

# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

## ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

### Διπλωματική Εργασία



Ηλεκτρομαγνητική Ανάλυση Τριφασικού Επαγωγικού

Κινητήρα Κλωβού υπό Σφάλμα Εκκεντρότητας

**Καραμπάσογλου Δημήτριος**

#### **Εξεταστική Επιτροπή**

Καθηγητής Κωνσταντίνος Γυφτάκης (Επιβλέπων)

Καθηγητής Φώτιος Καννέλος

Καθηγητής Ευτύχιος Κουτρούλης

Χανιά, Μάιος 2023



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου, για την στήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια και για την δυνατότητα που μου προσέφερε να σπουδάσω στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Με την ολοκλήρωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά την εκπόνηση της. Ευχαριστώ θερμά, τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Γυφτάκη, για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία για την ολοκλήρωση της εργασίας, διαφωτίζοντας τις όποιες απορίες μου επί του θέματος της σχεδίασης και λειτουργίας των ηλεκτρικών κινητήρων. Ιδιαίτερος ευχαριστώ επίσης τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Jorge Bonet-Jara που πρόθυμα με στήριξε κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών στοιχείων μίας ασύγχρονης μηχανής ισχύος 22kW όταν αυτή λειτουργεί υπό φορτίο και σφάλματα στατικής, δυναμικής και μεικτής εκκεντρότητας. Σκοπός είναι η ανάλυση των αποτελεσμάτων που επηρεάζονται λόγω των σφαλμάτων, σε σχέση με την υγιή επαγωγική μηχανή, ώστε να γίνει πρόληψη αυτών πριν γίνουν καταστροφικά για την μηχανή.

Αρχικά παρουσιάζεται μια λεπτομερής ανάλυση των μηχανών επαγωγής και της προσέγγισης τους με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ακολούθως παρουσιάζεται η γεωμετρία του υπό μελέτη επαγωγικού κινητήρα και η κατάλληλη προσομοίωσή του ανάλογα με τα σφάλματα σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (Ansys Maxwell). Έπειτα, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αναλύονται ώστε να γίνει ο προσδιορισμός των παραμέτρων που επηρεάζονται.

Για τη διάγνωση των σφαλμάτων χρησιμοποιήθηκε κυρίως η πλέον διαδεδομένη μέθοδος MCSA, η οποία βασίζεται στην ανάλυση του φάσματος συχνοτήτων των ρευμάτων του στάτη και παρέχει τις αρμονικές της στατικής και δυναμικής εκκεντρότητας, καθώς και τις αρμονικές που σχετίζονται με το δρομέα PSH (Principle Slot Harmonics) σε μια τριφασική επαγωγική μηχανή. Λόγω του ότι η μηχανή παράγει αρμονικές PSH που σχετίζονται με το δρομέα, έγινε επίσης χρήση της μεθόδου SFD-MCSA για τα σφάλματα στατικής εκκεντρότητας. Τέλος, έγινε χρήση της μεθόδου stray flux analysis που βασίζεται στην ανάλυση της μαγνητικής ροής στο εξωτερικό της μηχανής για τον προσδιορισμό των σφαλμάτων εκκεντρότητας.

## **ABSTRACT**

This thesis is a study of the electromagnetic components of a 22kW asynchronous machine when it operates under load and static, dynamic and mixed eccentricity faults. The purpose is to analyze the results affected by the faults, in relation to the healthy induction machine, in order to prevent them before they become destructive to the machine.

First a detailed analysis of induction machines and their finite element approach is presented. Next, the geometry of the induction motor under study is presented and also its appropriate simulation depending on the faults in a finite element program (Ansys Maxwell). Then, the results of the simulations are analyzed to determine the affected parameters.

For fault diagnosis, the most common MCSA method was mainly used, which is based on the analysis of the frequency spectrum of the stator currents and provides the harmonics of the static and dynamic eccentricity, as well as the harmonics related to the rotor PSH (Principal Slot Harmonics) in a three-phase induction machine. Due to the fact that this machine produces PSH harmonics associated with the rotor, the SFD-MCSA method was also used for the static eccentricity faults. Finally, the stray flux analysis method based on the analysis of the magnetic flux outside the machine was used to determine the eccentricity faults.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....</b>	<b>10</b>
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ.....	10
1.1 Εισαγωγή.....	10
1.2 Ιστορική Αναδρομή .....	10
1.3 Διαμόρφωση ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής .....	11
1.3.1 Στάτης.....	12
1.3.2 Δρομέας .....	13
1.4 Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.....	15
1.4.1 Ταχύτητα επαγωγικής μηχανής.....	15
1.4.2 Περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.....	16
1.5 Ηλεκτρομαγνητική δομή του επαγωγικού κινητήρα .....	20
1.6 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα .....	23
1.7 Απώλειες επαγωγικού κινητήρα.....	26
1.8 Ισχύς και ροπή επαγωγικού κινητήρα .....	28
1.9 Χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής .....	29
1.10 Υπολογισμός ροπής επαγωγικών κινητήρων.....	31
1.11 Κλάσεις των επαγωγικών κινητήρων.....	34
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....</b>	<b>39</b>
Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	39
2.1 Εισαγωγή.....	39
2.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	39
2.3 Οι εξισώσεις των πεπερασμένων στοιχείων.....	41
2.4 Οριακές συνθήκες.....	43
2.4.1 Οριακή συνθήκη Dirichlet .....	43
2.4.2 Οριακή συνθήκη Neumann .....	44
2.4.3 Οριακή συνθήκη Robin.....	44
2.4.4 Περιοδική και Αντιπεριοδική Οριακή συνθήκη.....	44
2.5 Υλοποίηση των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων .....	44
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....</b>	<b>47</b>
ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΥΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ .....	47
3.1 Εισαγωγή.....	47
3.2 Στατική εκκεντρότητα .....	47
3.3 Δυναμική εκκεντρότητα .....	48
3.4 Μεικτή εκκεντρότητα.....	48
3.5 Μέθοδοι προσδιορισμού σφαλμάτων εκκεντρότητας .....	49
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>	<b>52</b>
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	52
4.1 Εισαγωγή.....	52
4.2 Επαγωγικός Διπολικός Κινητήρας Ισχύος 22kW .....	52
4.2.1 Ονομαστικά χαρακτηριστικά.....	52
4.2.2 Γεωμετρία επαγωγικού κινητήρα.....	52

4.2.3 Τύλιγμα στάτη .....	54
4.3 Υλοποίηση του επαγωγικού κινητήρα στο πρόγραμμα <i>femm</i> .....	56
4.3.1 Σχεδίαση στάτη .....	56
4.3.2 Σχεδίαση δρομέα .....	57
4.3.3 Διάκενο αέρος.....	57
4.3.4 Οριακές συνθήκες .....	58
4.3.5 Πλέγμα .....	60
4.4 Προσομοίωση .....	60
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....</b>	<b>64</b>
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑΣ.....	64
ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	64
5.1 Εισαγωγή.....	64
5.2 Υλοποίηση του επαγωγικού κινητήρα στο πρόγραμμα <i>Ansys Maxwell</i> .....	64
5.2.1 Προσομοίωση.....	64
5.3 Στατική Εκκεντρότητα .....	70
5.3.1 Μέθοδος MCSA.....	70
5.3.2 Μέθοδος Stray Flux Analysis .....	77
5.3.3 Μέθοδος SFD-MCSA.....	80
5.4 Δυναμική Εκκεντρότητα.....	84
5.4.1 Μέθοδος MCSA.....	84
5.4.2 Μέθοδος Stray Flux Analysis .....	92
5.5 Μεικτή Εκκεντρότητα.....	94
5.5.1 Μέθοδος MCSA.....	94
5.5.2 Μέθοδος Stray Flux Analysis .....	105
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....</b>	<b>108</b>
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	108
6.1 Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας .....	108
6.2 Κυριότερα Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων.....	108
6.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα .....	109
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>112</b>





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

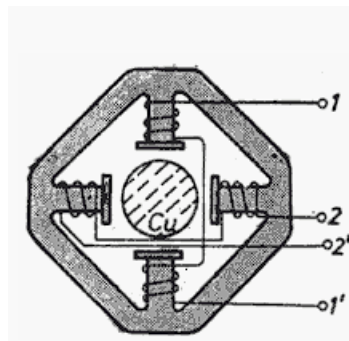
### 1.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, τις σύγχρονες μηχανές και τις ασύγχρονες μηχανές ή μηχανές επαγωγής. Το ρεύμα διέγερσης των σύγχρονων μηχανών παράγεται από ανεξάρτητες πηγές συνεχούς ρεύματος, ενώ το ρεύμα διέγερσης των επαγωγικών μηχανών παράγεται επαγωγικά (αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή) στα τυλίγματα διέγερσης τους.

