοσης, που περιγράφηκαν, είναι διαφορετικές για κάθε τυποποίηση και δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα για την ίδια μηχανή. Η τυποποίηση της NEMA (Μέθοδος B, IEEE- 112) είναι η πιο συντηρητική από τις τέσσερις μεθόδους μέτρησης της απόδοσης κι αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σύγκριση των κινητήρων που εξετάζονται σε διαφορετικά συστήματα. Αν εξετάζονται δυο κινητήρες με ονομαστική απόδοση 82,5%, από τους οποίους ο ένας αναλύθηκε με την τυποποίηση της NEMA και ο άλλος με την Ιαπωνική τυποποίηση, αυτός που αναλύθηκε με την τυποποίηση της NEMA, έχει στην πραγματικότητα μεγαλύτερη απόδοση. Τελικά, όταν συγκρίνονται δυο κινητήρες, είναι σημαντικό η σύγκριση για τις αποδόσεις να γίνεται στο ίδιο σύστημα τυποποίησης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Στους ασύγχρονους κινητήρες, ο δρομέας είναι ηλεκτρικά ανεξάρτητος από το στάτη και δεν τροφοδοτείται με ρεύμα από το δίκτυο. Στα τρία τυλίγματα του στάτη δίνουμε τριφασικό ρεύμα και δημιουργείται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που τέμνει τις σπείρες του δρομέα. Στο δρομέα αναπτύσσονται επαγωγικά ρεύματα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μαγνητικής δύναμης (LAPLACE) που περιστρέφει το δρομέα.

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. Βέβαια, η τελευταία αυτή τους ιδιότητα, δεν αποτελεί αποκλειστικό χαρακτηριστικό τους, μιας και η ανάπτυξη ρευμάτων και τάσεων, στο εσωτερικό της μηχανής, αποκλειστικά υπό εναλλασσόμενη μορφή, αποτελεί χαρακτηριστικό και των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Η ειδοποιός διαφορά όμως των μηχανών συνεχούς ρεύματος, από αυτές του εναλλασσόμενου, έγκειται στο γεγονός ότι οι πρώτες έχουν συνεχή έξοδο και είσοδο, λόγω του μηχανισμού μετατροπής των εσωτερικών εναλλασσόμενων τάσεών τους σε συνεχείς (μηχανές με συλλέκτη).

Στις ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος το τύλιγμα του οπλισμού (armature winding) βρίσκεται, σε αντίθεση με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος, σχεδόν πάντα τοποθετημένο στο στάτη, ενώ το τύλιγμα διέγερσης τοποθετείται στο δρομέα. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα μιας γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος επάγει τριφασικά εναλλασσόμενα ρεύματα στο τύλιγμα οπλισμού του στάτη της. Με ανάλογο τρόπο, αν το τύλιγμα οπλισμού του στάτη ενός κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος τροφοδοτηθεί με ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων, στο εσωτερικό του αναπτύσσεται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο επιδρώντας στο πεδίο του δρομέα παράγει ροπή στον άξονά του.

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις **σύγχρονες μηχανές** και τις **ασύγχρονες ή επαγωγικές μηχανές**. Η βασική διαφορά των δύο αυτών κατηγοριών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, έγκειται στον τρόπο παραγωγής του ρεύματος διεγέρσεώς τους.

Στις σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές το ρεύμα διέγερσης παράγεται από ανεξάρτητες πηγές συνεχούς ρεύματος. Αντίθετα στις ασύγχρονες το ρεύμα διέγερσης παράγεται επαγωγικά στα τυλίγματα διέγερσής τους (αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή). Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο, οι ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές αναφέρονται συχνά και ως **επαγωγικές**.

Όσον αφορά τις εφαρμογές των δύο παραπάνω κατηγοριών ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η συντριπτική πλειοψηφία των

εφαρμογών παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος παγκοσμίως, καλύπτεται με τη χρήση σύγχρονων γεννητριών. Αντίθετα οι ασύγχρονες μηχανές συναντώνται κυρίως ως ασύγχρονοι κινητήρες, με αποτέλεσμα να βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στις ηλεκτρικές κινήσεις, στις οποίες χρησιμοποιούνται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80%. Η λειτουργία των ασύγχρονων μηχανών ως γεννητριών είναι εφικτή, αλλά λόγω σημαντικών μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν σ' αυτή τους τη λειτουργία, η χρήση ασύγχρονων γεννητριών είναι σπάνια.

Η υπό μελέτη μηχανή ανήκει στην κατηγορία των ασύγχρονων ή επαγωγικών μηχανών και για την ακρίβεια είναι ένας επαγωγικός κινητήρας.

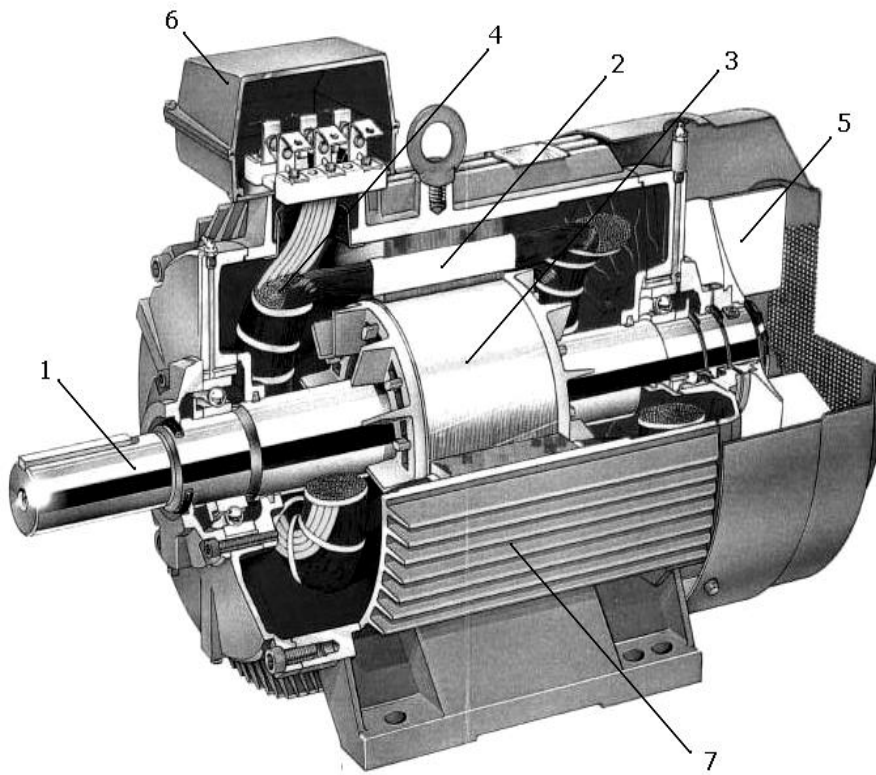
Ο ασύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας είναι ο πιο κοινός τύπος κινητήρα λόγω της απλής κατασκευής του και της ευκολίας που παρουσιάζει στη λειτουργία του, καθώς δεν έχει ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης αλλά οι τάσεις και τα ρεύματα επάγονται στη διέγερσή του σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή. 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).

## 1.2ΤΟ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Αν σε μια μηχανή υπάρχουν δυο μαγνητικά πεδία, τότε δημιουργείται ροπή η οποία θα τείνει να ευθυγραμμίσει τα δυο μαγνητικά πεδία. Αν το ένα μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από το στάτη μιας ηλεκτρικής μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος και η άλλη από το δρομέα της μηχανής αυτής, τότε η ροπή θα επάγεται στο δρομέα, κάτι που θα κάνει το δρομέα να περιστραφεί και να ευθυγραμμιστεί με το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Αν υπήρχε κάποιος τρόπος να περιστρέψουμε το μαγνητικό πεδίο του στάτη, τότε η επαγόμενη ροπή στο δρομέα θα τον έκανε να "κυνηγά" συνεχώς το μαγνητικό πεδίο του στάτη σε κυκλική κατεύθυνση. Αυτή, εν συντομία, είναι η βασική αρχή λειτουργίας όλων των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος. Δηλαδή, αν κάποιο τύλιγμα του οπλισμού της μηχανής τροφοδοτηθεί με ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων που έχουν το ίδιο πλάτος και διαφορά φάσης  $120^\circ$  μεταξύ τους, στο εσωτερικό της μηχανής θα αναπτυχθεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σταθερού πλάτους. Οι τρεις φάσεις του τυλίγματος οπλισμού μιας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος πρέπει να απέχουν  $120^\circ$  ηλεκτρικές μοίρες μεταξύ τους.

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' ότι 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 τη 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 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.



***Τριφασικός κινητήρας επαγωγής βραχυκυκλωμένου κλωβού:***

- (1) Άξονας
- (2) Στάτης
- (3) Δρομέας
- (4) Τύλιγμα στάτη
- (5) Φτερωτή ανεμισμού
- (6) Κιβώτιο σύνδεσης ακροδεκτών
- (7) Πλαίσιο

### 1.2.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Μια ασύγχρονη μηχανή κατά την αυτόνομη λειτουργία της ως γεννήτρια παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα σταθεροποίησης τάσης. Επειδή στερείται ξεχωριστού κυκλώματος διέγερσης, μια τέτοια γεννήτρια δεν μπορεί να παράγει άεργο ισχύ. Στην πραγματικότητα η ίδια καταναλώνει άεργο ισχύ και γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να συνδέεται σε κάποια εξωτερική πηγή άεργης ισχύος ώστε να διατηρείται το μαγνητικό πεδίο του στάτη της. Από την ίδια εξωτερική πηγή θα πρέπει να ρυθμίζεται και η τάση στα άκρα της.

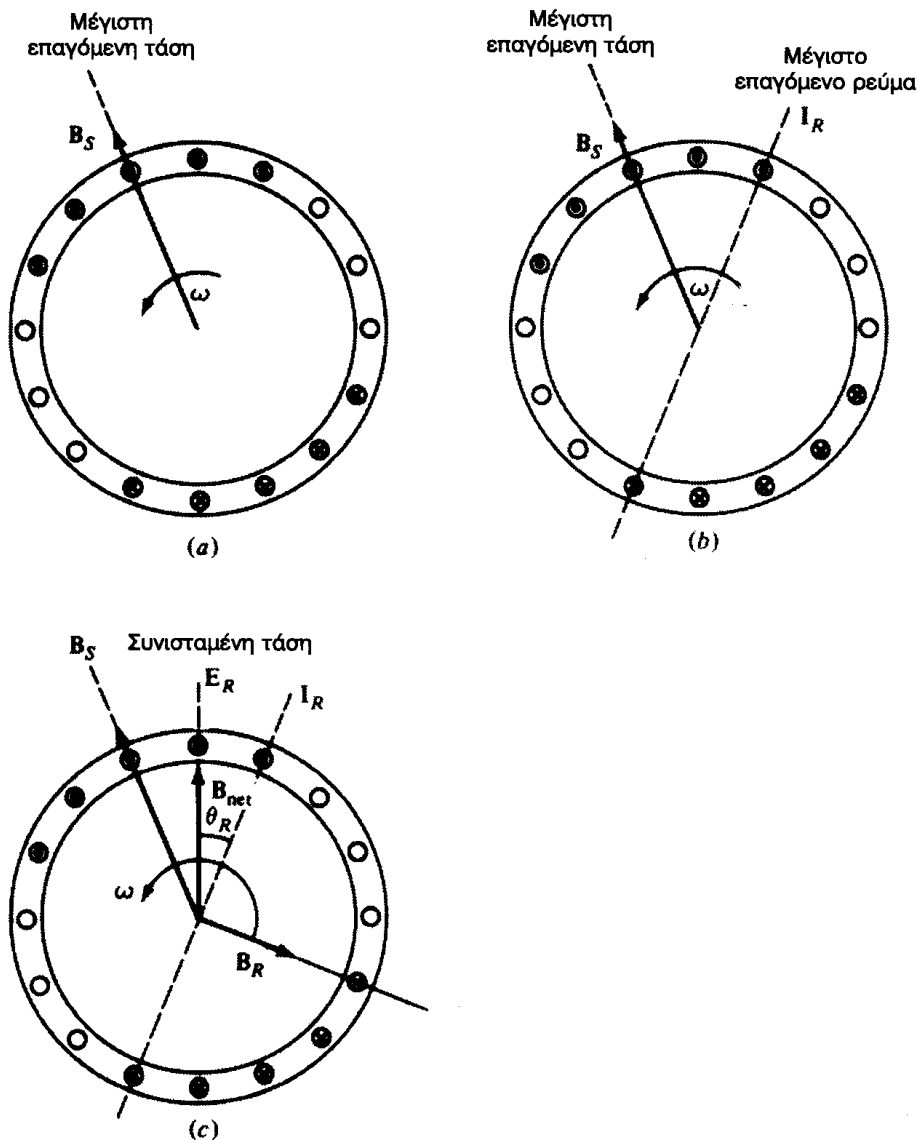
Το μοναδικό πλεονέκτημα μιας επαγωγικής γεννήτριας είναι η απλότητα της κατασκευής της, μιας και δεν απαιτείται ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης, ούτε και σταθερότητα στην ταχύτητα κίνησής της. Όσο μεγαλύτερη είναι η ροπή που εφαρμόζεται στον άξονά της, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ισχύς εξόδου της. Σ' αυτή την εφαρμοζόμενη από την κινητήριο μηχανή ροπή, καθορίζεται μία μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, πάνω από την οποία η γεννήτρια επιταχύνεται επικίνδυνα. Η μέγιστη αυτή ροπή ονομάζεται **ροπή ανατροπής**.

Λόγω της απλής κατασκευής και του μικρού μεγέθους τους ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος, οι ασύγχρονες γεννήτριες θεωρούνται καλή επιλογή για συστήματα ανεμόμυλων, για συστήματα ανάκτησης της θερμότητας και για άλλες παρόμοιες πηγές ισχύος που συνδέονται σε υπάρχοντα συστήματα. Σε τέτοιες εφαρμογές η διόρθωση του συντελεστή ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με πυκνωτές, ενώ η τάση εξόδου της γεννήτριας μπορεί να ελέγχεται από το εξωτερικό σύστημα ισχύος.

Οι επαγωγικές γεννήτριες είναι συνήθως μικρές μηχανές, ενώ τα συστήματα ελέγχου τους και η συντήρησή τους απαιτούν πολύ μικρό κόστος.

### 1.2.2 Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗΣ ΡΟΠΗΣ ΣΤΟΥΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε αναλυτικά το φαινόμενο της επαγωγής ροπής στον επαγωγικό κινητήρα, με τη βοήθεια του σχήματος που ακολουθεί:



### 1.2.3 ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Κατά την εκκίνηση των μηχανών επαγωγής παρουσιάζονται προβλήματα τα οποία είναι σημαντικά για τον ίδιο του κινητήρα αλλά και για τη μηχανή εργασίας και το δίκτυο. Τα κύρια προβλήματα εκκίνησης είναι τα μέτρα της ροπής εκκίνησης και του ρεύματος εκκίνησης. Για να εκκινήσει ο δρομέας θα πρέπει η ροπή που αναπτύσσεται στον άξονα να είναι μεγαλύτερη από τη ροπή που επιβάλλεται από τον άξονα στο φορτίο. Συχνά απαιτείται ροπή εκκίνησης ίση ή και μεγαλύτερη από την ονομαστική. Σε στρεφόμενες μηχανές η ροπή εκκίνησης δεν μπορεί να είναι ούτε πολύ μικρή διότι τότε απαιτείται μεγάλος χρόνος εκκίνησης ούτε πολύ μεγάλη διότι υπάρχει κίνδυνος θραύσης του άξονα.



Ακόμη, κατά την εκκίνηση, οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα απορροφούν ρεύμα τετραπλάσιο μέχρι και οκταπλάσιο του ονομαστικού τους. Όμως στις ηλεκτρικές κινήσεις με μεγάλο ρεύμα εκκίνησης ο χρόνος εκκίνησης δεν επιτρέπεται να είναι μεγάλος, επειδή αναπτύσσεται μεγάλη θερμότητα σε όλο το κύκλωμα και ανεπίτρεπτες πτώσεις τάσεις στο δίκτυο. Η ΔΕΗ απαιτεί το ρεύμα εκκίνησης να μην υπερβαίνει ορισμένες τιμές ανάλογα με την εγκατάσταση. Επίσης επιβάλλεται η εκκίνηση με διακόπτη Αστέρα/Τρίγωνο σε 3Φ κινητήρα ισχύος άνω του 1,1 kw και απαγορεύει τη λειτουργία 1Φ κινητήρα ισχύος άνω του 1,5 kw.

### **1.3 ΜΕΡΗ ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ Ο ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ**

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 στην τάξη μερικών χιλιοστών.

### **ΕΝΕΡΓΑ ΜΕΡΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ**

Η ασύγχρονη ηλεκτρική μηχανή αποτελείται από τα ενεργά και τα μη ενεργά μέρη. Τα ενεργά μέρη είναι οι περιελίξεις του στάτη και του δρομέα (φορείς τάσης και ρεύματος) και οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα (φορείς της μαγνητικής ροής). Οι περιελίξεις τοποθετούνται στα αυλάκια που βρίσκονται στην εσωτερική περιφέρεια του πυρήνα του στάτη και στην εξωτερική περιφέρεια του πυρήνα του δρομέα. Οι πυρήνες αποτελούνται από πυριτιούχα δυναμοελάσματα, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω δινορρευμάτων. Τα δυναμοελάσματα αυτά στοιβάζονται σε πυρήνες που συμπιέζονται σε πρέσες και τοποθετούνται σφιχτά στο περίβλημα της μηχανής.

Μια επαγωγική μηχανή έχει στάτη όμοιο με αυτόν μιας συνεχούς μηχανής. Διαφέρει όμως σημαντικά στη δομή του δρομέα της. Στα αυλάκια του στάτη τοποθετείται τριφασική περιέλιξη, τα έξι άκρα της οποίας καταλήγουν στους ισάριθμους ακροδέκτες του κιβωτίου άκρων.

### **ΔΡΟΜΕΑΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ**

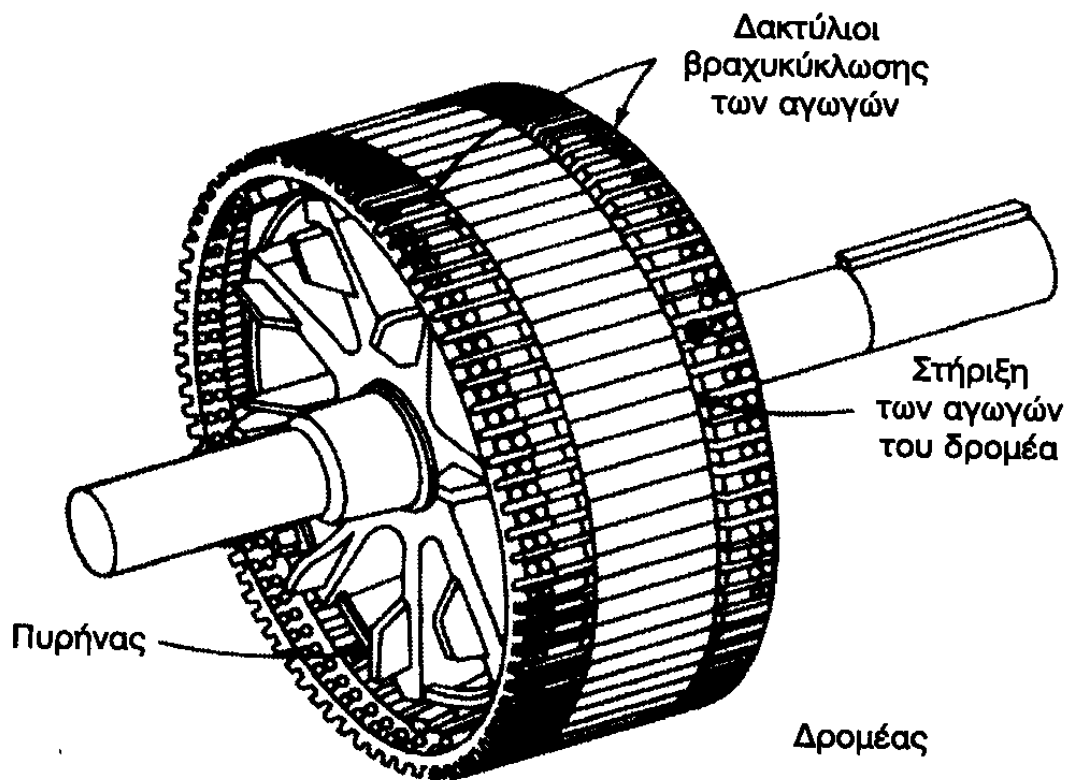
Οι δρομείς που τοποθετούνται στο εσωτερικό του στάτη μιας επαγωγικής μηχανής είναι δύο τύπων: **δρομείς βραχυκυκλωμένου κλωβού** (squirrel-cage rotor) και **δακτυλιοφόροι δρομείς** (wound rotor). Με βάση αυτούς τους δύο διαφορετικούς τύπους δρομέων, οι ασύγχρονες μηχανές χωρίζονται επίσης σε δύο τύπους: στις **ασύγχρονες μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού ή δρομέα**, και στις **ασύγχρονες μηχανές δακτυλιοφόρου δρομέα**.

Ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού αποτελείται από μια σειρά αγωγίμων ράβδων (μπάρες) τοποθετημένων χωρίς μόνωση στα αυλάκια της επιφάνειας του δρομέα και βραχυκυκλωμένων στα δυο τους άκρα μέσω μεγάλων δακτυλίων (shorting rings). Το υλικό του κλωβού είναι χαλκός ή ορείχαλκος ή χυτό αλουμίνιο. Το τελευταίο χρησιμοποιείται σε μηχανές μικρής και μέσης ισχύος, μέχρι 500 KW.

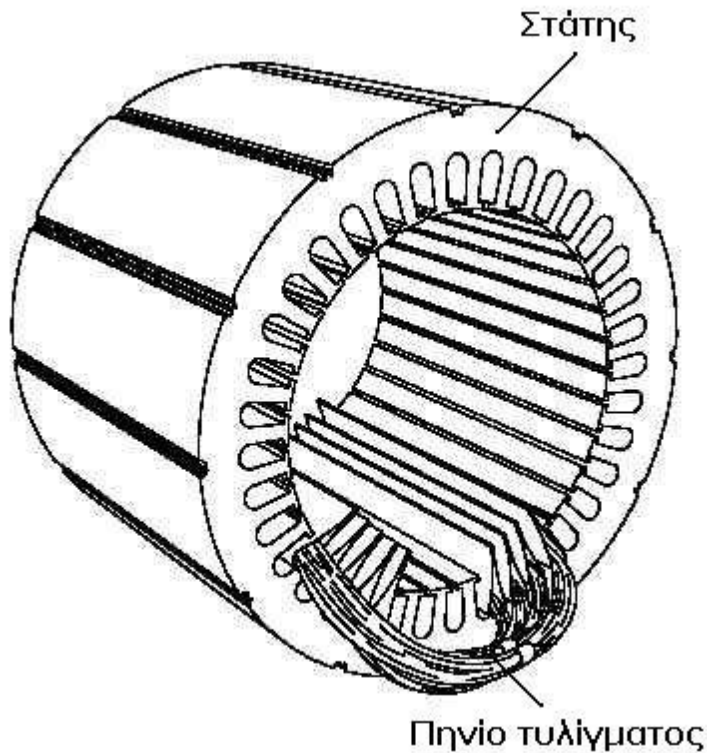
Ο δεύτερος τύπος δρομέα, ο δακτυλιοφόρος, διαθέτει ολοκληρωμένο τριφασικό τυλίγμα, τοποθετημένο με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελεί το κατοπτρικό είδωλο του τυλίγματος του στάτη. Οι τρεις φάσεις του τυλίγματος συνδέονται συνήθως σε αστέρα, ενώ τα άκρα των αγωγών συνδέονται σε δακτυλίους και βραχυκυκλώνονται μέσω ψηκτρών που εφάπτονται στους δακτυλίους. Έτσι καθίσταται δυνατή η μέτρηση (στις ψηκτρες) των ρευμάτων του δρομέα, καθώς και η σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα διέγερσης. Η τελευταία αυτή δυνατότητα δίνει το πλεονέκτημα επεξεργασίας της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας της μηχανής δακτυλιοφόρου δρομέα.

Συγκριτικά λοιπόν, ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού υστερεί του δακτυλιοφόρου δρομέα στο ότι δεν προσφέρει τη δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμά του. Η έλλειψη όμως αυτή των δακτυλίων ολίσθησης και ψηκτρών στους δρομείς βραχυκυκλωμένου κλωβού, η οποία ευθύνεται και για την αδυναμία σύνδεσης εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμά τους, περιορίζει τις τριβές και τις απαιτήσεις συντήρησής τους.

Στα δύο παρακάτω σχεδιαγράμματα που ακολουθούν βλέπουμε πώς είναι κατασκευασμένος ο δρομέας και ο στάτης σε έναν επαγωγικό κινητήρα βραχυκλωμένου κλωβού.



Σχεδιάγραμμα δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού



*Σχεδιάγραμμα στάτη βραχυκυκλωμένου κλωβού*

## **ΜΗ ΕΝΕΡΓΑ ΜΕΡΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ**

Τα μη ενεργά μέρη μιας ασύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής είναι το περίβλημα, ο άξονας, τα έδρανα, τα πλέγματα, ο ανεμιστήρας και άλλα εξαρτήματα στήριξης, στερέωσης και μόνωσης. Το περίβλημα αποτελείται από τον μανδύα και τα πλευρικά καλύμματα, και κατασκευάζεται, στις περισσότερες μικρές μηχανές, από αλουμίνιο. Ο μανδύας έχει διαμήκη πτερύγια ψύξης για την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας.

## **ΤΑ ΕΔΡΑΝΑ ΤΩΝ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ**

Τα έδρανα των ασύγχρονων μηχανών είναι τοποθετημένα στις φολιές των πλευρικών καλυμμάτων, ενώ στις πολύ μεγάλες μηχανές έχουν δική τους επιδαπέδια στήριξη. Τα έδρανα του άξονα της μηχανής διακρίνονται σε **έδρανα κύλισης** (ρουλεμάν) και σε **έδρανα ολίσθησης** (κουζινέτα). Τα πρώτα πλεονεκτούν των δεύτερων στην ευκολία τοποθέτησης, στο χαμηλότερο κόστος, στις λιγότερες απώλειες και στα ελάχιστα έξοδα συντήρησης. Από την άλλη μεριά όμως τα κουζινέτα είναι πιο αθόρυβα και αντέχουν σε μεγάλες φορτίσεις, γι' αυτό προτιμώνται σε πολύ μεγάλες μηχανές, αλλά και σε μικρές, όταν η μείωση του θορύβου λειτουργίας τους είναι υψηλής σημασίας. Ανάλογα με τον τρόπο έδρασης και στήριξης των ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών

υπάρχει μια σειρά κατασκευαστικών μορφών (ή απλά κατασκευών) σύμφωνα με τις προδιαγραφές DIN IEC 34.

#### **1.4. ΕΙΔΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ**

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές DIN 40050 καθορίζονται τα είδη προστασίας των ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών έναντι του νερού και των εξωτερικών σωμάτων. Παραδείγματα αποτελούν οι προστασίες **IP23** και **IP44**.

Η πρώτη είναι προστασία ανοιχτού τύπου, δηλαδή ο εξωτερικός αέρας εισροφάται από τον ανεμιστήρα και ψύχει άμεσα τις περιελίξεις με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται καλύτερη ψύξη. Η προστασία όμως του κινητήρα, σ' αυτή την περίπτωση, δεν είναι ικανοποιητική.

Αντίθετα η IP44 είναι προστασία κλειστού τύπου, οπότε η θερμότητα απάγεται από το περίβλημα της μηχανής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ψύξη της μηχανής να μην είναι επαρκής, και να είναι απαραίτητη η αύξηση της επιφάνειας απαγωγής της θερμότητας (δηλαδή της επιφάνειας του περιβλήματος). Η αύξηση της επιφάνειας απαγωγής όμως συνεπάγεται σε αύξηση του όγκου της μηχανής. Το πλεονέκτημα ωστόσο της προστασίας IP44, το οποίο την καθιστά και πιο διαδεδομένη, είναι η εξαιρετική προστασία που εξασφαλίζεται στη μηχανή από το νερό και τα εξωτερικά σώματα. Συνήθως οι μηχανές με προστασία IP44 έχουν εξωτερικό ανεμιστήρα στο ένα άκρο του άξονά τους, ο οποίος με τη βοήθεια σταθερού καλύμματος δημιουργεί ρεύμα αέρα κατά μήκος των περυγίων ψύξεως του μανδύα, για την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας της μηχανής.

#### **ΜΟΝΩΣΗ ΠΕΡΙΕΛΙΞΕΩΝ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ**

Τα μονωτικά υλικά των περιελίξεων πρέπει να έχουν μηχανική, θερμική και διηλεκτρική αντοχή. Η μηχανική αντοχή απαιτείται λόγω αντίστοιχων φορτίσεων στην κατασκευή της περιέλιξης, αλλά και για την περίπτωση βραχυκυκλώματος, όπου τα υψηλής έντασης ρεύματα που αναπτύσσονται δημιουργούν μεγάλες δυνάμεις μεταξύ των αγωγών, ικανές να παραμορφώσουν και να καταστρέψουν τις κεφαλές των περιελίξεων. Η θερμική αντοχή είναι απαραίτητη κατά τη λειτουργία της μηχανής, όπως εξάλλου είναι και η διηλεκτρική αντοχή. Η τελευταία είναι πολύ σημαντική και κατά τη διάρκεια των δοκιμών της περιέλιξης. Επίσης επιθυμητά χαρακτηριστικά των μονωτικών των περιελίξεων είναι η μεγάλη ωμική αντίσταση, ο όσο το δυνατόν λιγότερο υγροσκοπικός τους χαρακτήρας, και σε πολλές περιπτώσεις η αντοχή τους σε λάδια.