Οι επαγωγικές μηχανές αποτελούν τις πιο διαδεδομένες μηχανές στη βιομηχανία, στα συστήματα κίνησης και στις περισσότερες οικιακές εφαρμογές. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι η ευκολία του σχεδιασμού και κατασκευής τους, το χαμηλό κόστος, η ελάχιστη συντήρηση και η απευθείας σύνδεση τους στο εναλλασσόμενο δίκτυο. Η επαγωγική μηχανή μπορεί να λειτουργεί ως κινητήρας και ως γεννήτρια, όμως εξαιτίας των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν όταν λειτουργούν ως γεννήτριες, χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ως κινητήρες.

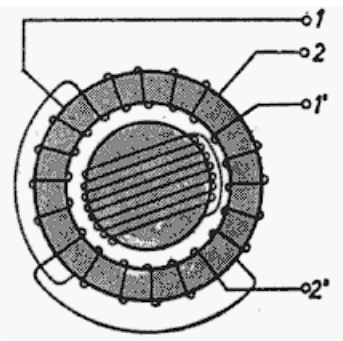
### 1.2 Ιστορική Αναδρομή

Ο Faraday ανακάλυψε το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής το 1831 και ο Maxwell διατύπωσε τους νόμους της ηλεκτρικής ενέργειας (ή εξισώσεις Maxwell) το 1860. Υπήρχαν οι συνθήκες λοιπόν για την εφεύρεση της επαγωγικής μηχανής που έγινε από δύο ανθρώπους που δούλευαν παράλληλα, τον Galileo Ferraris (1885) και τον Nicola Tesla (1886). Οι επαγωγικές μηχανές τους εμφανίζονται στο σχήμα 1.1 και σχήμα 1.2.



1.1 Ferrari's induction Motor

Σχήμα 1.1

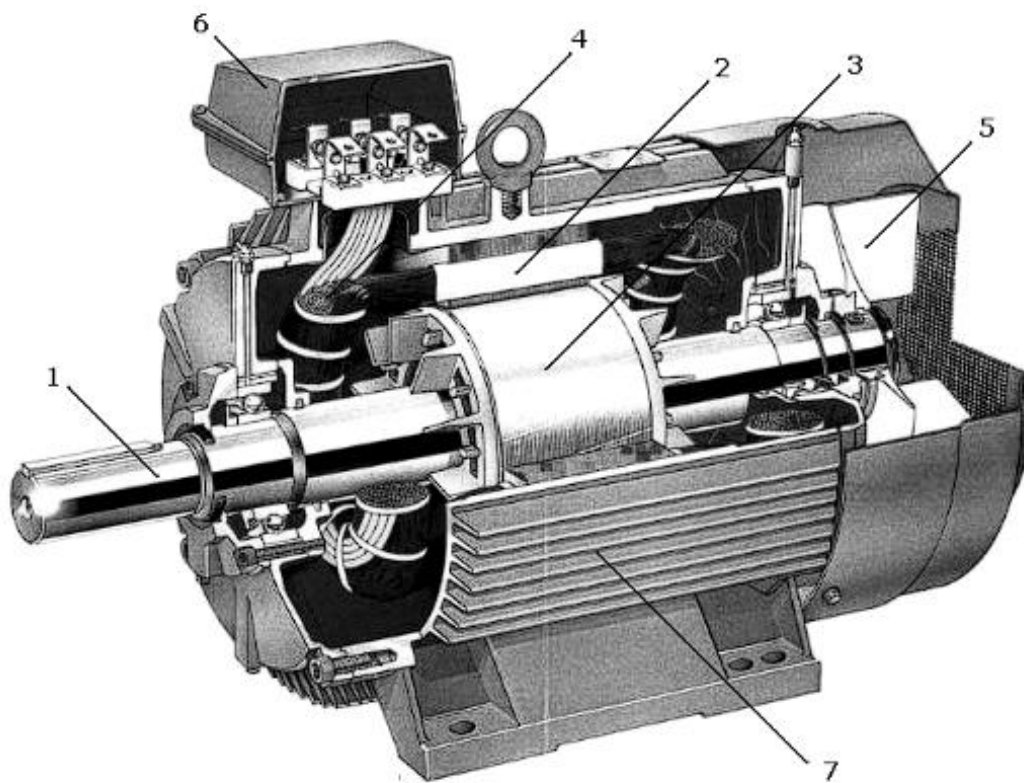


1.2 Tesla's induction Motor

Σχήμα 1.2

Οι δύο κινητήρες τροφοδοτούνταν από μία διφασική εναλλασσόμενη πηγή τάσης και έτσι υπήρχαν δύο συγκεντρωμένες περιελίξεις πηνίων (1-1' και 2-2') στον πυρήνα του σιδηρομαγνητικού στάτη. Ο δρομέας του Ferraris κατασκευάστηκε από έναν κύλινδρο χαλκού, ενώ του Tesla κατασκευάστηκε από έναν σιδηρομαγνητικό κύλινδρο με βραχυκυκλωμένη περιέλιξη.

Ο πρώτος επαγωγικός κινητήρας με ικανοποιητική συμπεριφορά κατασκευάστηκε από τον Michael Dolivo-Dobrowolsky το 1889. Έκτοτε οι επαγωγικές μηχανές (σχήμα 1.3) στηρίζονται στις θεωρίες του Faraday και του Tesla χωρίς καμιά ραγδαία εξέλιξη ως προς την δομή της κατασκευής τους παρά μόνο βελτιώσεις επιδόσεων, αποδόσεων και όγκου κατασκευής.



**Σχήμα 1.3** Μοντέρνος τριφασικός επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού: 1.Άξονας, 2.Στάτης, 3.Δρομέας, 4.Τυλίγματα Στάτη, 5.Φτερωτή ψύξεως, 6.Κιβώτιο σύνδεσης ακροδεκτών, 7.Πλαίσιο.

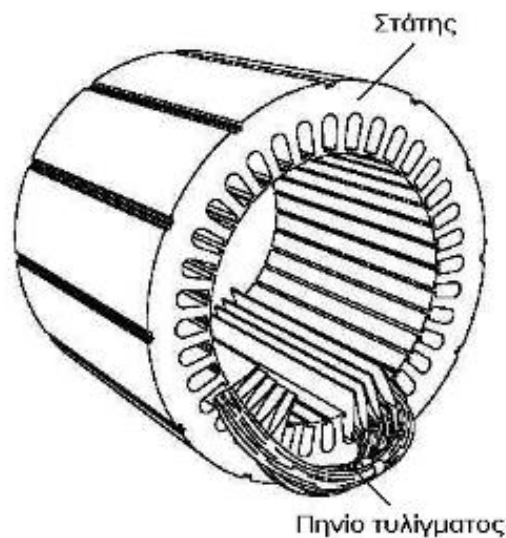
### **1.3 Διαμόρφωση ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής**

Οι επαγωγικές μηχανές αποτελούνται από δύο κύρια μέρη, ένα σταθερό εξωτερικό μέρος που ονομάζεται στάτης και ένα περιστρεφόμενο εσωτερικό μέρος που ονομάζεται δρομέας. Το σχήμα 1.3 είναι μια τομή της επαγωγικής μηχανής όπου φαίνονται τα κύρια κατασκευαστικά στοιχεία της.

Όλες οι μηχανές χρησιμοποιούν την περιστροφή ενός μαγνητικού πεδίου για την κίνηση του δρομέα. Η τριφασική επαγωγική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ο μόνος τύπος μηχανής όπου το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγεται στο στάτη λόγω της φύσης της τροφοδοσίας του ρεύματος. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος εξαρτώνται είτε από μηχανική είτε από ηλεκτρονική μετατροπή για τη δημιουργία στρεφόμενων μαγνητικών πεδίων ενώ η μονοφασική επαγωγική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος εξαρτάται από επιπρόσθετα ηλεκτρικά στοιχεία. Στο εσωτερικό κάθε μηχανής σχηματίζονται δύο σύνολα ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Στην επαγωγική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος το ένα σύνολο σχηματίζεται στο στάτη λόγω της τροφοδοσίας που συνδέεται στα τυλίγματα του. Η εναλλασσόμενη μορφή της τροφοδοσίας επάγει μια ηλεκτρομαγνητική δύναμη στο δρομέα σύμφωνα με το νόμο του Lenz και έτσι δημιουργείται το δεύτερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Η αλληλεπίδραση των δύο αυτών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων παράγει ροπή με αποτέλεσμα η μηχανή να περιστρέφεται στην κατεύθυνση της παραγόμενης ροπής.

### 1.3.1 Στάτης

Ο στάτης κατασκευάζεται από λεπτά φύλλα αλουμινίου ή σιδήρου τα οποία συνδέονται μεταξύ τους ώστε να σχηματίσουν ένα κοίλο κύλινδρο με αυλακώσεις, όπου περιελίσσεται τα τυλίγματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.1.1.

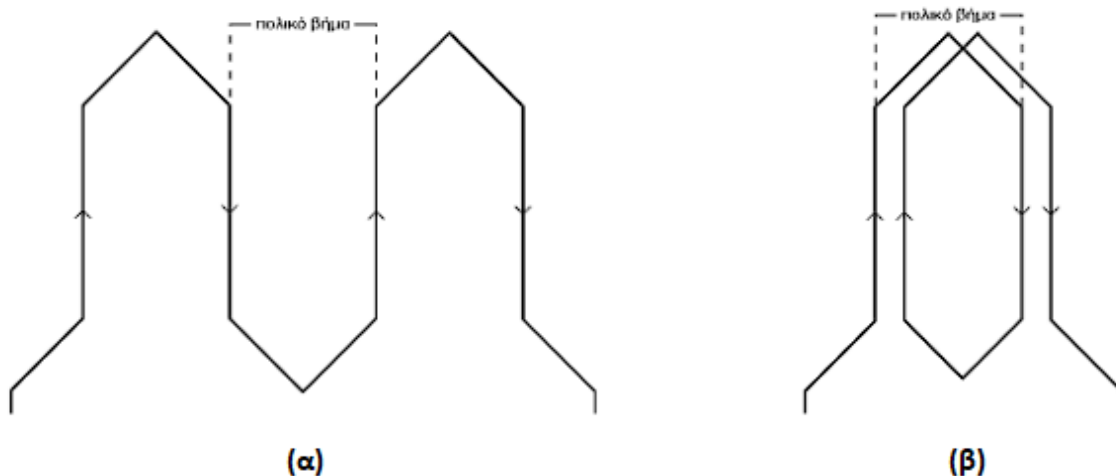


Σχήμα 1.3.1.1 Στάτης επαγωγικής μηχανής

Τα τυλίγματα τοποθετούνται κατά κανόνα στις ομοιόμορφα διανεμημένες αυλακώσεις στο σιδηρομαγνητικό υλικό του στάτη. Για να σχηματιστεί ένα πλήρες τύλιγμα τοποθετούνται όμοια πηνία σε απέναντι αυλακώσεις και στη συνέχεια συνδέονται μεταξύ τους σε ομάδες. Κάθε ομάδα πηνίων μαζί με το

κομμάτι του πυρήνα που περιτυλίγει, σχηματίζει έναν ηλεκτρομαγνήτη (ζεύγος πόλου) όταν εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τροφοδοσία. Ο αριθμός των πόλων μιας επαγωγικής μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος εξαρτάται από την εσωτερική σύνδεση των τυλιγμάτων του στάτη. Τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται κατευθείαν στην τροφοδοσία και εσωτερικά συνδέονται σε αστέρα ή τρίγωνο ούτως ώστε κατά την εφαρμογή εναλλασσόμενης τροφοδοσίας να δημιουργείται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Τα τυλίγματα που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι δύο: το βροχοτύλιγμα και το κυματοειδές τύλιγμα (σχήμα 1.3.1.2). Το βροχοτύλιγμα χρησιμοποιείται σε μηχανές με λίγους πόλους και υψηλές ταχύτητες, ενώ το κυματοειδές, σε πολυπολικές μηχανές χαμηλών ταχυτήτων. Τέλος, τα τυλίγματα ενδέχεται να κατανέμονται σε μία ή δύο στρώσεις προκειμένου να ομαλοποιείται η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο.

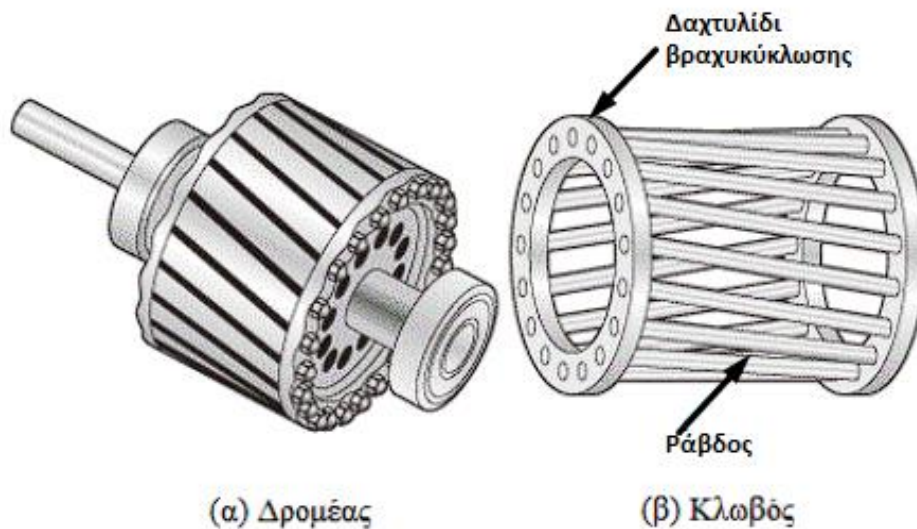


**Σχήμα 1.3.1.2** Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών: (α) Κυματοειδές, (β) Βροχοειδές

### 1.3.2 Δρομέας

Ο δρομέας είναι κατασκευασμένος από πολλά λεπτά φύλλα μετάλλου, με κατανεμημένες ράβδους αλουμινίου ή χαλκού στην περιφέρεια του. Ο πιο διαδεδομένος τύπος είναι ο δρομέας κλειστού κλωβού όπου οι ράβδοι συνδέονται στις άκρες τους μηχανικά αλλά και ηλεκτρικά με τη χρήση δακτυλίων.

Ο δρομέας αυτός αποτελείται από ένα κυλινδρικό πυρήνα από φύλλα μετάλλου με διαμήκειες παράλληλες αύλακες που φέρουν τους αγωγούς. Κάθε αύλακα φέρει ράβδο από αλουμίνιο, χαλκό ή κράμα. Οι ράβδοι είναι μονίμως βραχυκυκλωμένοι και στα δύο άκρα, μέσω των δακτυλίων όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.2.1.