#### **1.5 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**

Οι ωμικές αντιστάσεις του στάτη και του δρομέα εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα (όπως το μήκος και τη διατομή των τυλιγμάτων του, την ποιότητα

του χαλκού του, την κλάση μόνωσης) καθώς και από τη θερμοκρασιακή κατάστασή του. Επίσης οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων επηρεάζονται και από το επιδερμικό φαινόμενο.

Οι απώλειες πυρήνα  $P_{core}$  (ή αλλιώς σιδήρου) οφείλονται στα φαινόμενα υστέρησης και δινορρευμάτων που αναπτύσσονται στα σιδηρομαγνητικά υλικά των κινητήρων

Οι απώλειες υστέρησης (hysteresis losses)  $P_{core,h}$  αναφέρονται στη μαγνητική ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη μαγνήτιση του πυρήνα, δηλαδή την αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων του όπως αυτή συμβαίνει σε κάθε περίοδο της εναλλασσόμενης τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα. Μπορεί ν' αποδειχτεί ότι οι απώλειες ενέργειας σε κάθε περίοδο είναι ανάλογες του εμβαδού που καλύπτει ο βρόχος υστέρησης. Όσο μικρότερη είναι η μέγιστη τιμή της μαγνητεγερτικής δύναμης που εφαρμόζεται στον πυρήνα, τόσο μικρότερο είναι το εμβαδό του βρόχου υστέρησης, άρα και οι αντίστοιχες απώλειες.

Οι απώλειες δινορρευμάτων (eddy current losses)  $P_{core,e}$  αποτελούν μια ακόμα κατηγορία απωλειών προκαλούμενων από τις μεταβολές της επιβαλλόμενης μαγνητεγερτικής δύναμης σ' έναν πυρήνα. Οφείλονται στην ανάπτυξη δινορρευμάτων στον πυρήνα από τάσεις που επάγει μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή και είναι ουσιαστικά οι θερμικές απώλειες που καταναλώνονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα. Εξαρτώνται από τη γεωμετρία του πυρήνα, την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού του, την πυκνότητα του ρεύματος και το πάχος των δυναμοελασμάτων.

Οι μηχανικές απώλειες ενός επαγωγικού κινητήρα συνίστανται στις απώλειες λόγω τριβών μεταξύ των μηχανικών τμημάτων της μηχανής (friction losses) **PF**, και στις απώλειες εξαερισμού (windage losses) **PW**. Οι τελευταίες είναι οι απώλειες που προκύπτουν από τις τριβές των μηχανικών τμημάτων του κινητήρα με τον αέρα λόγω περιστροφής. Για τις μηχανικές απώλειες χρησιμοποιείται ο συμβολισμός **PF&W**. Κατά προσέγγιση θεωρούνται ανάλογες του κύβου της περιστροφικής ταχύτητας του κινητήρα.

Τέλος στις κατανεμημένες απώλειες  $P_{stray}$  περιλαμβάνονται όλες οι απώλειες που δεν μπορούν να υπολογιστούν σε καμία από τις προηγούμενες κατηγορίες και συνήθως οφείλονται στην αύξηση της μαγνητικής ροής σκέδασης κατά την αύξηση φορτίου και στις υψίσυχνες διακυμάνσεις της ροής αυτής (οι διακυμάνσεις της ροής προέρχονται από την παραμόρφωση της ημιτονοειδούς ιδανικά κατανομής της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, λόγω της κατανομής των αγωγών στα αυλάκια). Τέτοιες μη υπολογίσιμες απώλειες μπορεί να είναι:

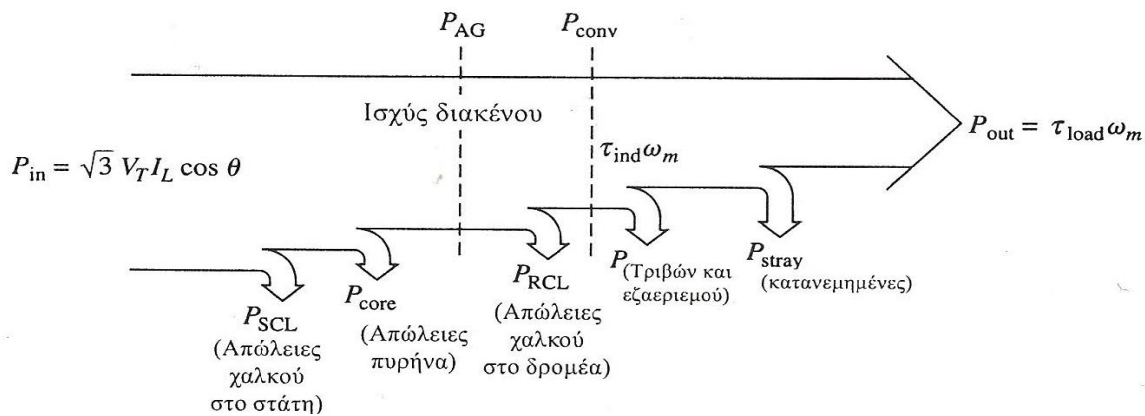
- ❖ Απώλειες δινορρευμάτων στις περιελίξεις εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου που προκαλεί η μαγνητική ροή σκέδασης, με συνέπεια την μείωση της ενεργού διατομής των αγωγών και άρα την αύξηση της ωμικής των αντιστάσεως.
- ❖ Απώλειες δινορρευμάτων λόγω της μαγνητικής ροής σκέδασης στις κεφαλές των τυλιγμάτων του στάτη, με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών πυρήνα και την πρόκληση απωλειών σιδήρου στο περίβλημα και σε άλλα μη ενεργά μέρη του κινητήρα. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από τη γεωμετρία των κεφαλών του κινητήρα.

Η τιμή τους προσδιορίζεται συμβατικά ως το 1% επί της ισχύος εξόδου του κινητήρα κατά τη λειτουργία με πλήρες φορτίο.

Οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες πυρήνα συνήθως υπολογίζονται μαζί και ονομάζονται **απώλειες χωρίς φορτίο ή απώλειες της εν κενώ λειτουργίας**.

Οι απώλειες πυρήνα, οι μηχανικές και οι κατανεμημένες απώλειες πολλές φορές προστίθενται όλες μαζί και ονομάζονται **απώλειες περιστροφής** (rotational losses). Ο λόγος είναι ότι οι τιμές των παραπάνω απωλειών εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Έτσι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες τριβών, εξαερισμού και οι κατανεμημένες απώλειες. Από την άλλη μεριά οι απώλειες πυρήνα μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα (όταν δηλαδή η  $n_m$  προσεγγίζει την  $n_{sync}$ ).

Παρά την παραπάνω εξάρτηση των επιμέρους απωλειών περιστροφής από την ταχύτητα περιστροφής, η συνολική τιμή τους θεωρείται σταθερή ακόμα και για μεταβαλλόμενη περιστροφική ταχύτητα κινητήρα, αφού οι επιμέρους απώλειες μεταβάλλονται προς αντίθετες κατευθύνσεις.



Διάγραμμα ροής ισχύος ενός επαγωγικού κινητήρα.

## 1.6 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

### ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΚΛΩΒΟΥ

Η επίλυση του προβλήματος της κατανομής του μαγνητικού πεδίου του ασύγχρονου ηλεκτρικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού αποτελεί εγχείρημα δύσκολο λόγω της πολυπλοκότητας της δομής της μηχανής και της ποικιλότητας των φαινομένων που συνδέονται με την κατανομή του μαγνητικού πεδίου. Για να είναι δυνατή λοιπόν η προσέγγιση του παραπάνω προβλήματος γίνονται κάποιες παραδοχές. Με βάση τις παραδοχές αυτές αγνοούνται κάποια φαινόμενα, που ούτως ή άλλως έχουν αμελητέα επίδραση στο μαγνητικό πεδίο, και λαμβάνονται κάποιες συμμετρίες οι

οποίες κάνουν δυνατή τη μελέτη μικρότερου τμήματος της μηχανής. Σε κάθε περίπτωση οι παραδοχές, οι οποίες λαμβάνονται κατά τη μελέτη, περιορίζουν σημαντικά τον όγκο των αναγκαίων για την επίλυση του μαγνητικού προβλήματος υπολογισμών.

Λόγω της μεγάλης μαγνητικής διαπερατότητας των δυναμοελασμάτων των πυρήνων στάτη και δρομέα θεωρούμε μαγνητική διάδοση μόνο κατά την εγκάρσια τομή του κινητήρα, ενώ θεωρούμε τις αξονικές συνιστώσες αμελητέες. Λαμβάνεται λοιπόν το μαγνητικό πρόβλημα δισδιάστατο, στο εγκάρσιο επίπεδο του κινητήρα.

Το μαγνητικό πεδίο σκέδασης των κεφαλών θεωρείται αμελητέο, καθώς ο υπολογισμός του πεδίου στηρίζεται στην πυκνότητα του ρεύματος του στάτη και όχι στην τάση του.

Τα επιφανειακά φορτία και τα ρεύματα μετατόπισης θεωρούνται μηδενικά, παραδοχή που ευσταθεί στην περίπτωση χαμηλών συχνοτήτων (συχνότητα δικτύου τροφοδοσίας του κινητήρα της μελέτης μας 50 Hz).

Ο χαλκός της περιέλιξης στα αυλάκια του στάτη θεωρείται συμπαγής, και σαν συνέπεια το διάρρευμα σε κάθε αυλάκι θεωρείται σταθερό.

Στη συμμετρική τριφασική περιέλιξη κάθε φάση λαμβάνεται κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες μετατοπισμένη σε σχέση με τη γειτονική της.

Τα ρεύματα που διαρρέουν τη συμμετρική τριφασική περιέλιξη του στάτη του κινητήρα θεωρούνται συμμετρικά και ημιτονοειδή, με χρονική διαφορά μεταξύ ρευμάτων διαδοχικών φάσεων 120 μοίρες.

Τα φαινόμενα των άκρων θεωρούνται αμελητέα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΠΟΛΩΝ ΙΣΧΥΟΣ 15kW**

Στην παρακάτω μελέτη αναφέρονται τα βασικά βήματα για την σχεδίαση ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα . Το πρώτο βήμα είναι ο προσδιορισμός των τεχνικών προδιαγραφών του κινητήρα όπου κυκλοφορεί στην αγορά και έχει κατασκευαστεί από την εταιρία VALIADIS S.A . Στην συγκεκριμένη μελέτη οι προδιαγραφές είναι οι ακόλουθες:

**ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ:** 15kW

**ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ:** 1471στρ./λεπτό

**ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (ΠΟΛΙΚΗ):** 400V

**ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ:** 50Hz

**ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΑΣΕΩΝ:** 3

**ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ:** ΤΡΙΓΩΝΟ

**ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ:** 0,847

**ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ:** 0,91

**ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗ:**97,43N.m

**ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΡΕΥΜΑ:**28,07A

**ΡΟΠΗ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ:**211,52N.m

**ΡΟΠΗ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ:**257N.m

**ΟΛΗΣΘΗΣΗ:**1,933%

**ΚΛΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ:** B

Κάποια από τα παραπάνω στοιχεία (π.χ. συντελεστής απόδοσης, συντελεστής ισχύος, ροπή κλπ) θα υπολογιστούν κατά την σχεδίαση του κινητήρα και θα συγκριθούν με τα αναγραφόμενα παραπάνω. Αν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις θα πρέπει να αλλάξουμε κάποια από τα χαρακτηριστικά του κινητήρα μας.

Στην συνέχεια ξεκινάμε την σχεδίαση με την αρχική διαστασιολόγηση του κινητήρα.

#### **2.1 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**

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



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

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:

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

Όπου:

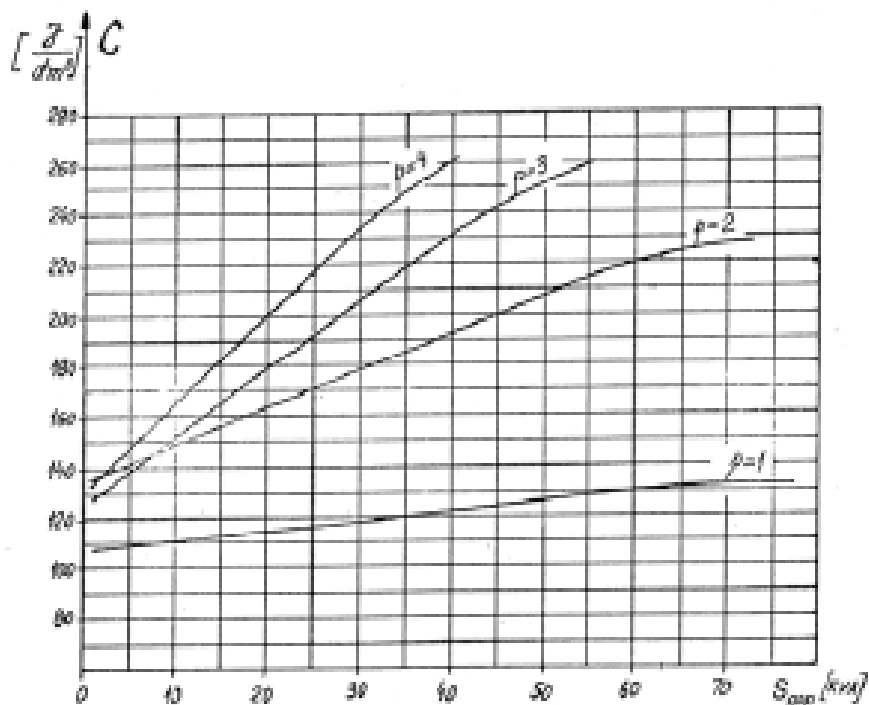
$$K_E = \frac{E_A}{V_\varphi} \approx 0,98 - 0,005 \cdot p_i = 0,98 - 0,005 \cdot 2 = 0,97$$

Άρα:

$$S_{gap} = \frac{K_E \cdot P_n}{\eta_N \cdot \cos\varphi} = \frac{0,97 \cdot 15000W}{0,91 \cdot 0,847} = 18877,2VA$$

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. 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. Μπορεί όμως να υπολογιστεί και από την παρακάτω γραφική παράσταση η οποία ισχύει για μικρής ισχύος κινητήρες:



Από το παραπάνω διάγραμμα παίρνουμε μια προσεγγιστική τιμή:

$$C_0 \approx 160 \times 10^3 J/m^3$$

Αντικαθιστώντας όλα τα παραπάνω στην σχέση (1) υπολογίζουμε:

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 2}{\pi \cdot 1,5} \cdot \frac{2}{50} \cdot \frac{18877,2}{160 \cdot 10^3}} = 0,158m = 15,8cm$$

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

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \Rightarrow L = \lambda \cdot \tau \Rightarrow L = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot p_i} = \frac{1,5 \cdot 3,14 \cdot 15,8}{2 \cdot 2} m = 0,186m = 18,6cm$$

Όπου  $\tau$  είναι το πολικό βήμα, δηλαδή η απόσταση ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς πόλους .