**Σχήμα 1.3.1.2** (α) Βραχυκυκλωμένος δρομέας, (β) Κλωβός βραχυκυκλωμένου δρομέα

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.1.2, το τύλιγμα του κλωβού αποτελείται από τις ράβδους πάνω στις οποίες λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της επαγωγής και τα δαχτυλίδια βραχυκύκλωσης που ενώνουν τις ράβδους σχηματίζοντας το κλωβό. Οι ράβδοι είναι διαφορετικού αριθμού από τις οδοντώσεις του πυρήνα του στάτη και παρουσιάζουν μια ελαφρά κλίση σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο του «κλειδώματος» του δρομέα. Αυτό συμβαίνει όταν ο αριθμός των οδοντώσεων του δρομέα είναι ίσος με τον αριθμό οδοντώσεων του στάτη, και ο δρομέας έχει την τάση να ακινητοποιείται κάτω από τα δόντια του στάτη όπου υπάρχει απευθείας μαγνητική έλξη μεταξύ τους. Η ελαφριά κλίση βοηθά τη μηχανή να λειτουργεί πιο αθόρυβα μειώνοντας τον μαγνητικό θόρυβο, καθώς επίσης ελαττώνονται και οι αρμονικές αυλάκων.

Ο δρομέας τοποθετείται στη μηχανή χρησιμοποιώντας ρουλεμάν στις δύο άκρες του πλαισίου, ενώ μεταξύ του στάτη και του δρομέα υπάρχει διάκενο αέρος, μέσω του οποίου μεταφέρεται ενέργεια από το στάτη στο δρομέα, επαγωγικά. Όσο μικρότερο είναι το διάκενο, τόσο καλύτερη είναι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Ωστόσο το μέγεθος του διακένου καθορίζεται από κατασκευαστικούς παράγοντες και κόστη, αλλά και από τις επιτρεπόμενες απώλειες πυρήνα από τα σημεία υψηλού κορεσμού γύρω από τις αυλακώσεις. Η παραγόμενη ροπή αναγκάζει το δρομέα και το φορτίο να περιστραφούν. Ανεξάρτητα από τον τύπο δρομέα που θα χρησιμοποιηθεί, η αρχή λειτουργίας περιστροφής παραμένει η ίδια.

## **1.4 Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας**

### **1.4.1 Ταχύτητα επαγωγικής μηχανής**

Τροφοδοτώντας τον στάτη με εναλλασσόμενη τάση δημιουργείται κύμα ΜΕΔ που στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$ :

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (1.4.1.1)$$

Όπου:

$n_s$ : η σύγχρονη ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου του στάτη σε rpm (στροφές ανά λεπτό)

P: ο αριθμός των πόλων του στάτη

f: η συχνότητα της πηγής σε Hz

Αντίστοιχα σε rad/sec η σύγχρονη ταχύτητα είναι:

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{P/2} \quad (1.4.1.2)$$

Έστω ότι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι n, τότε ορίζεται η ολίσθηση s από τη σχέση:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.4.1.3)$$

Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (μηχανική ταχύτητα), μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της ολίσθησης και της σύγχρονης ταχύτητας ως εξής:

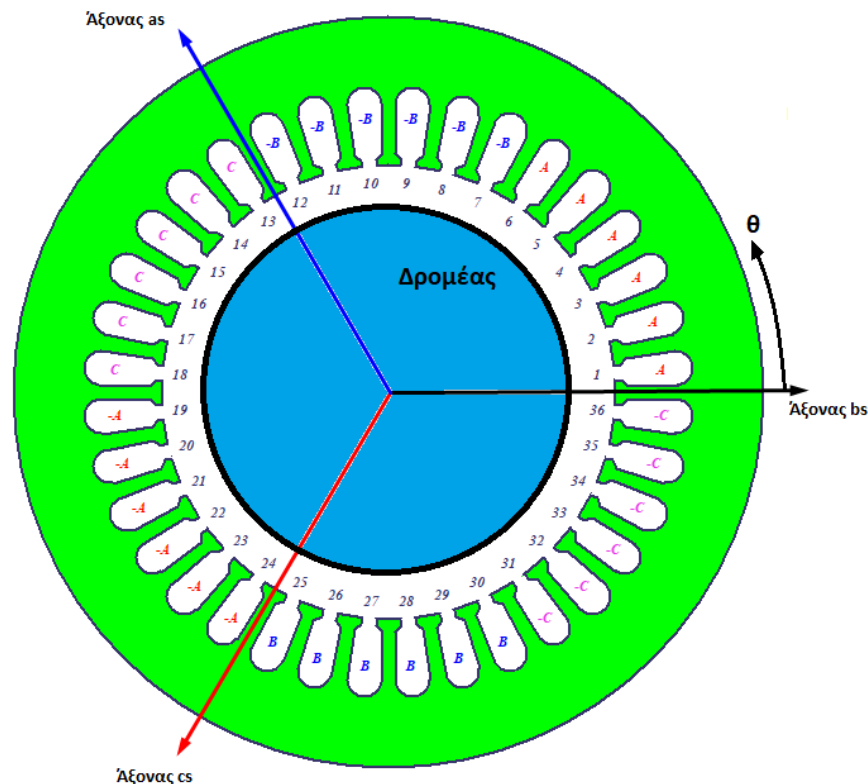
$$n = (1 - s)n_s \quad (1.4.1.4)$$

Το μαγνητικό πεδίου που παράγεται στο δρομέα λόγω της επαγόμενης τάσης είναι εναλλασσόμενο εκ φύσεως. Για μείωση της σχετικής ταχύτητας, με αναφορά το στάτη, ο δρομέας αρχίζει να κινείται στην ίδια

κατεύθυνση με την ροή του στάτη και προσπαθεί να ευθυγραμμιστεί με την στρεφόμενη ροή. Πρακτικά όμως ο δρομέας ποτέ δεν ευθυγραμμίζεται με το πεδίο του στάτη αλλά κινείται λίγο πιο αργά από την ταχύτητα  $n_s$  του πεδίου του στάτη. Η διαφορά μεταξύ της σύγχρονης ταχύτητας  $n_s$  και της ταχύτητας του δρομέα  $n$ , ονομάζεται ολίσθηση και αλλάζει ανάλογα με το φορτίο. Μια αύξηση στο φορτίο αναγκάζει τον δρομέα να κινηθεί πιο αργά, οπότε αυξάνεται η ολίσθηση, ενώ μια μείωση στο φορτίο κάνει το δρομέα να κινηθεί πιο γρήγορα, οπότε η ολίσθηση μειώνεται.

## 1.4.2 Περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

Σε μια τριφασική μηχανή, τα τρία κυκλώματα του τυλίγματος είναι τοποθετημένα μεταξύ τους κατά 120 μοίρες. Τα τρία κυκλώματα έχουν ίση αντίσταση και ίδιο αριθμό σπειρών, γεγονός που καθιστά το τύλιγμα συμμετρικό. Οι πλευρές των τριών κυκλωμάτων είναι συνδεδεμένες με αυλάκια που σχηματίζουν γωνία 180 μοιρών στη μηχανή. Η φορά του ρεύματος σε κάθε πλευρά των κυκλωμάτων φαίνεται στο σχήμα 1.4.2.1. Οι άξονες  $a_s$ ,  $b_s$ ,  $c_s$  δηλώνουν τη θετική κατεύθυνση των μαγνητικών πεδίων που παράγουν τα τρία κυκλώματα του τυλίγματος



Σχήμα 1.4.2.1 Στοιχειώδης διπολική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, με τριφασικό τύλιγμα στο στάτη



Στη στοιχειώδη μηχανή του σχήματος 1.4.2.1, οι πλευρές των ομάδων κάθε τυλίγματος, είναι ομοιόμορφα καταναμημένες στην επιφάνεια του στάτη, σε γωνία  $60^\circ$ . Στις πραγματικές μηχανές, οι πλευρές των ομάδων κατανέμονται σε μεγαλύτερη γωνία, όπου στην ίδια αυλάκωση τοποθετούνται οι πλευρές από δύο ομάδες. Το τυλίγμα του ονομάζεται full-pitch, επειδή οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν γωνία  $180^\circ$  (διπολική μηχανή). Συχνά, οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν μικρότερη γωνία από  $180^\circ$ , οπότε το τυλίγμα του ονομάζεται fractional-pitch.

Στο σχήμα 1.4.2.2 εικονίζεται το ανάπτυγμά της στοιχειώδους μηχανής. Αρχή των αξόνων θεωρείται ο άξονας bs στα δεξιά του σχήματος. Επίσης, φαίνεται η μαγνητεγερτική δύναμη ΜΕΔ, που αναπτύσσεται από το τυλίγμα της φάσης bs ( $ΜΕΔ_{bs}$ ), η οποία μεταβάλλεται βηματικά στο κέντρο των αγωγών του τυλίγματος. Το μαγνητικό πεδίο διατρέχει ακτινικά το διάκενο. Η ακτινική διεύθυνση του πεδίου οφείλεται στο μικρό πλάτος του διακένου σχετικά με τη διάμετρο του δρομέα και τη μεγάλη μαγνητική του αντίσταση, σε σχέση με εκείνη του σιδήρου στο στάτη και το δρομέα. Η ΜΕΔ που αναπτύσσεται από το τυλίγμα as ( $ΜΕΔ_{as}$ ) έχει την ίδια μορφή με την  $ΜΕΔ_{bs}$ , αλλά είναι μετατοπισμένη κατά  $120^\circ$  προς τα αριστερά. Αντίστοιχα, η  $ΜΕΔ_{cs}$  είναι μετατοπισμένη κατά  $240^\circ$  προς τα αριστερά ως προς την  $ΜΕΔ_{bs}$ . Οι άξονες as, bs, cs, βρίσκονται στο μέσο της μέγιστης θετικής ΜΕΔ κάθε τυλίγματος.

Οι κυματομορφές των ΜΕΔ που αναπτύσσουν τα τυλίγματα της στοιχειώδους μηχανής στο διάκενο, είναι μη ημιτονοειδείς συναρτήσεις της χωρικής γωνίας  $\theta$ . Αυτό δεν είναι επιθυμητό, ιδιαίτερα στις μηχανές μεγάλης ισχύος, διότι προκαλεί την ανάπτυξη αρμονικών τάσεων και ρευμάτων. Για την παραγωγή ημιτονοειδούς ΜΕΔ στο διάκενο της μηχανής, τα τυλίγματα του στάτη πρέπει να έχουν ημιτονοειδή κατανομή, όπως εικονίζεται στο σχήμα 1.4.2.3α. Τότε, η ΜΕΔ έχει την ημιτονοειδή μορφή του σχήματος 1.4.2.3β και ορίζεται από την παρακάτω σχέση, για τη φάση as.

$$ΜΕΔ_{as} = \frac{N_s}{2} I_{as} \cos(\theta) \quad (1.4.2.1)$$

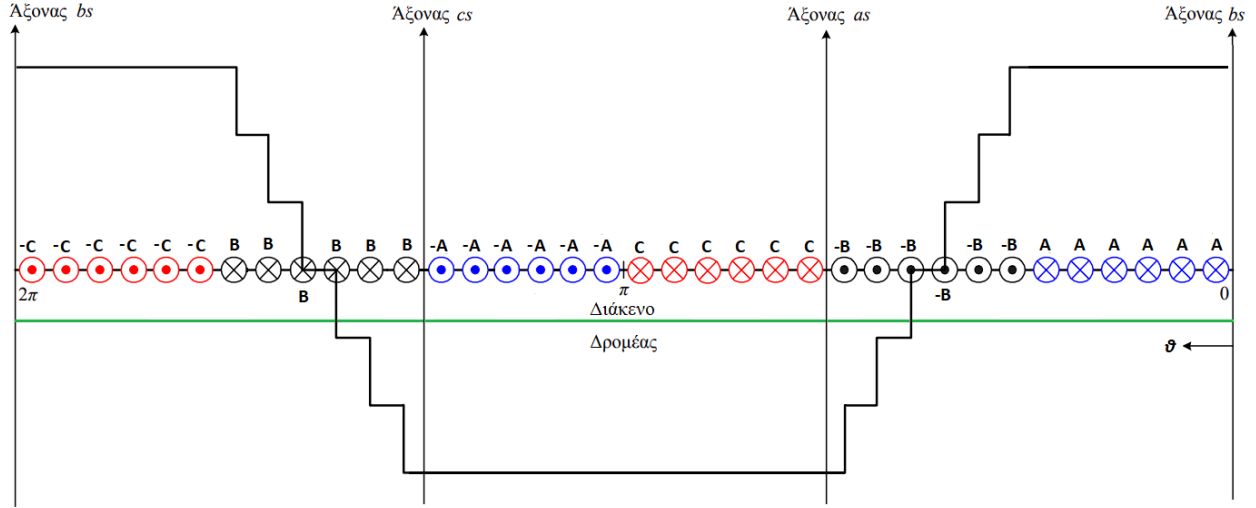
Όπου  $I_{as}$  είναι το ρεύμα στη φάση as του τυλίγματος και  $N_s$  είναι ο ισοδύναμος αριθμός σπειρών ενός ημιτονοειδούς καταναμημένου τυλίγματος, ο οποίος δίνει την ίδια θεμελιώδη συνιστώσα με το πραγματικό τυλίγμα. Οι ΜΕΔ που αναπτύσσονται από τα τυλίγματα των φάσεων bs και cs, ορίζονται από τις σχέσεις

$$ΜΕΔ_{bs} = \frac{N_s}{2} I_{bs} \cos(\theta - 2\pi/3) \quad (1.4.2.2)$$

$$ΜΕΔ_{cs} = \frac{N_s}{2} I_{cs} \cos(\theta + 2\pi/3) \quad (1.4.2.3)$$

Η ολική ΜΕΔ στο διάκενο, από τα τρία τυλίγματα, είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους ΜΕΔ.

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{2} [I_{as} \cos(\theta) + I_{bs} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{cs} \cos(\theta + 2\pi/3)] \quad (1.4.2.4)$$



**Σχήμα 1.4.2.2** Ανάπτυγμα της στοιχειώδους μηχανής, όπου εικονίζεται το τριφασικό τύλιγμα και η αναπτυσσόμενη ΜΕΔ από τη φάση as

Τα συμμετρικά ρεύματα στο τριφασικό τύλιγμα της μηχανής, ορίζονται από τις σχέσεις

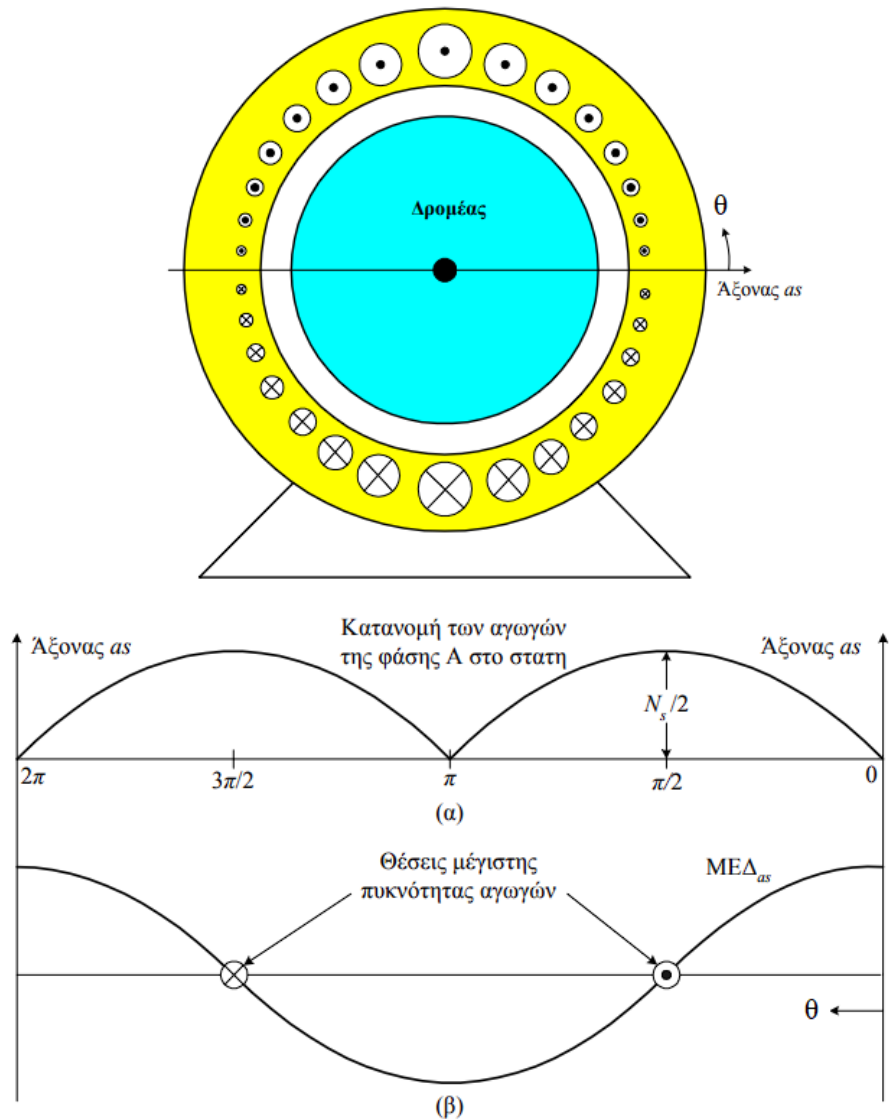
$$I_{as} = I_{ms} \cos(\omega t) \quad (1.4.2.5)$$