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot p_i} = \frac{3,14 \cdot 0,158m}{2 \cdot 2} = 0,124m = 12,4cm$$

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

$$\frac{D_{IS}}{D_{out}} = 0,62 \Rightarrow D_{out} = \frac{D_{IS}}{0,62} = 0,255m = 25,5cm$$

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

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

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

$$g = (0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3}m = (0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{15000}) \cdot 10^{-3}m = 0,39mm$$

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 0,4mm.** 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.

## 2.2 ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑΤΗ

Η μελέτη των τυλιγμάτων του στάτη ξεκινά με την επιλογή του αριθμού των αυλακιών μέσα στα οποία θα μπουν τα τυλίγματα. Για να υπολογίσουμε τον συνολικό αριθμό των αυλακιών χρησιμοποιούμε την σχέση:

$$N_s = 2 \cdot p_i \cdot q \cdot m$$

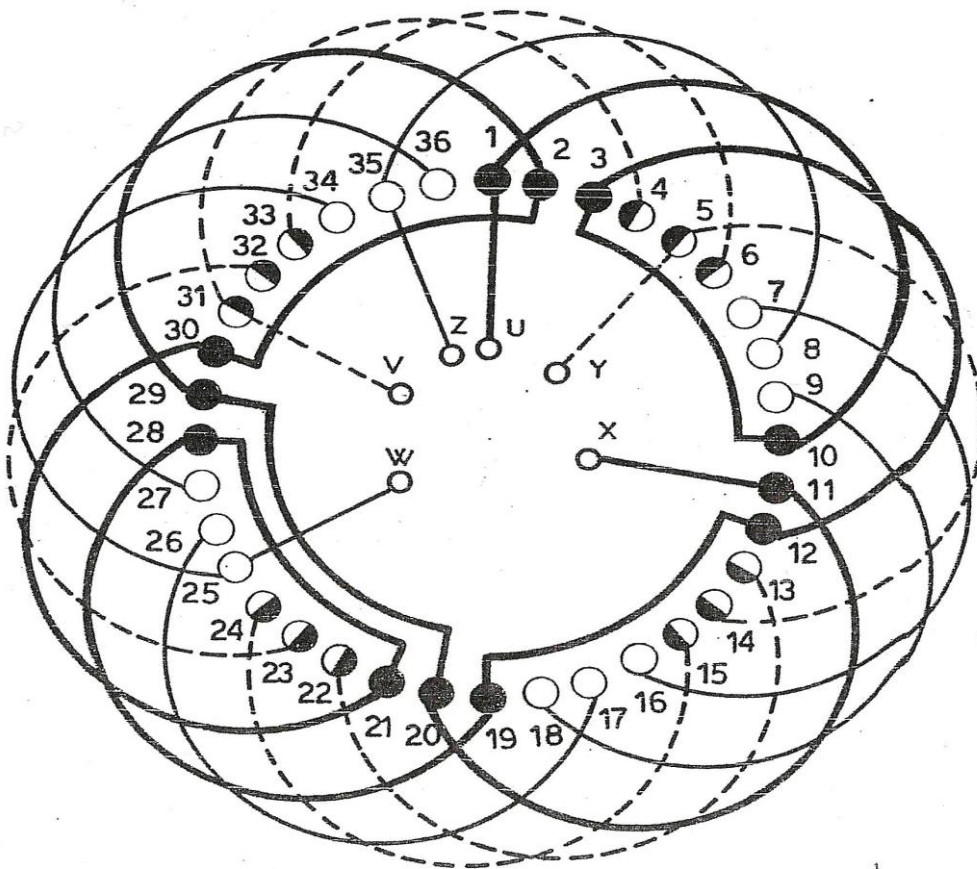
Όπου,  $p_i$ , τα ζεύγη πόλων,  $m$  ο αριθμός των φάσεων και  $q$  ο αριθμός των αυλακιών ανά φάση και ανά πόλο. Επιλέγουμε 3 αυλάκια ανά φάση και πόλο άρα:

$$N_s = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 = 36 \text{ αυλάκια}$$

Το πολικό βήμα θα είναι:

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

Θα φτιάξουμε ένα τύλιγμα με μια στρώση (1 μάτσο ανά αυλάκι), με δυο πραγματικούς και δυο φανταστικούς πόλους το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 1. Το τύλιγμα της μηχανής . 36 αυλάκια, 4 πόλοι ( πραγματικοί ).

Ο συντελεστής τυλίγματος θα 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 δυο διαδοχικών αυλακιών σε ηλεκτρικές μοίρες οι οποίες δίνονται από την σχέση:

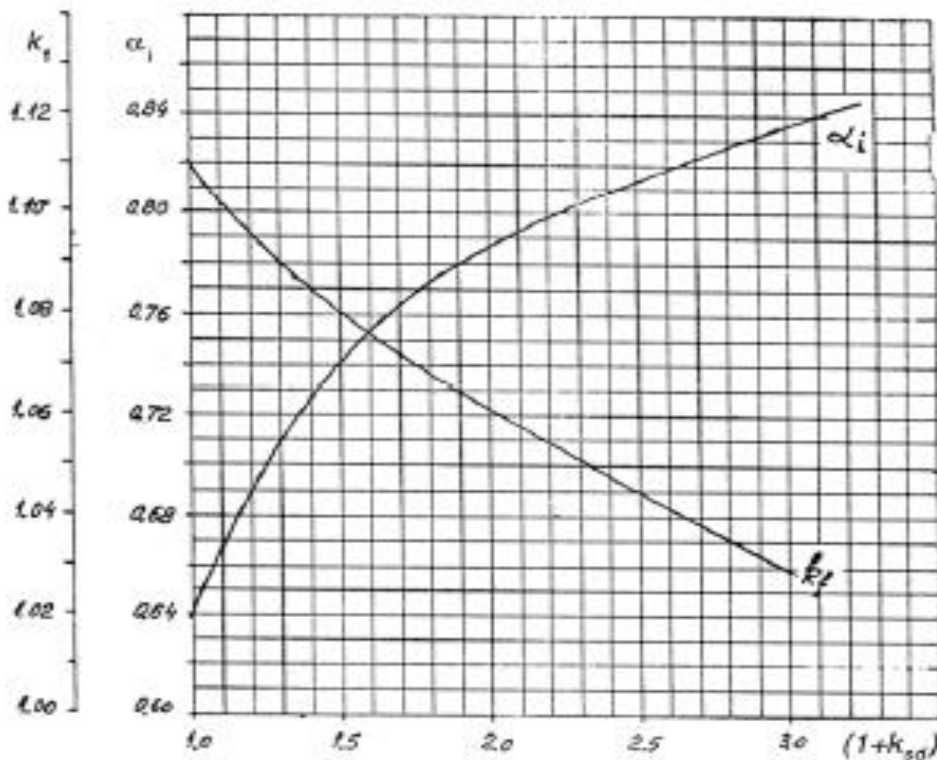
$$\alpha = p_i \cdot a_r$$

Όπου  $a_r$  η γεωμετρική γωνία ( $360^\circ/36$  αυλάκια= $10^\circ$  στην περίπτωση μας).

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό σπειρών ανά φάση. Ο υπολογισμός στηρίζεται στην μαγνητική ροή που περνά από το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα, κάτω από ένα πόλο, 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:



Εικόνα 2: Form Factor  $K_f$  και flux density shape factor  $\alpha_i$  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  $\alpha_i=0,74$ . Αναλυτικός υπολογισμός του  $1+K_{ST}$  θα γίνει αργότερα σε άλλη φάση της μελέτης.

Για μηχανές με 4 πόλους συνίσταται η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο να είναι μεταξύ 0,65-0,78T. Εμείς θα διαλέξουμε μια μαγνητική επαγωγή ίση με 0,65T. Άρα η μαγνητική ροή στο διάκενο θα είναι ίση με:

$$\varphi = 0,74 \cdot 0,124 \cdot 0,186 \cdot 0,65 = 11,09 \cdot 10^{-3} Wb$$

Στην συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό σπειρών ανά φάση ο οποίος δίνεται από την σχέση:

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

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  $\alpha_i$  την βρίσκουμε από την γραφική παράσταση 2. Στην περίπτωση μας παίρνει τιμή 1,07. Επίσης η  $V_\varphi$  θα είναι ίση με 400V διότι ο τρόπος συνδεσμολογίας του κινητήρα είναι σε τρίγωνο. Άρα:

$$W_i = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_\tau \cdot f \cdot \varphi} = \frac{0,97 \cdot 400}{4 \cdot 1,07 \cdot 0,96 \cdot 50 \cdot 11,09 \cdot 10^{-3}} = 170 \text{ σπειρες} / \text{φάση}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό αγωγών ανά αυλάκι:

$$n_s = \frac{\alpha_i \cdot W_i}{p_i \cdot q} = \frac{1 \cdot 170}{2 \cdot 3} = 28 \text{ αγωγοί} / \text{αυλάκι}$$

Ο συντελεστής  $\alpha_i$  εκφράζει τον αριθμό των παράλληλων αγωγών που στην περίπτωση 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:

$$I_{ov} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_\pi \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{15000W}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,847 \cdot 0,91} = 28,09A$$

Για να υπολογίσουμε την διατομή των αγωγών θα επιλέξουμε μια πυκνότητα ρεύματος. Για κινητήρες 4 πόλων συνίσταται η πυκνότητα ρεύματος να βρίσκεται μεταξύ:

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

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<sup>2</sup> για να μην έχουμε μεγάλες απώλειες και υπολογίζουμε την διατομή:

$$A_{cu} = \frac{I_{ov}}{J_{\cos}} = \frac{28,09A}{5A/mm^2} = 5,61mm^2$$

Η διάμετρος του αγωγού θα είναι ίση με:

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{cu}}{\pi}} = 2,67mm$$

**Αν η διάμετρος είναι μεγαλύτερη από 1,3mm τότε για κινητήρες μικρής ισχύος επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε παράλληλους κλάδους μικρότερης διαμέτρου.** Μετά από δοκιμές καταλήξαμε να χρησιμοποιήσουμε 5 παράλληλους κλάδους διότι έτσι η διάμετρος του αγωγού θα είναι μικρότερη από 1,3mm.

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{cu}}{5\pi}} = 1,19mm$$

Από τον πίνακα 2 επιλέγουμε την τυποποιημένη διάμετρο η οποία είναι 1,18mm.

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 2: Τυποποιημένες διαμέτροι αγωγών σάτη.

## 2.2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΙΩΝ ΤΟΥ ΣΤΑΤΗ

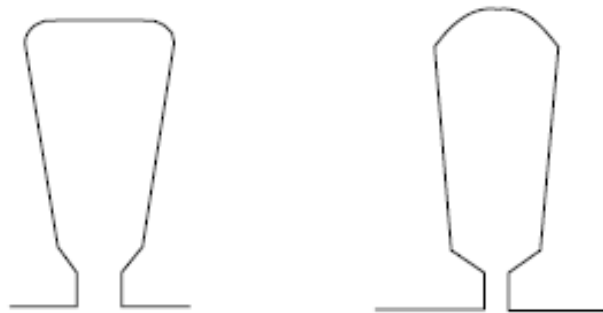
Από την στιγμή που γνωρίζουμε την διατομή των αγωγών και τον αριθμό τους μπορούμε να υπολογίσουμε τη απαιτούμενη διατομή των αυλακιών του στάτη από την σχέση:

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

Όπου  $K_{fill}$  είναι μια σταθερά (fill factor) η οποία εξαρτάται από το πάχος της μόνωσης που χρησιμοποιούμε, για τον συγκεκριμένο κινητήρα ισχύος 15kW θα επιλέξουμε τιμή 0,44. Επίσης σύμφωνα με τον πίνακα 2 για διάμετρο του στάτη 1,18mm έχουμε διάμετρο 1,2345mm του μονωτικού υλικού. Ο συντελεστής  $a_i$  υποδηλώνει τους παράλληλους κλάδους που χρησιμοποιούμε όπου στην περίπτωσή μας είναι 5. Οπότε η διατομή των αυλακιών θα είναι ίση με:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_i \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}} = \frac{\pi \cdot 1,2345^2 \cdot 5 \cdot 28}{4 \cdot 0,44} = 380,65 \text{mm}^2$$

Η μορφή των αυλακιών του στάτη έχουν συνήθως μια από τις παρακάτω μορφές:



Εικόνα 3: Συνηθισμένη μορφή αυλακιών του στάτη.

Στην εικόνα 4 της επόμενης σελίδας φαίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις που θα πρέπει να υπολογιστούν. Κάποιες από τις διαστάσεις αυτές υπολογίζονται εμπειρικά από την βιομηχανική εμπειρία. Πιο συγκεκριμένα:

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

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

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

Αν 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 παρένθεσης είναι η μαγνητική ροή στο διάκενο και δεξιά η μαγνητική ροή στο «δόντι» του αυλακιού.  $K_{Fe}$  είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα της μόνωσης μεταξύ των μεταλλικών φύλλων από τα οποία αποτελείται ο στάτης και  $B_{ts}$



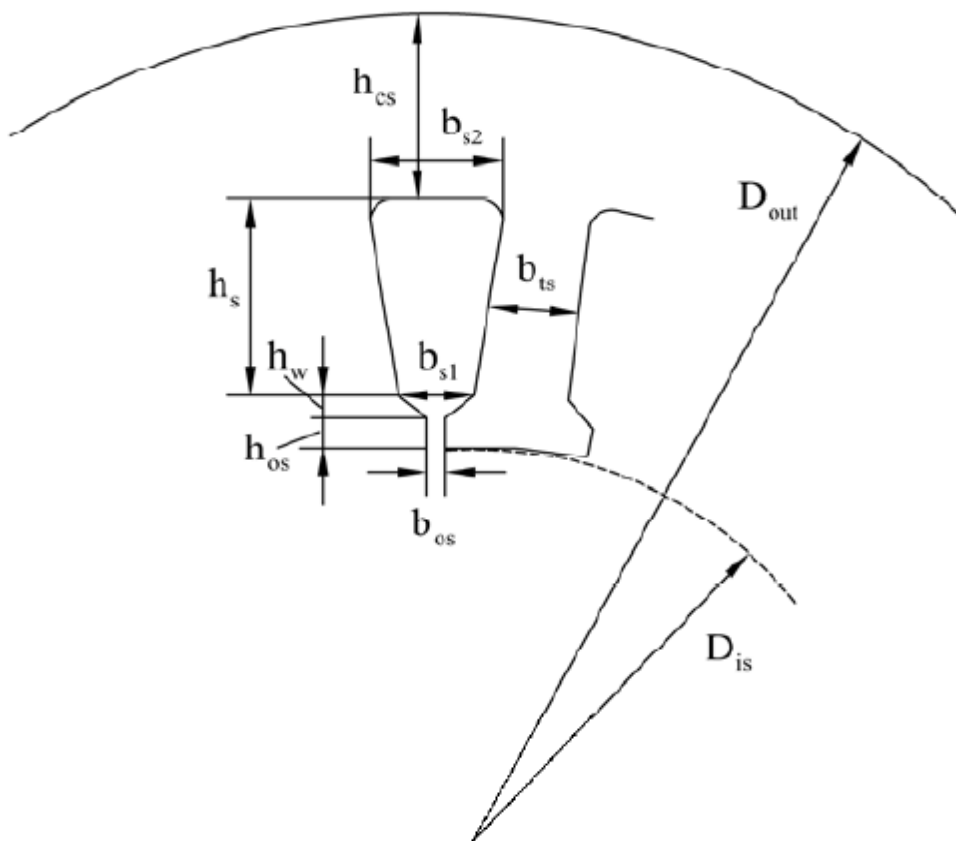
είναι η μαγνητική επαγωγή στον στάτη η οποία συνίσταται να παίρνει τιμές μεταξύ 1,5T έως 1,65T. Η μαγνητική επαγωγή είναι φυσικά μεγαλύτερη σε σχέση με την μαγνητική επαγωγή του διακένου λόγω της παρουσίας του σιδηρομαγνητικού υλικού. Άρα:

$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s \cdot L}{B_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe}} = \frac{0,65 \cdot 13,7 \cdot 10^{-3}}{1,55 \cdot 0,96} = 5,97 \cdot 10^{-3} m$$

Όπου:

$$\tau_s = \frac{\tau}{3 \cdot q} = \frac{0,124}{9} = 13,7 mm$$

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



Εικόνα 4: Οι διαστάσεις του στάτη αναλυτικά.

Από την γεωμετρία του αυλακιού προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned}
 b_{s1} &= \frac{\pi \cdot (D_{is} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_s} - b_{ts} \\
 &= \frac{\pi \cdot (158 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 1) \cdot 10^{-3}}{36} - 5,97 \cdot 10^{-3} \\
 \Rightarrow b_{s1} &= 8,07 \cdot 10^{-3} m = 8,07 mm
 \end{aligned}$$

Επίσης:

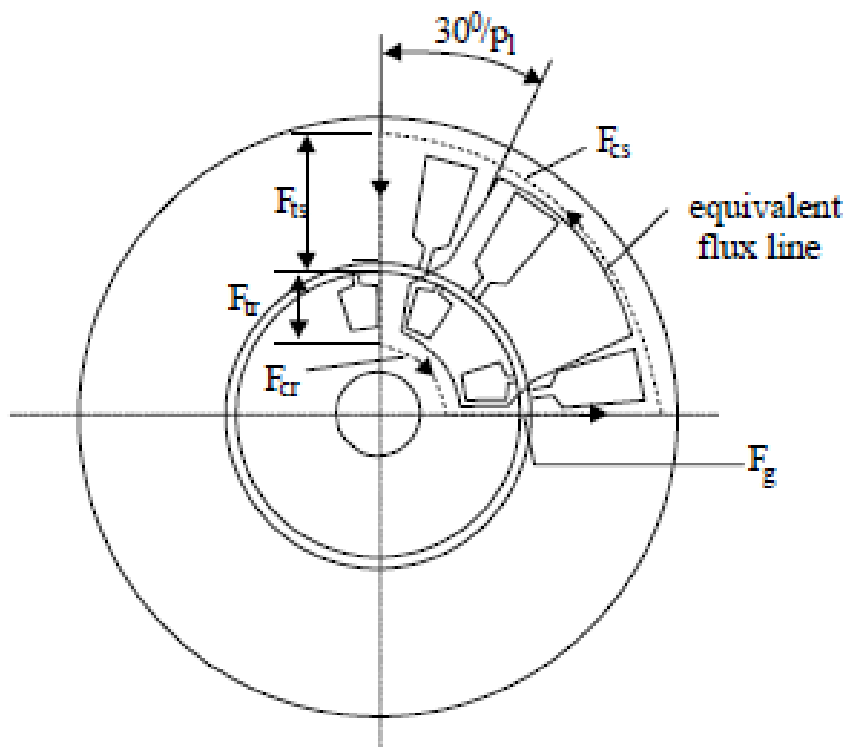
$$b_{s2} = \sqrt{4 \cdot A_{su} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_s}\right) + b_{s1}^2} = \sqrt{4 \cdot 380,65 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{36}\right) + 8,07^2} mm = 14 mm$$

$$A_{su} = h_s \cdot \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \Rightarrow h_s = \frac{2 \cdot A_{su}}{(b_{s1} + b_{s2})} \Rightarrow h_s = \frac{2 \cdot 380,65}{(8,07 + 14)} = 34,5 mm$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τον συντελεστή  $1+K_{st}$  (tooth saturation factor) στον οποίο αυθαίρετα είχαμε δώσει μια 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 μαγνητεγερτική δύναμη στον στάτη, στον δρομέα και στο διάκενο αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 5.

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

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

Όπου  $K_C$  είναι ο συντελεστής Carter (Carter coefficient) ο οποίος 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 μια τυπική τιμή για τον συντελεστή αυτό ίση με 1,2. Προκύπτει λοιπόν ότι:

$$F_{mg} = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_o} = 1,2 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,65}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 248,4At$$

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 παρακάτω πίνακα 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 3.

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

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w) = 1760 \cdot (34,5 + 0,5 + 1) \cdot 10^{-3} = 63,36At$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη στον δρομέα υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_{mtr} = K_{st} \cdot F_{mg} - F_{mts} = 0,5 \cdot 248,4 - 63,36 = 60,84At$$

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

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

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{IS} - 2 \cdot (h_{os} + h_w + h_s))}{2} = \frac{255 - (158 + 2 \cdot (0,5 + 1 + 34,5))}{2} \Rightarrow h_{cs} = 12,5mm$$

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

$$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot h_{cs}} = \frac{11,09 \cdot 10^{-3}Wb}{2 \cdot 0,186m \cdot 12,5 \cdot 10^{-3}m} = 2,38T$$

**Η συγκεκριμένη τιμή της μαγνητικής επαγωγής είναι πολύ μεγάλη αν λάβουμε υπόψη μας ότι θέλουμε να βρίσκεται μεταξύ  $1,4T-1,7T$ . Για να επιλύσουμε το πρόβλημα έχουμε τρεις δυνατότητες:**

1. Να αυξήσουμε την εξωτερική διάμετρο του στάτη.
2. Να εισάγουμε μια μεγαλύτερη τιμή για τον συντελεστή  $\lambda$  (stack aspect ratio) κάτι 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 αυλακιών, κάτι που δεν μπορεί να γίνει στην περίπτωση μας.

Επιλέγουμε την πρώτη λύση. 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:

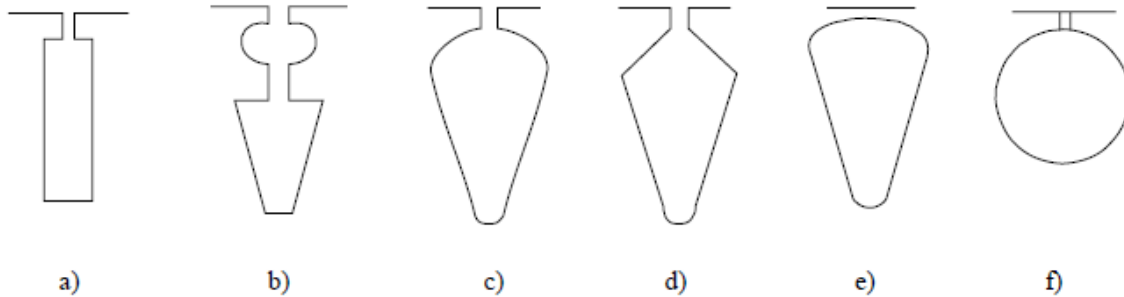
$$h_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot B_{cs}} = \frac{11,09 \cdot 10^{-3}Wb}{2 \cdot 0,186m \cdot 1,5T} = 20mm$$

Άρα η εξωτερική διάμετρος θα πρέπει να αυξηθεί κατά  $2 \cdot (20 - 12,5)mm = 15mm$ . Άρα η εξωτερική διάμετρος της μηχανής θα είναι:

$$D_{out} = 255 + 15 = 270mm$$

### 2.3 ΔΡΟΜΕΑΣ

Αρχικά θα υπολογίσουμε τη μορφή και τον αριθμό των αγωγών του δρομέα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι τυπικές μορφές των αγωγών του 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 4. Αριθμός αγωγών δρομέα σε συνάρτηση με των αριθμό των πόλων και τον αριθμό των αυλακιών 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 :

$$K_I = 0,8 \cdot \cos\varphi + 0,2 = 0,8 \cdot 0,847 + 0,2 = 0,877$$

Το  $\cos\varphi$  είναι ο συντελεστής ισχύος της μηχανής που θέλουμε να επιτύχουμε (0,847 στην περίπτωση μας). Άρα:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_{w1} \cdot I_{1n} \cdot K_I}{N_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 170 \cdot 0,96 \cdot 28,09 \cdot 0,877}{28} = 861,5A$$

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:

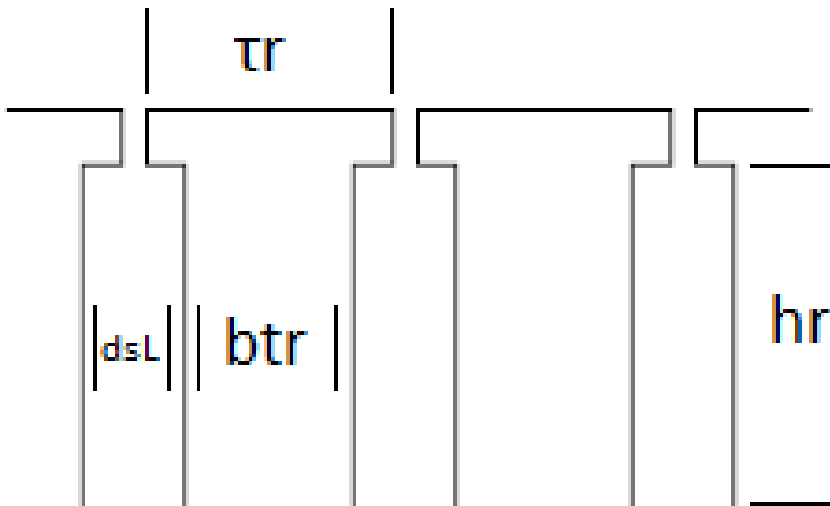
$$A_b = \frac{861,5A}{3,42 A/mm^2} = 251,9mm^2$$

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

$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p_i}{N_r}} = \frac{861,5A}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 2}{28}} = 1936,7A$$

Η διατομή του δακτυλίου βραχυκύκλωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{1936,7A}{0,8 \cdot 3,42 A/mm^2} = 707,85mm^2$$



Εικόνα 6. Οι βασικές διαστάσεις των αγωγών του δρομέα.

### 2.3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ

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

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot (D_{is} - 2g)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (158 - 2 \cdot 0,4)}{28} = 17,62mm$$

Θεωρώντας ότι η μαγνητική επαγωγή στο «δόντι» του δρομέα είναι ίση με 1,55T 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 ίση. Άρα προκύπτει ότι:

$$b_{tr} = \frac{B_g \cdot \tau_r}{K_{fe} \cdot B_{tr}} = \frac{0,65T \cdot 17,62 \cdot 10^{-3}}{0,96 \cdot 1,55T} = 7,7 \cdot 10^{-3}mm$$

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

$$D_{re} = D_{is} = 158mm$$

Άρα η περιφέρεια του δρομέα θα είναι:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot \frac{158}{2} = 496,12mm$$

Από το σχήμα των αγωγών προκύπτει ότι:

$$d_{SL} = \tau_r - b_{tr} = 17,62mm - 7,7mm = 9,92mm$$

Το βάθος του αγωγού θα είναι:

$$h_r = \frac{A_b}{d_{SL}} = \frac{251,9mm^2}{9,92mm} = 25,4mm$$

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. Αν θέλουμε η μαγνητική επαγωγή να είναι ίση με 1,55T τότε από τον πίνακα 3 για το υλικό που χρησιμοποιούμε η ένταση του μαγνητικού πεδίου θα είναι 1760A/m. Άρα η μαγνητεγερτική δύναμη που απαιτείται είναι ίση με:

$$F_{mtr} = H_{tr} \cdot (h_r + h_{or} + d_{SL}) = 1760 \cdot A/m \cdot (25,4 + 0,5 + 9,92) \cdot 10^{-3} m = 63,04At$$

Η τιμή που υπολογίσαμε είναι σχεδόν ίση με τη 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 έως 1,7T. Επιλέγοντας τιμή ίση με 1,6T έχουμε:

$$h_{cr} = \frac{\Phi}{2} \cdot \frac{1}{L \cdot B_{cr}} = \frac{11,09 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{1}{0,186 \cdot 1,6T} = 18,63mm$$

### 2.3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ

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

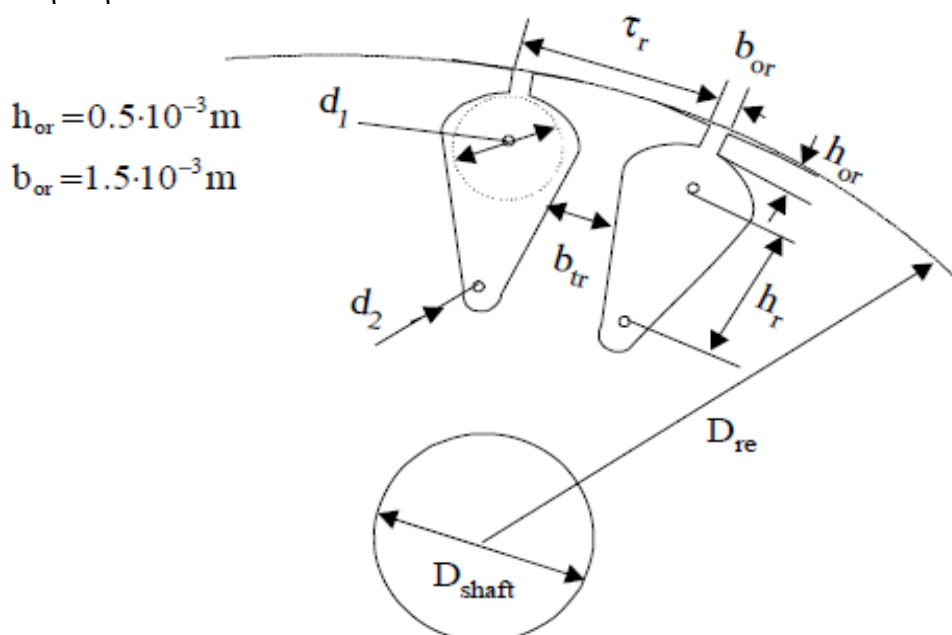
$$D_{shaft} \leq D_{is} - 2 \cdot (h_r + h_{or} + h_{cr}) - 2 \cdot g$$

$$\Rightarrow D_{shaft} \leq 158 - 2 \cdot (25,4 + 0,5 + 18,63) - 2 \cdot 0,4 = 68,14mm$$

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

$$T = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{15000W}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot (1 - 0,02)} = 97,5Nm$$

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





Εικόνα 7. Γενική μορφή του δρομέα και του άξονα του.