$$I_{bs} = I_{ms} \cos(\omega t - 2\pi/3) \quad (1.4.2.6)$$

$$I_{cs} = I_{ms} \cos(\omega t + 2\pi/3) \quad (1.4.2.7)$$

Όπου  $\omega$  είναι η κυκλική συχνότητα των ρευμάτων. Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (1.4.2.5)–(1.4.2.7) στην εξίσωση (1.4.2.4), ορίζεται η ολική ΜΕΔ στο διάκενο της μηχανής.

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{2} \frac{3}{2} I_{ms} \cos(\omega t - \theta) \quad (1.4.2.8)$$

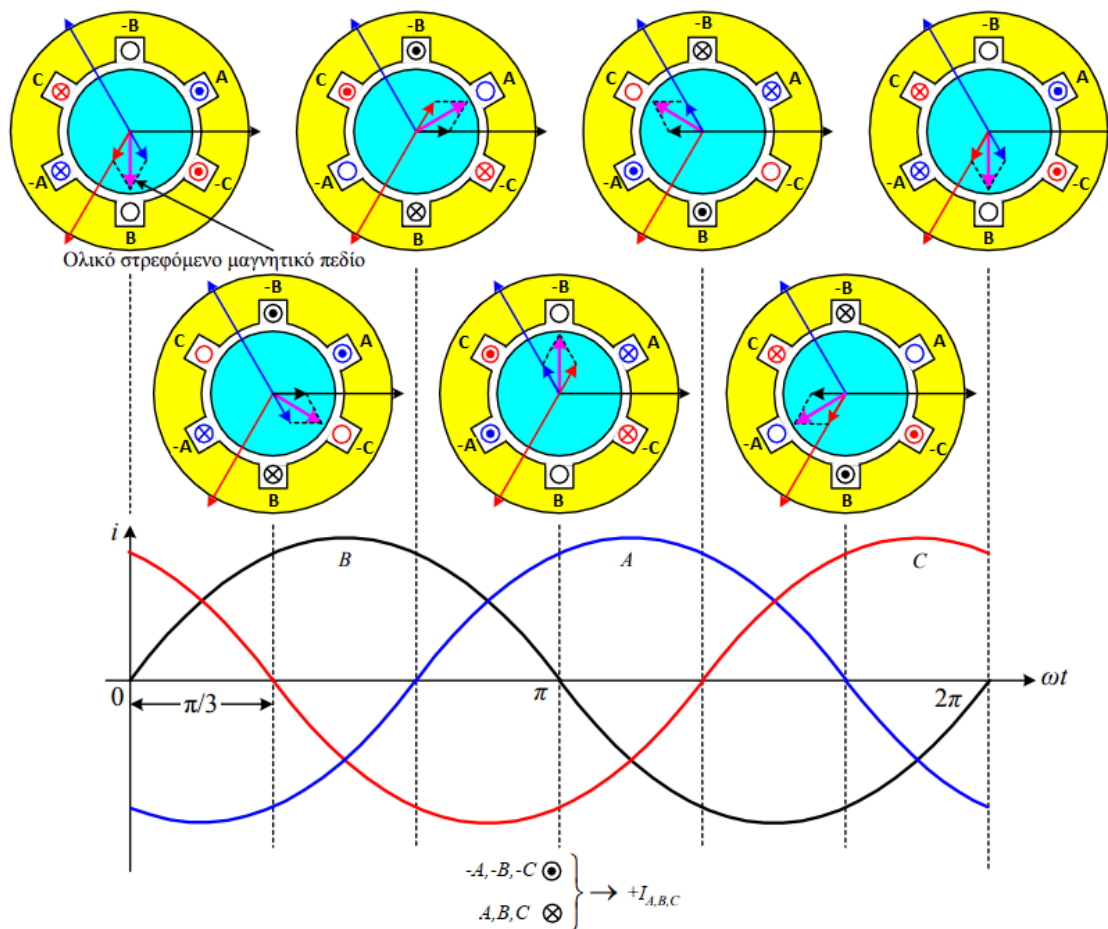


**Σχήμα 1.4.2.3** Τύλιγμα της φάσης as με ημιτονοειδή κατανομή (α) και η παραγόμενη ΜΕΔ στο διάκενο (β)

Η εξίσωση 1.4.2.8 περιγράφει μια ΜΕΔ με ημιτονοειδή κατανομή, η οποία περιστρέφεται γύρω από τον στάτη της μηχανής, με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού, με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ . Αυτή η ΜΕΔ έχει ένα ζεύγος πόλων και η ροή των τριφασικών ρευμάτων από το τριφασικό τύλιγμα του στάτη δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο με έναν βόρειο και έναν νότιο πόλο. Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου των ρευμάτων, οι πόλοι κάνουν μια πλήρη περιστροφή.

Η δημιουργία του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου φαίνεται στο σχήμα 1.4.2.4. Η θετική φορά των ρευμάτων σε κάθε ένα από τα τρία τυλίγματα του στάτη, αντιστοιχεί σε αυτή του σχήματος 1.4.2.1. Κάθε τύλιγμα από τη ροή του αντίστοιχου ρεύματος παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, η θετική φορά του οποίου (βόρειος πόλος) φαίνεται στο σχήμα 1.4.2.4. Επίσης φαίνονται τα μαγνητικά πεδία που παράγει κάθε

τύλιγμα του στάτη μόνο του, καθώς και το ολικό πεδίο της μηχανής σε επτά διακριτές χρονικές στιγμές, οι οποίες αντιστοιχούν σε γωνίες  $60^\circ$  των ρευμάτων. Η διαδοχή φάσης των ρευμάτων είναι BAC. Παρατηρείται ότι στη διπολική μηχανή που εξετάζεται, το ολικό μαγνητικό πεδίο στρέφεται κατά  $60^\circ$  μηχανικές μοίρες σε κάθε  $60^\circ$  μεταβολή της φασικής γωνίας των ρευμάτων με δεξιόστροφη φορά, όπως ήδη γνωρίζουμε από την εξίσωση 1.4.2.8. Αν η σειρά διαδοχής φάσης των ρευμάτων αντιστραφεί, τότε θα αντιστραφεί και η φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου.



**Σχήμα 1.4.2.3** Παραγωγή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου σε μία διπολική τριφασική μηχανή με θετική σειρά διαδοχής των φάσεων (BAC). Το μαγνητικό πεδίο εκτελεί μία πλήρη περιστροφή, με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού, σε κάθε περίοδο των ρευμάτων.