## 2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

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 (βλέπε και εικόνα 5):

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

Όπου  $K_c$  είναι ο συντελεστής Carter για τον οποίο είχαμε μέχρι τώρα θεωρήσει μια τυπική τιμή ίση με 1,2. Τώρα που γνωρίζουμε τις διαστάσεις του κινητήρα μπορούμε να του 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

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{5 \cdot g + b_{os}} = \frac{2,5^2}{5 \cdot 0,4 + 2,5} = 1,38$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5 \cdot g + b_{or}} = \frac{1,5^2}{5 \cdot 0,4 + 1,5} = 0,64$$

Άρα

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} = \frac{13,7}{13,7 - 1,38} = 1,11$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_s - \gamma_2} = \frac{17,62}{17,62 - 0,64} = 1,04$$

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1,11 \cdot 1,04 = 1,15$$

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

Για  $B_{cs}=1,5T$  και  $B_{cr}=1,6T$  από τον πίνακα 3 οι εντάσεις του μαγνητικού πεδίου στον στάτη και στον δρομέα είναι  $H_{cs}=1340A/m$  και  $H_{cr}=2460A/m$  αντίστοιχα.

$$F_{mcs} = C_{cs} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{out} - h_{cs})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cs} = 0,35 \cdot \frac{\pi \cdot (255 - 20) \cdot 10^{-3}}{4} \cdot 1340 = 86,51At$$

$$F_{mcr} = C_{cr} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{shaft} + h_{cr})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cr} = 0,316 \cdot \frac{\pi \cdot (68,14 + 18,63) \cdot 10^{-3}}{4} \cdot 2460 = 52,95At$$

Όπου:

$$C_{cs} = 0,88 \cdot e^{(-0,4 \cdot 1,5^2)} = 0,35$$

$$C_{cr} = 0,88 \cdot e^{-0,4 \cdot 1,6^2} = 0,316$$

Οπότε:

$$\begin{aligned} F_{1m} &= 2 \cdot \left( K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} + F_{mts} + F_{mtr} + F_{mcs} + F_{mcr} \right) \\ &= 2 \cdot \left( 1,15 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,65}{1,256 \cdot 10^{-6}} + 63,36 + 63,04 + 86,51 + 52,95 \right) \\ &= 1007,83At \end{aligned}$$

Ο συντελεστής  $1+K_{st}$  είναι:

$$1 + K_s = \frac{F_{1m}}{2 \cdot F_{mg}} = \frac{1007,83}{496,8} = 2,02$$

Εφόσον υπολογίσαμε την ολική μαγνητεργετική δύναμη μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα μαγνήτισης, ο οποίος δίνεται από την σχέση:

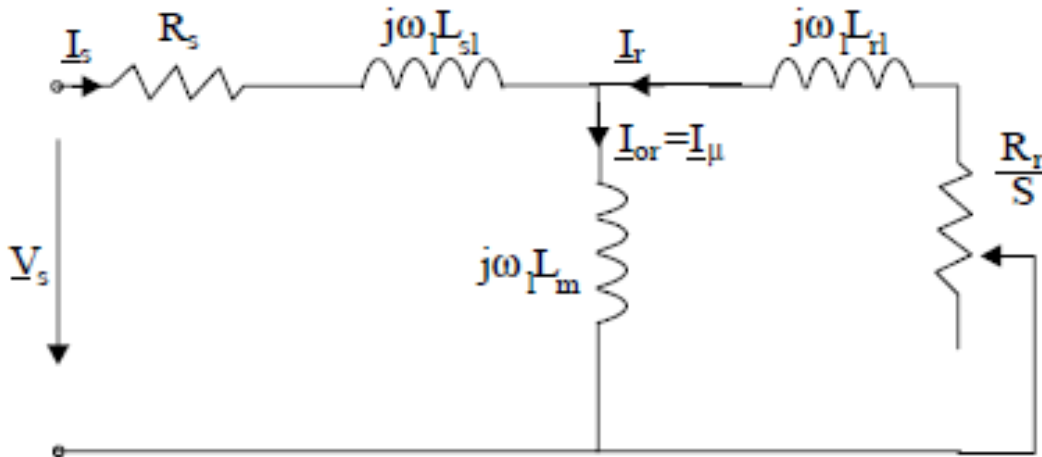
$$I_\mu = \frac{\pi \cdot p_i \cdot \left( \frac{F_{1m}}{2} \right)}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot W_i \cdot K_{wi}} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot \left( \frac{1007,83}{2} \right)}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 170 \cdot 0,96} = 4,57A$$

$$i_\mu = \frac{I_\mu}{I_{ov}} = \frac{4,57}{28,09} = 0,163 = 16,3\%$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα είναι το παρακάτω:



Στο παραπάνω ισοδύναμο δεν εμφανίζεται η ωμική αντίσταση  $R_{fe}$  που αντιστοιχεί στις απώλειες σιδήρου. Η ωμική αντίσταση (ανά φάση) του στάτη δίνεται από τη 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 τα αυλάκια του στάτη. Το μήκος  $l_{end}$  για μηχανές 4 πόλων δίνεται προσεγγιστικά από την σχέση:

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

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

$$\frac{y}{\tau} = \frac{7}{9} \Rightarrow y = \frac{7}{9} \cdot \tau = \frac{7}{9} \cdot 0,124m = 0,0964m$$

Άρα:

$$l_{end} = 2 \cdot y - 0,02m = 2 \cdot 0,0964 - 0,02 = 0,172m$$

Η ειδική αντίσταση του χαλκού στους  $20^\circ\text{C}$  είναι  $1,78 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ . Στους  $80^\circ\text{C}$  (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:

$$l_c = 2 \cdot (L + l_{end}) = 2 \cdot (0,186 + 0,172) = 0,716 m$$

**Η αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη θα είναι ίση με:**

$$R_S = \rho_{CO} \cdot \frac{l_c \cdot W_i}{A_{CO} \cdot a_i} = 2,17 \cdot 10^{-8} \Omega m \cdot \frac{0,716 m \cdot 170}{5,61 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot 1} = 0,47 \Omega$$

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

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

Στην παραπάνω σχέση ο συντελεστής  $K_R$  ονομάζεται skin effect resistance coefficient. Η ειδική αντίσταση του αλουμινίου στους  $20^\circ C$  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:

$$b = h_r + h_{or} + d_{SL} = 25,4 + 0,5 + 9,92 = 35,82 mm$$

$$D_{er} = D_{re} - 3,5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot g = 0,158 - 0,0035 - 2 \cdot 0,4 = 0,1537 m$$

Συνεπώς το μήκος του τομέα του δακτυλίου βραχυκύκλωσης θα είναι:

$$l_{er} = \frac{\pi \cdot (D_{er} - b)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (153,7 - 35,82) \cdot 10^{-3}}{28} = 13,22 \cdot 10^{-3} m$$

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:

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

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s} = 79,5m^{-1} \cdot 0,0254m \cdot 1 = 2,0193$$

Άρα η αντίσταση του δρομέα στους 80°C θα είναι ίση με:

$$\begin{aligned} \rho_{Al} = \rho_{80} &= \rho_{20} \cdot \left(1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20)\right) = 3,1 \cdot 10^{-8} \cdot \left(1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20)\right) \\ &= 3,78 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{be}^{80} &= \rho_{Al} \cdot \left[ \frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi P_1}{N_r}\right)} \right] \\ &= 3,78 \cdot 10^{-8} \cdot \left[ \frac{0,186 \cdot 2,0193}{251,9 \cdot 10^{-6}} + \frac{13,22 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 707,85 \cdot 10^{-6} \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{28}\right)} \right] \\ &= 0,6349 \cdot 10^{-4} \Omega \end{aligned}$$

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

$$R_2 = \frac{4 \cdot m}{N_r} \cdot (W_i \cdot K_{w1})^2 \cdot R_{be}^{80} = \frac{4 \cdot 3}{28} \cdot (170 \cdot 0,96)^2 \cdot 0,6349 \cdot 10^{-4} \Omega = 0,724 \Omega$$

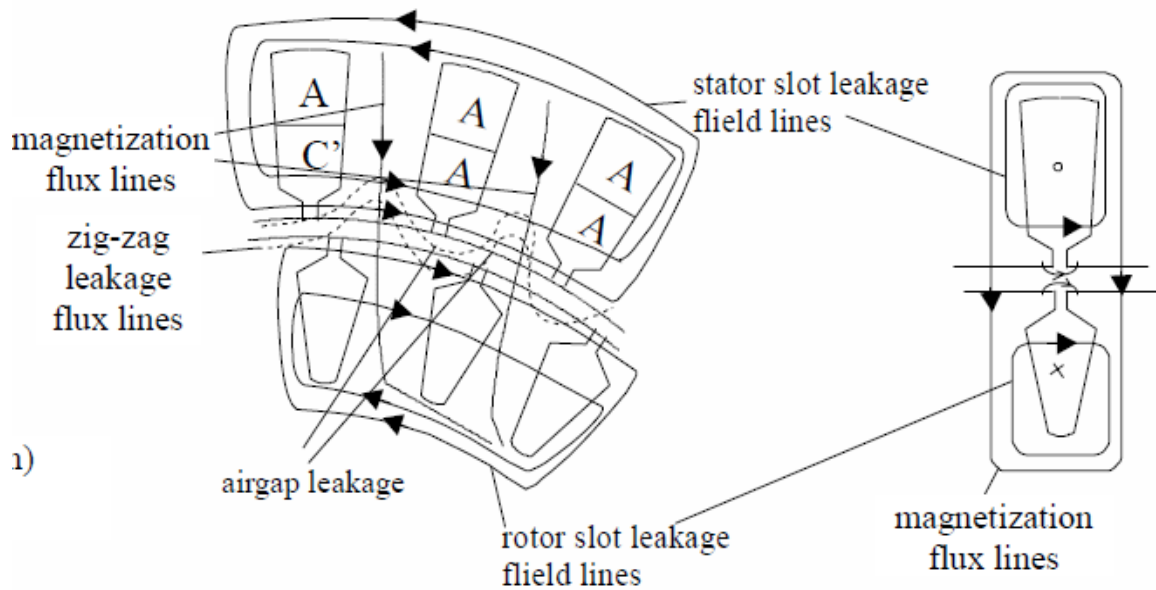
### 3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ

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



Εικόνα 8. 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 αυλακιών του στάτη (βλέπε εικόνα 4). Αντικαθιστώντας τις τιμές στην παραπάνω εξίσωση έχουμε:

$$\begin{aligned} \lambda_s &= \left[ \frac{2}{3} \cdot \frac{h_s}{(b_{s1} + b_{s2})} + \frac{2 \cdot h_w}{(b_{os} + b_{s1})} + \frac{h_{os}}{b_{os}} \right] \cdot \left( \frac{1 + 3\beta}{4} \right) \\ &= \left[ \frac{2}{3} \cdot \frac{34,5}{8,07 + 14} + \frac{2 \cdot 1}{2,5 + 8,07} + \frac{0,5}{2,5} \right] \cdot \left( \frac{1 + 3 \cdot 7/9}{4} \right) = 1,192 \end{aligned}$$

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:

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

$$C_s = 1 - 0,033 \cdot \frac{b_{os}^2}{g \cdot \tau_s} = 1 - 0,033 \cdot \frac{2,5^2}{0,4 \cdot 13,7} = 0,962$$

Και

$$\lambda_{ds} = \frac{0,9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_{w1}^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{st})} = \frac{0,9 \cdot 13,7 \cdot 10^{-3} \cdot 3^2 \cdot 0,96^2 \cdot 0,962 \cdot 1,15 \cdot 10^{-2}}{1,15 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2,02} = 1,217$$

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

$$\lambda_{er} = 0,67 \cdot \frac{q}{L} \cdot (l_{end} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0,67 \cdot \frac{3}{0,186} \cdot \left(0,172 - 0,64 \cdot \frac{7}{9} \cdot 0,124\right) \Rightarrow \lambda_{ec} = 1,19$$

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

$$\begin{aligned} X_{SL} &= 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_1 \cdot L \cdot \frac{W_i^2}{p_1 \cdot q} \cdot (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{er}) \\ &= 2 \cdot 1,126 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,186 \cdot \frac{170^2}{2 \cdot 3} \cdot (1,192 + 1,217 + 1,19) \\ &= 2,28\Omega \end{aligned}$$

Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα (δεν είναι ανηγμένη 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

$$\lambda_r = 0,66 + \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot d_{SL}} + \frac{h_{or}}{b_{or}} = 0,66 + \frac{2 \cdot 25,4}{3 \cdot 9,92} + \frac{0,5}{1,5} = 2,69$$

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

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

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

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

Άρα:

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} \cdot \left(\frac{N_r}{6 \cdot p_i}\right)^2 = \frac{0,9 \cdot 17,62 \cdot 1,653 \cdot 10^{-2}}{1,15 \cdot 0,4} \cdot \left(\frac{28}{6 \cdot 2}\right)^2 = 3,1$$

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  $D_{er}=0,1537m$  και το  $b$  (το βάθος του δακτυλίου βραχυκύκλωσης) είναι ίσο με:

$$b = h_r + h_{or} + d_{SL} = 25,4 + 0,5 + 9,92 = 35,82mm$$

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

$$\alpha = \frac{A_{er}}{b} = \frac{707,85mm^2}{35,82mm} = 19,76mm$$

Άρα:

$$\begin{aligned} \lambda_{er} &= \frac{2,3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r}\right)} \cdot \log\left[\frac{4,7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a}\right] \\ &= \frac{2,3 \cdot (153,7 - 35,82)}{28 \cdot 186 \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{28}\right)} \cdot \log\left[\frac{4,7 \cdot (153,7 - 35,82)}{35,82 + 2 \cdot 19,76}\right] = 0,227 \end{aligned}$$

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

$$K_x = \frac{3 \cdot [\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)]}{2 \cdot \xi \cdot [\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)]} = \frac{3 \cdot (28,36 + 0,78)}{2 \cdot 2,0193 \cdot (28,38 + 0,623)} = 0,746$$

Στην παραπάνω σχέση το  $\xi=2,0193$ .

**Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι ίση με:**

$$\begin{aligned} X_{be} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 0,186 \cdot (2,69 \cdot 0,746 + 3,1 + 0,227) \\ &= 3,91 \cdot 10^{-4} \Omega \end{aligned}$$

**Η ανοιγμένη στο στάτη επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι:**



$$X_2 = 4 \cdot m \cdot \frac{(W_1 \cdot K_{w1})^2}{N_r} \cdot X_{be} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(170 \cdot 0,96)^2}{28} \cdot 3,91 \cdot 10^{-4} \Omega = 4,46 \Omega$$

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

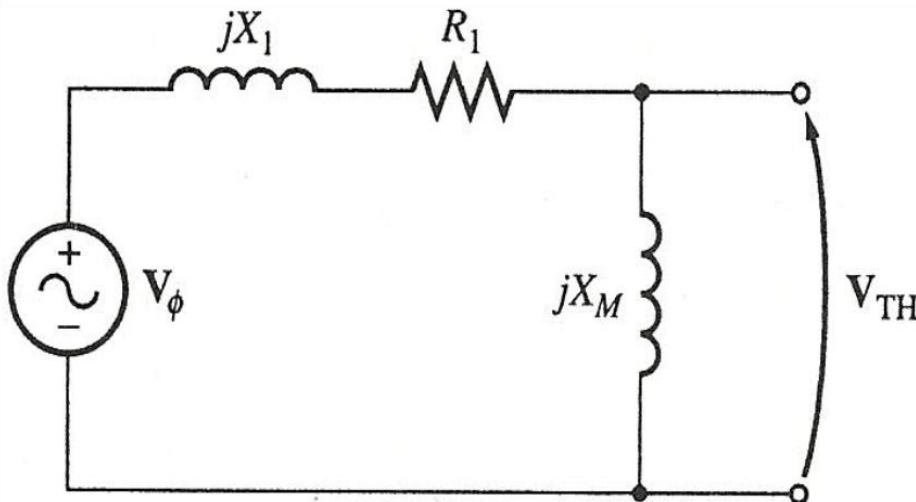
Απομένει ο υπολογισμός της αντίδρασης μαγνήτισης από τη σχέση:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{ph}}{I_\mu}\right)^2 - R_s^2 - X_{sl}} = \sqrt{\left(\frac{400}{4,57}\right)^2 - 0,47^2 - 2,28} = 85,24 \Omega$$

### 3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ $V_{TH}$ ΚΑΙ $R_{TH}$

Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε την τάση Thevenin ( $V_{TH}$ ) και την αντίσταση Thevenin ( $R_{TH}$ )

Αυτά τα στοιχεία θα πρέπει να υπολογιστούν για να μπορέσουμε να κατασκευάσουμε την χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα.



Εικόνα 9. Η ισοδύναμη τάση κατά Thevenin του κυκλώματος εισόδου ενός επαγωγικού κινητήρα.

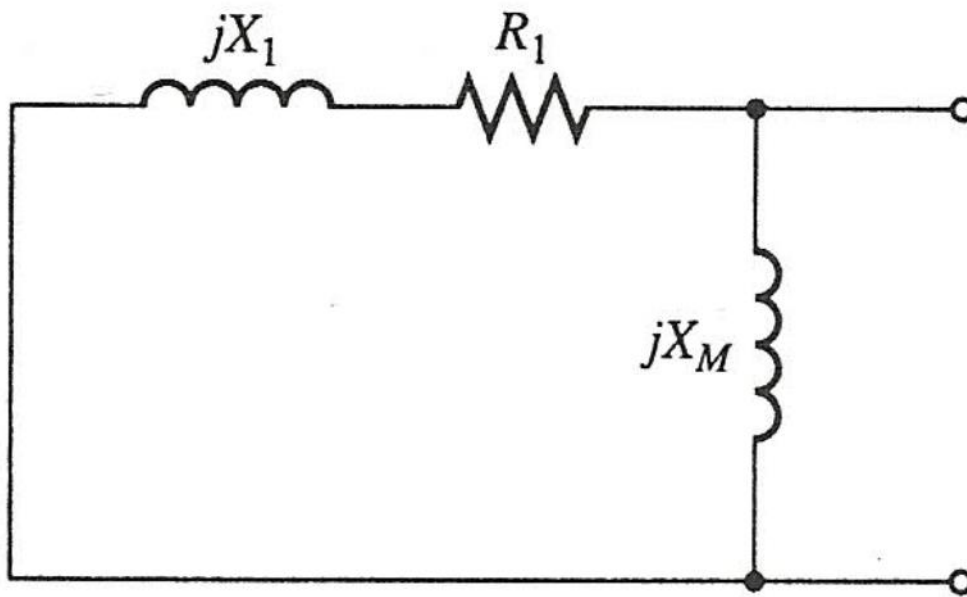
Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται τα ανοικτά άκρα του κυκλώματος ως προς τα οποία υπολογίζεται η τάση Thevenin από την σχέση:

$$V_{TH} = V_{ph} \cdot \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}}$$

$$V_{TH} = 400 \cdot \frac{85,24}{\sqrt{0,47^2 + (2,28 + 85,24)^2}} = 389,5V$$

Η αντίσταση  $R_{TH}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{TH} = R_1 \cdot \left( \frac{X_m}{X_1 + X_m} \right)^2 = 0,47 \cdot \left( \frac{85,24}{2,28 + 85,24} \right)^2 = 0,445\Omega$$



Εικόνα 10. Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση κατά Thevenin του κυκλώματος εισόδου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

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

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{ov}^2 \cdot R_s = 3 \cdot \left(\frac{28,09}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot 0,47W = 370,85W$$

Απώλειες στον δρομέα:

$$P_{Al} = 3 \cdot I_{rn}^2 \cdot R_r = 3 \cdot K_f^2 \cdot I_n^2 \cdot R_r = 3 \cdot 0,877^2 \cdot \left(\frac{28,09}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot 0,724 = 439,38W$$

Οι μηχανικές απώλειες υπολογίζονται προσεγγιστικά από την εμπειρική σχέση:

$$P_{MHX} = 0,008 \cdot P_{ov} = 0,008 \cdot 15000W = 120W$$

Οι κατανεμημένες απώλειες υπολογίζονται και αυτές εμπειρικά από τη σχέση:

$$P_{KAT} = 0,01 \cdot 15000W = 150W$$

Οι απώλειες σιδήρου εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στον στάτη γιατί στον δρομέα η συχνότητα του ρεύματος είναι πολύ μικρή. Οι απώλειες σιδήρου στο στάτη χωρίζονται σε απώλειες στα «δόντια» (ανάμεσα στα λούκια)  $p_{t1}$  (stator teeth fundamental losses) και στο πυρήνα που βρίσκεται πίσω (πάνω) από τα λούκια  $p_{y1}$  (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  $K_t$  είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από την ποιότητα του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα και παίρνει τιμές (1,6-1,8). Η παράμετρος  $G_{t1}$  είναι το βάρος των δοντιών του πυρήνα (stator tooth weight) και υπολογίζεται από τη σχέση:

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

$$\Rightarrow G_{t1} = 7800 \cdot 28 \cdot 5,97 \cdot 10^{-3} \cdot (34,5 + 1 + 0,5) \cdot 10^{-3} \cdot 0,186 \cdot 0,96 = 8,38 \text{kg}$$

$$p_{t1} = K_t \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts}^{1,7} \cdot G_{t1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,55^{1,7} \cdot 8,38 \text{ W} = 102,67 \text{ W}$$

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:

$$\begin{aligned} G_{y1} &= \gamma_{iron} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [D_{out}^2 - (D_{out} - 2 \cdot h_{cs})^2] \cdot L \cdot K_{Fe} \\ \Rightarrow G_{y1} &= 7800 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [0,27^2 - (0,27 - 2 \cdot 0,02)^2] \cdot 0,186 \cdot 0,96 \Rightarrow G_{y1} = 21,86 \text{kg} \end{aligned}$$

Άρα οι απώλειες στον υπόλοιπο πυρήνα θα είναι:

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{cs}^{1,7} \cdot G_{y1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,55^{1,7} \cdot 21,86 \text{ W} = 267,84 \text{ W}$$

Οι συνολικές απώλειες σιδήρου θα είναι ίσες με:

$$P_{fe} = 102,67 + 267,84 \text{ W} = 370,51 \text{ W}$$

**Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα θα είναι:**

$$\begin{aligned} P_{\alpha\pi} &= P_{cu} + P_{Al} + P_{fe} + P_{MHX} + P_{KAT} = 370,85 + 439,38 + 120 + 150 + 370,51 \text{ W} \\ &= 1450,74 \text{ W} \end{aligned}$$

**Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα θα είναι:**

$$\eta = \frac{15000 \text{ W}}{15000 + 1450,74 \text{ W}} \cdot 100\% = 0,911 \cdot 100\% = 91,1\%$$

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **5.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ**

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

$$I_0 = \frac{P_{fe} + P_{MHX} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot R_s}{3 \cdot V_{ph}} = \frac{370,51 + 120 + 3 \cdot 4,57^2 \cdot 0,47}{3 \cdot 400} = 0,43A$$

Η ολίσθηση υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_{Al} = s \cdot P_{AG} \Rightarrow s = \frac{P_{Al}}{P_{AG}} = \frac{439,38W}{15000 + 439,38 + 120 + 150W} = 0,027 = 2,7\%$$

$$n_m = (1 - s)n_{sync} = (1 - 0,027)1500 = 1459,5 \text{ rpm}$$

Η ονομαστική ροπή είναι ίση με:

$$T_n = \frac{15000W}{2\pi \cdot \frac{50}{2} (1 - 0,027)} = \frac{15000}{152,761} = 98,19Nm$$

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:

$$C_1 = 1 + \frac{X_{sl}}{X_m} = 1 + \frac{2,28}{85,24} = 1,026$$

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

$$\begin{aligned} T_{bk} &= \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}} \\ &= \frac{3 \cdot 2}{2 \cdot 2\pi \cdot 50} \cdot \frac{400^2}{(0,47 + \sqrt{0,47^2 + (2,28 + 1,026 \cdot 4,46)^2}} = 208,2Nm \end{aligned}$$

Το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα είναι ίσο με:

$$I_{LR} = \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2}} = \frac{400}{\sqrt{(0,47 + 0,724)^2 + (2,28 + 4,46)^2}} = 58,44A$$

Η ροπή εκκίνησης είναι ίση με:

$$T_{LR} = \frac{3 \cdot I_{LR}^2 \cdot R_r}{\omega_s} \cdot p_i = \frac{3 \cdot 58,44^2 \cdot 0,724}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot 2 = 47,24Nm$$

Τέλος ο συντελεστής ισχύος της μηχανής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos\varphi = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_{ph} \cdot I_n \cdot \eta} = \frac{15000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 28,09 \cdot 0,911} = 0,846$$

## 5.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Έχοντας υπολογίσει παραπάνω τις τιμές των αντιστάσεων και τις επαγωγικές αντιδράσεις του κινητήρα καθώς και την τάση με την αντίσταση κατά Thevenin, περνάμε στο τελευταίο κομμάτι της μελέτης όπου είναι η κατασκευή της χαρακτηριστικής λειτουργίας του κινητήρα.

Θα χρησιμοποιήσουμε για ταχύτητα  $n_m=1471rpm$  (βλέπε παράρτημα).

Άρα θα πρέπει να υπολογίσουμε την επαγόμενη ροπή ( $\tau_{ind}$ ) για διάφορες τιμές της ολίσθησης, όπως και την ροπή ανατροπής ( $\tau_{max}$ ).

Ο τύπος της επαγόμενης ροπής είναι:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}}$$

Όπου  $P_{AG}$  είναι η ισχύς που διέρχεται από το κύκλωμα του στάτη στο κύκλωμα του δρομέα μέσω του διακένου και υπολογίζεται:

$$P_{AG} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}$$

Οπότε:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left( \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right)}$$

Για s=1 n<sub>m</sub>=0

$$\begin{aligned} \tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left( \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right)} \\ &= \frac{3 \cdot 389,5^2 \cdot 0,724}{2\pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left( (0,445 + 0,724)^2 + (2,28 + 4,46)^2 \right)} = 44,86Nm \end{aligned}$$

**Αυτή είναι και η ροπή εκκίνησης.**

Για s=0,9 n<sub>m</sub>=150rpm

$$\begin{aligned} \tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left( \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right)} \\ &= \frac{3 \cdot 389,5^2 \cdot \frac{0,724}{0,9}}{2\pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left( \left(0,445 + \frac{0,724}{0,9}\right)^2 + (2,28 + 4,46)^2 \right)} = 49,63Nm \end{aligned}$$

Για s=0,8 n<sub>m</sub>=300rpm

$$\begin{aligned} \tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left( \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right)} \\ &= \frac{3 \cdot 389,5^2 \cdot \frac{0,724}{0,8}}{2\pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left( \left(0,445 + \frac{0,724}{0,8}\right)^2 + (2,28 + 4,46)^2 \right)} = 55,53Nm \end{aligned}$$

Για s=0,7 n<sub>m</sub>=450rpm

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left(\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2\right)}$$

$$= \frac{3 \cdot 389,5^2 \cdot \frac{0,724}{0,7}}{2\pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left(\left(0,445 + \frac{0,724}{0,7}\right)^2 + (2,28 + 4,46)^2\right)} = 62,97Nm$$

Για s=0,6 n<sub>m</sub>=600rpm

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left(\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2\right)}$$

$$= \frac{3 \cdot 389,5^2 \cdot \frac{0,724}{0,6}}{2\pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left(\left(0,445 + \frac{0,724}{0,6}\right)^2 + (2,28 + 4,46)^2\right)} = 72,65Nm$$

Για s=0,5 n<sub>m</sub>=750rpm

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left(\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2\right)}$$

$$= \frac{3 \cdot 389,5^2 \cdot \frac{0,724}{0,5}}{2\pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left(\left(0,445 + \frac{0,724}{0,5}\right)^2 + (2,28 + 4,46)^2\right)} = 85,66Nm$$

Για s=0,4 n<sub>m</sub>=900rpm

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left(\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2\right)}$$

$$= \frac{3 \cdot 389,5^2 \cdot \frac{0,724}{0,4}}{2\pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left(\left(0,445 + \frac{0,724}{0,4}\right)^2 + (2,28 + 4,46)^2\right)} = 103,89Nm$$

Για s=0,3 n<sub>m</sub>=1050rpm



$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left( \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right)}$$

$$= \frac{3 \cdot 389,5^2 \cdot \frac{0,724}{0,3}}{2\pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left( \left(0,445 + \frac{0,724}{0,3}\right)^2 + (2,28 + 4,46)^2 \right)} = 130,54 Nm$$

Για  $s=0,2$   $n_m=1200rpm$

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left( \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right)}$$

$$= \frac{3 \cdot 389,5^2 \cdot \frac{0,724}{0,2}}{2\pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left( \left(0,445 + \frac{0,724}{0,2}\right)^2 + (2,28 + 4,46)^2 \right)} = 169,41 Nm$$