### 1.5 Ηλεκτρομαγνητική δομή του επαγωγικού κινητήρα

Ο επαγωγικός κινητήρας έχει στο στάτη ένα συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, με ωμική αντίσταση  $R_s$ , αυτεπαγωγή  $L_{st}$  και ισοδύναμο αριθμό σπειρών  $w_s$  ανά φάση (σχήμα 1.5.1). Όταν το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτηθεί από μία συμμετρική τριφασική πηγή με τάση  $u$  και συχνότητα  $\omega_e$ , δημιουργείται το

στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη  $\varphi_s$ . Η συνιστώσα  $\varphi_{sr}$  του πεδίου του στάτη (κοινή ροή, mutual flux), διασχίζει ακτινικά το διάκενο και συνδέει το τύλιγμα του δρομέα. Η συνιστώσα  $\varphi_{ls}$  ονομάζεται ροή σκέδασης (leakage flux) και συνδέει μόνο τις σπείρες του στάτη. Το μέγεθος της ροής σκέδασης εξαρτάται από τη σύζευξη μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Η σύζευξη των τυλιγμάτων στις ηλεκτρικές μηχανές είναι πολύ μικρότερη από εκείνη στους μετασχηματιστές, εξαιτίας του διακένου. Το ολικό πεδίο του στάτη είναι ίσο με:

$$\varphi_s = \varphi_{ls} + \varphi_{sr} \quad (1.5.1)$$

Στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού, το τύλιγμα του δρομέα αποτελείται από ράβδους, στα άκρα των οποίων συνδέονται δακτύλιοι βραχυκύκλωσης. Το τύλιγμα κλωβού μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχο με ένα πλήρες συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, με αριθμό πόλων ίσο με εκείνο του στάτη.

Καθώς το στρεφόμενο πεδίο του στάτη (συνιστώσα  $\varphi_{sr}$ ) τέμνει τους αγωγούς του τυλίγματος του δρομέα, επάγει σε αυτούς συμμετρικές τριφασικές τάσεις  $E_r$ . Το πλάτος και η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων, εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα του δρομέα ως προς το στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Το τύλιγμα του δρομέα έχει ωμική αντίσταση  $R_r$ , αυτεπαγωγή  $L_{rot}$  και ισοδύναμο αριθμό σπειρών  $w_r$  ανά φάση. Εξαιτίας της επαγωγικής φύσης του βραχυκυκλωμένου τυλίγματος του δρομέα, το ρεύμα στο δρομέα  $I_r$  καθυστερεί ως προς την επαγόμενη τάση  $E_r$ . Στο σχήμα 1.5.1 φαίνεται μόνο η μία φάση των τυλιγμάτων στο στάτη και το δρομέα. Τα τριφασικά ρεύματα που ρέουν στο δρομέα, ως συνέπεια των επαγόμενων τάσεων από το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, προκαλούν την ανάπτυξη του στρεφόμενου πεδίου του δρομέα  $\varphi_r$ . Η συνιστώσα  $\varphi_{rs}$  του πεδίου του δρομέα, συνδέει το τύλιγμα του στάτη.

Η συνιστώσα  $\varphi_{lr}$  αντιπροσωπεύει τη ροή σκέδασης. Έτσι, ισχύει:

$$\varphi_r = \varphi_{lr} + \varphi_{rs} \quad (1.5.2)$$

Το διανυσματικό διάγραμμα των παραπάνω μεγεθών φαίνεται στο σχήμα 1.5.1. Η ολική μαγνητική ροή  $\varphi_m$  στο διάκενο του κινητήρα είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα των κοινών ροών του στάτη και του δρομέα.

$$\varphi_m = \varphi_{sr} + \varphi_{rs} \quad (1.5.3)$$

Η αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα, τα οποία στρέφονται με την ίδια ταχύτητα, προκαλεί την ανάπτυξη μιας σταθερής ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Η ροπή είναι ανάλογη με το εξωτερικό γινόμενο των πεδίων

$$T_e = C_1 (\mathbf{B}_{sr} \times \mathbf{B}_{rs}) \quad (1.5.4)$$

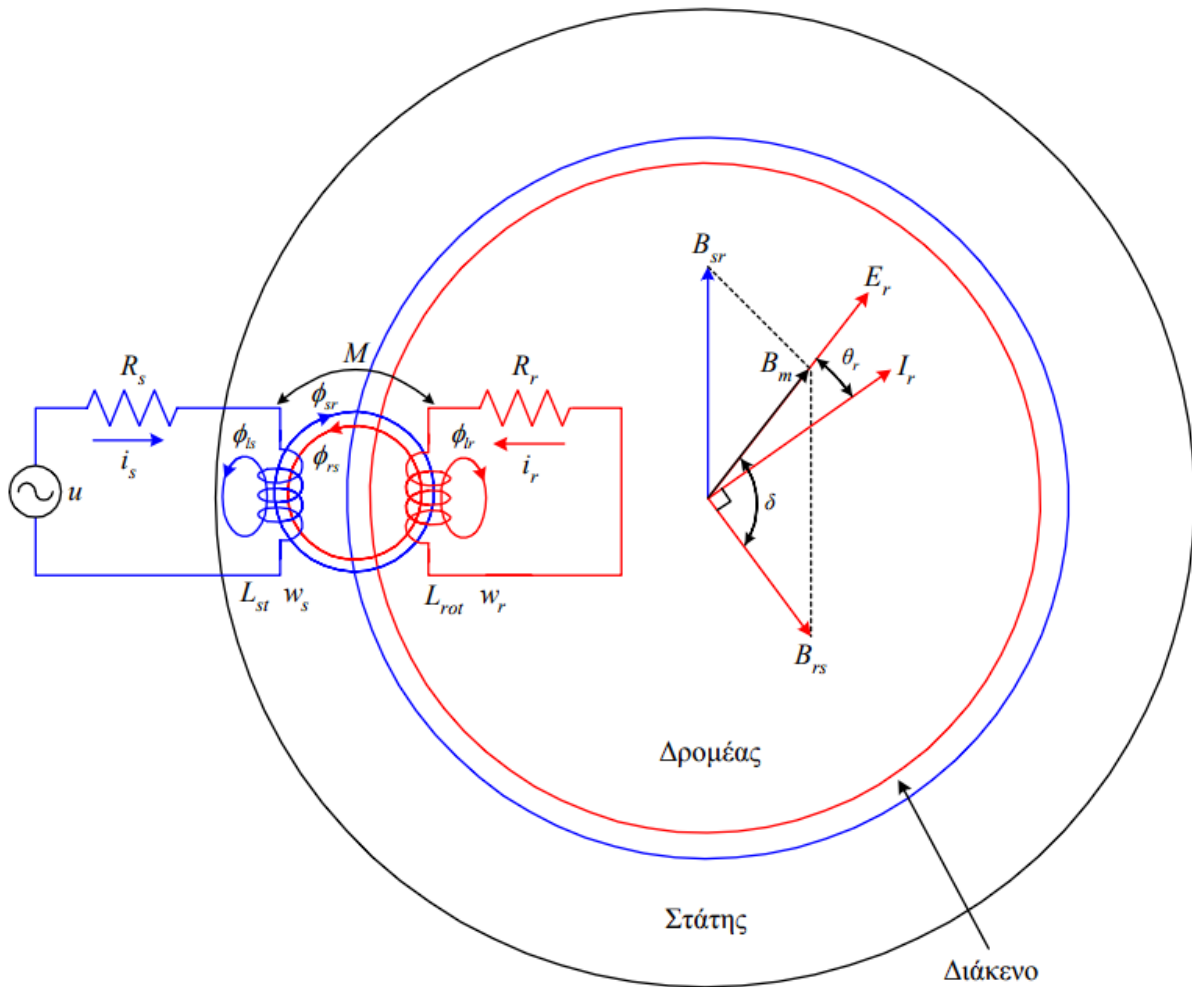
ή αντίστοιχα των πεδίων

$$T_e = C_2(\mathbf{B}_m \times \mathbf{B}_{rs}) \quad (1.5.5)$$

$$T_e = C_T \mathbf{B}_m \mathbf{B}_{rs} \sin \delta = C_T \mathbf{B}_m \mathbf{B}_{rs} \cos \theta_r \quad (1.5.6)$$

και η φορά της είναι η ίδια με τη φορά περιστροφής των πεδίων του στάτη και του δρομέα.