Για  $s=0,1$   $n_m=1350rpm$

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left( \left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right)}$$

$$= \frac{3 \cdot 389,5^2 \cdot \frac{0,724}{0,1}}{2\pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left( \left(0,445 + \frac{0,724}{0,1}\right)^2 + (2,28 + 4,46)^2 \right)} = 200,88 Nm$$

**Η ολίσθηση ανατροπής είναι:**

$$S_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} = \frac{0,724}{\sqrt{0,445^2 + (2,28 + 4,46)^2}} = 0,107$$

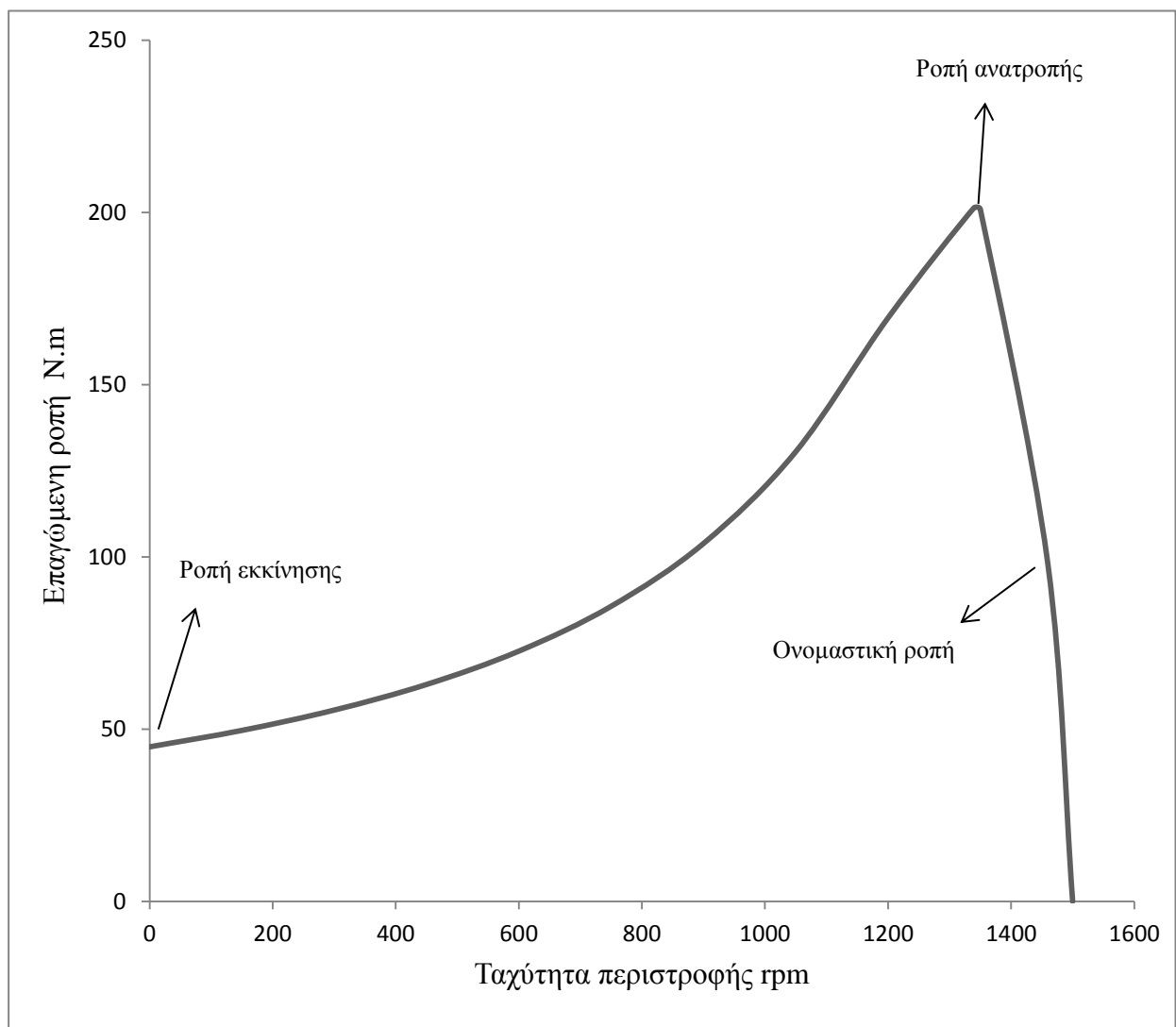
$$n_m = (1 - 0,107) \cdot 1500 = 1339,5 rpm$$

**Η ροπή ανατροπής είναι:**

$$\tau_{max} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2}{2 \cdot \omega_{sync} \left[ R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right]}$$

$$= \frac{3 \cdot 389,5^2}{2 \cdot 2\pi \cdot \frac{1500}{60} \left[ 0,445 + \sqrt{0,445^2 + (2,28 + 4,46)^2} \right]} = 201,33 Nm$$

Οπότε η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας είναι :



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Ολοκληρώνοντας την μελέτη είναι χρήσιμο να συγκρίνουμε τις τιμές που υπολογίστηκαν με αυτές της εταιρίας του Βαλιάδη (βλέπε παράρτημα). Θα πρέπει να τονιστεί ότι πολλά από τα στοιχεία του κινητήρα της εταιρίας του Βαλιάδη βρέθηκαν κατά την σχεδίαση του κινητήρα (πειραματικά), οπότε είναι λογικό να υπάρχουν σε συγκεκριμένα στοιχεία αποκλίσεις.

Ξεκινώντας από το ισοδύναμο κύκλωμα παρατηρούμε ότι είμαστε πολύ κοντά στην τιμή της αντίστασης του στάτη ( $R_s$ ), σε σχέση με αυτή της εταιρίας.

Παρακάτω συγκρίνοντας τον βαθμό απόδοσης και τον συντελεστή ισχύος βλέπουμε ότι συμπίπτουμε πλήρως πράγμα που σημαίνει ότι οι συνολικές απώλειες του κινητήρα που υπολογίσαμε είναι σωστοί, άσχετα αν είναι διαφορετικά κατανομημένες.

Η ολίσθηση που υπολογίσαμε είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή που μας δίνει η εν λόγω εταιρία όμως είναι αποδεκτή, επομένως και η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα υπολογιστικά είναι μικρότερη .

Αυτή η μικρή διαφορά μπορεί να οφείλεται στις απώλειες αλουμινίου ( $P_{al}$ ) ή στις μηχανικές και τις κατανομημένες όπου τις δύο τελευταίες τις υπολογίσαμε προσεγγιστικά.

Τέλος η ονομαστική ροπή ( $T_n$ ) που υπολογίσαμε είναι αποδεκτή, όπως και η ροπή ανατροπής ( $T_{bk}$ ) εφόσον είναι περίπου δύομισή φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική.

Το πρόβλημα παρουσιάζεται στην ροπή εκκίνησης ( $T_{LR}$ ) όπου υπολογίστηκε και έχει μικρή τιμή από την στιγμή που θα έπρεπε να είναι περίπου δύο φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική.

Όμως το πρόβλημα αυτό θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί κατά την σχεδίαση του κινητήρα (πειραματικά). Ένας τρόπος αντιμετώπισης είναι να τοποθετηθούν μικρότερες επαγωγικές αντιδράσεις ( $X_{SL}, X_2$ ), πράγμα που θα βελτίωνε και την ροπή ανατροπής.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## VALIADIS S.A.

ELECTRIC MOTOR TEST REPORT - THREE PHASE INDUCTION MOTOR

NAMEPLATE DATA		IEC TYPE	15 KW	1471 RPM
K160L-4 FRAME		3 PHASE	400 VOLTS	50 HZ / CYCLES
91,1 EFFICIENCY		28,0 AMPS	55 IP	IC411 IC
4 POLE		S1 DUTY	0,847 PF	90,6 IE2
VALIADIS MANUFACTURER		SERIAL NO.	F INS.CLASS	DELTA CONNECTION

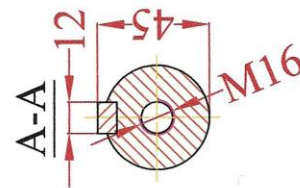
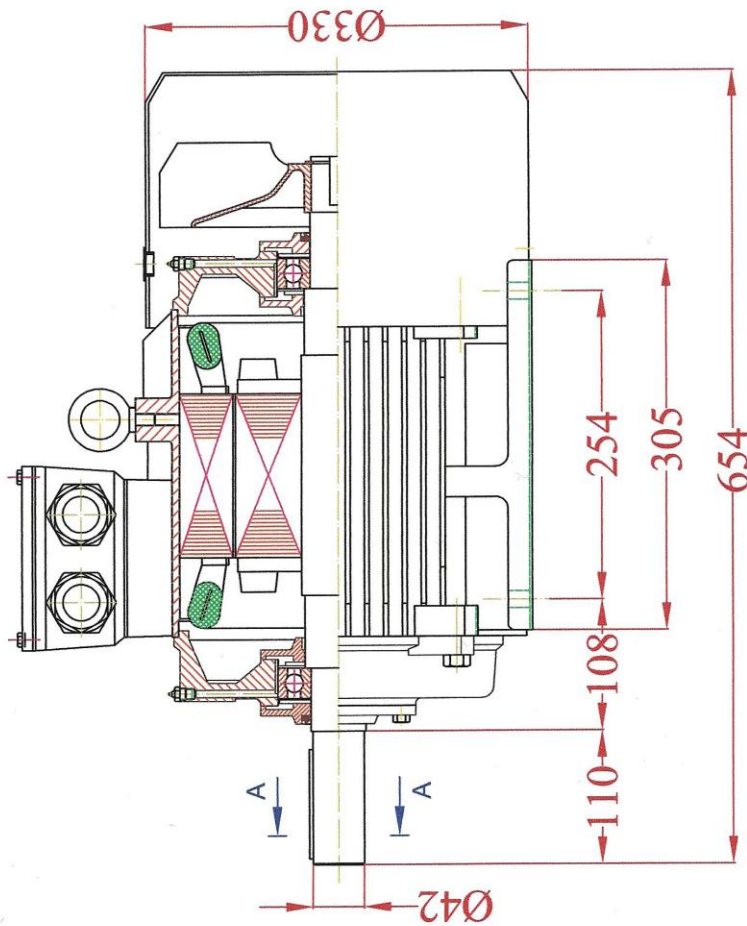
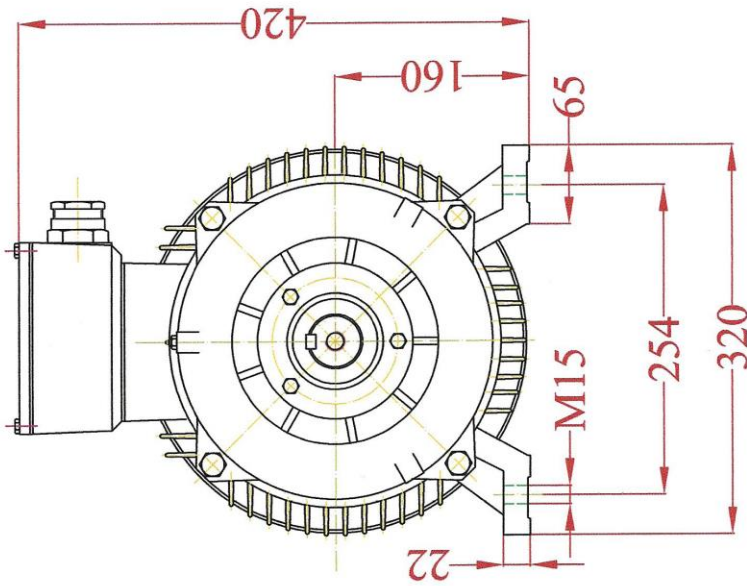
  

MAJOR CONTENTS	UNIT	TEST VALUE
STATOR RESISTANCE OF PHASE	OHM	0,5274
NO LOAD CURRENT	AMP	12,66
NO LOAD INPUT	W	690,5
CORE LOSS(Pfe)	W	519,9
WINDAGE FRICTION LOSS(Pfw)	W	89,5
STATOR WINDING LOSS(Pcu1)	W	413,0
ROTOR WINDING LOSS(Pcu2)	W	300,4
STRAY LOAD LOSS(Ps)	W	149,7
FULL LOAD CURRENT	AMP	28,07
LOCKED ROTOR CURRENT	AMP	197,71
LOCKED ROTOR CURRENT/FULL LOAD CURRENT	P.U.	7,1
LOCKED ROTOR INPUT @ FULL LOAD	kW	71,52
FULL LOAD TORQUE	N.m	97,43
LOCKED ROTOR TORQUE	N.m	211,52
LOCKED ROTOR TORQUE/FULL LOAD TORQUE	P.U.	2,17
PULL OUT TORQUE	N.m	257,0
PULL OUT TORQUE/FULL LOAD TORQUE	P.U.	2,64
EFFICIENCY @ FULL LOAD	%	91,1
EFFICIENCY @ 75% LOAD	%	90,9
POWER FACTOR @ FULL LOAD		0,85
FULL LOAD SLIP	%	1,933
FULL LOAD SPEED	r/min	1471
STATOR WINDING TEMPERATURE RISE	K	60
D.E. BEARINGS TEMPERATURE BY PT100	Deg. C	54,1
SOUND POWER LEVEL	dB(A)	71
VIBRATION	mm/s	0,9

standard methods for determining losses and efficiency from tests: pu determined from residual loss(IEC60034-2)

<b>VALIADIS S.A.</b>  K160L-4 15 kW 400 VOLTS 50 Hz	SCALE	N/A		
	DATE		REV	
	DRAWN		DOCUMENT NO.	
	APPRVD			
CHECKED				

PERFORMANCE



VALIADIS HELLENIC MOTORS		Design Number	
MOTOR TYPE K160L MOUNTING B3		Replaced from	
SCALE		Replace the	
Designed by	Date	Signature	Weight
Checked by			
Drawn by			
CHANGE	DATE	NAME	

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- STEPHEN J. CHAPMAN «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC», 3<sup>η</sup> ΕΚΔΟΣΗ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2003.
- ΣΤΕΛΙΟΣ ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ «ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ», 3<sup>η</sup> ΕΚΔΟΣΗ, ΑΘΗΝΑ.
- ION BOLDEA, SYED A. NASAR «THE INDUCTION MACHINE HANDBOOK», CRC PRESS LLC, USA 2002.
- ION BOLDEA, SYED A. NASAR «THE INDUCTION MACHINES DESIGN HANDBOOK», SECOND EDITION, CRC PRESS LLC, USA 2010.

## ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

- [HTTP://WWW.HLEKTROLOGIA.WEEBLY.COM](http://www.hlektrologia.weebly.com)
- [HTTP://LOGO.1.COMUV.COM/DOWNLOADS/KINITIRES/4.TRIFASIKO I%20ASYGXRONOI%20KINHTHRES.PDF](http://logo.1.comuv.com/downloads/kinitires/4.trifasiko%20asygxronoi%20kinhthres.pdf)