Από τα προηγούμενα, τα ρεύματα που κινούν το δρομέα του κινητήρα προέρχονται από τις τάσεις που προκύπτουν από το περιστρεφόμενο πεδίο του στάτη. Αυτό σημαίνει ότι ο δρομέας δεν χρειάζεται να τροφοδοτηθεί από κάποια εξωτερική πηγή ενέργειας. Οι μηχανές που λειτουργούν με αυτόν τον τρόπο, δηλαδή που τροφοδοτούνται μόνο στο στάτη, ονομάζονται "απλής διέγερσης". Αντίθετα, οι μηχανές που τροφοδοτούνται από εξωτερικές πηγές ενέργειας τόσο στο στάτη όσο και στο δρομέα, όπως οι σύγχρονες και οι μηχανές συνεχούς ρεύματος, ονομάζονται "διπλής διέγερσης"



Σχήμα 1.5.1 Ηλεκτρομαγνητική δομή επαγωγικού κινητήρα

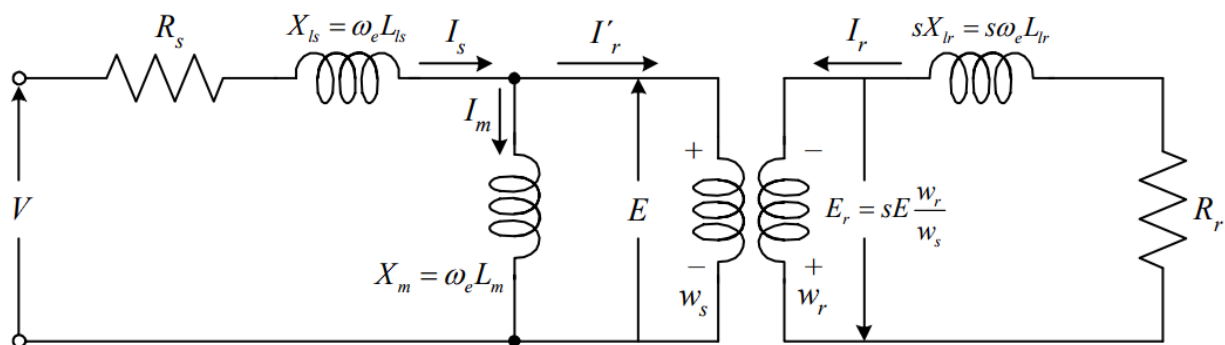
## 1.6 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα

Η λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα στηρίζεται στην ανάπτυξη τάσεων εξ επαγωγής στο τριφασικό τύλιγμα του δρομέα. Επομένως, η αρχή λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα είναι ίδια μ' εκείνη του μετασχηματιστή. Για το λόγο αυτό, ο ασύγχρονος κινητήρας ονομάζεται και στρεφόμενος μετασχηματιστής. Προκειμένου να λάβουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του συμμετρικού τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, θεωρούμε την ηλεκτρομαγνητική δομή ανά φάση του σχήματος 1.5.1, από την οποία προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις αν θεωρήσουμε ημιτονοειδή μεγέθη και μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις όπου  $M$  είναι ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα.

$$V = R_s I_s + j\omega_e L_{st} I_s - j\omega_e M I_r \quad (1.6.1)$$

$$0 = R_r I_r + js\omega_e L_{rot} I_r - js\omega_e M I_s \quad (1.6.2)$$

Οι εξισώσεις του επαγωγικού κινητήρα διαφέρουν από εκείνες του μετασχηματιστή, μόνο στο δευτερεύον κύκλωμα (δρομέα).



Σχήμα 1.6.1 Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα

Στο σχήμα 1.6.1 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή, τροποποιημένο ως προς το δρομέα για τις ανάγκες του επαγωγικού κινητήρα. Αντίθετα με την περίπτωση του μετασχηματιστή, στον κινητήρα η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στο δρομέα δεν είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του πρωτεύοντος (στάτη). Στον επαγωγικό κινητήρα, η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων  $f_r$  εξαρτάται από την ολίσθηση, όπως προκύπτει από τον τύπο 1.6.2 και ορίζεται από τη σχέση

$$f_r = s f_e \quad (1.6.3)$$

Όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος, η συχνότητα του δρομέα είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη. Καθώς η ταχύτητα πλησιάζει τη σύγχρονη, η συχνότητα των τάσεων και των ρευμάτων στο δρομέα πλησιάζει το

μηδέν. Εκτός από τη συχνότητα των επαγόμενων τάσεων, το πλάτος των τάσεων μεταβάλλεται ανάλογα με την ολίσθηση. Έτσι, η επαγόμενη τάση είναι μέγιστη κατά την εκκίνηση του κινητήρα, όπου  $n_r = 0$ ,  $s = 1$ , ενώ είναι ελάχιστη όταν η ταχύτητα πλησιάζει τη σύγχρονη ( $s \rightarrow 0$ ). Οι εξισώσεις 1.6.1, 1.6.2 του κινητήρα λαμβάνουν την παρακάτω μορφή.

$$V = (R_s + jX_{ls})I_s + jX_m(I_s - I'_r) \quad (1.6.4)$$

$$0 = \frac{R'_s}{s} I'_r + jX'_{lr} I'_r + jX_m(I'_r - I_s) \quad (1.6.5)$$

Όπου:

$X_{ls}$  είναι η αντίδραση σκέδασης του στάτη, η οποία εκφράζει τη ροή σκέδασης  $\phi_{ls}$ :

$$X_{ls} = \omega_e (L_{st} - M \frac{w_s}{w_r}) \quad (1.6.6)$$

$X_{lr}$  είναι η αντίδραση σκέδασης του δρομέα, η οποία εκφράζει τη ροή σκέδασης  $\phi_{lr}$ :

$$X_{lr} = \omega_e (L_{rot} - M \frac{w_r}{w_s}) \quad (1.6.7)$$

$X_m$  είναι η αντίδραση μαγνήτισης, η οποία παριστά τη σύζευξη μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα:

$$X_m = \omega_e M \frac{w_s}{w_r} \quad (1.6.6)$$

Τα μεγέθη του δρομέα αναφέρονται στο στάση, μέσω του λόγου σπειρών των δύο τυλιγμάτων  $w_s/w_r$ , από τις σχέσεις:

$$R'_r = R_r \left( \frac{w_s}{w_r} \right)^2 \quad (1.6.7)$$

$$X'_{lr} = X_{lr} \left( \frac{w_s}{w_r} \right)^2 \quad (1.6.8)$$

$$I'_r = I_r \left( \frac{w_s}{w_r} \right) \quad (1.6.9)$$

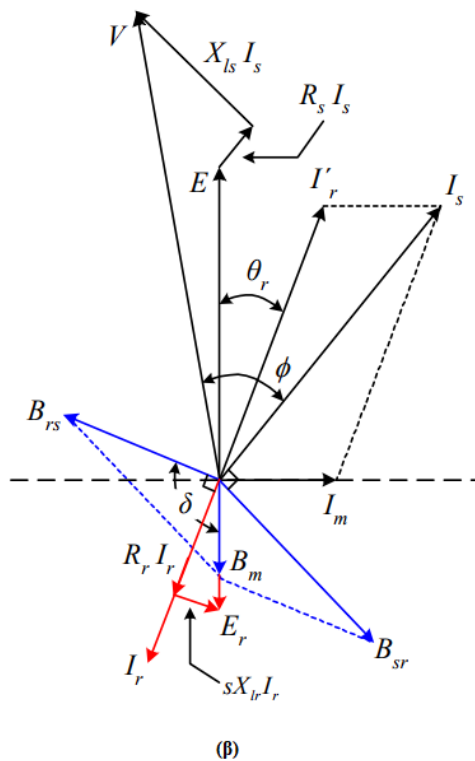
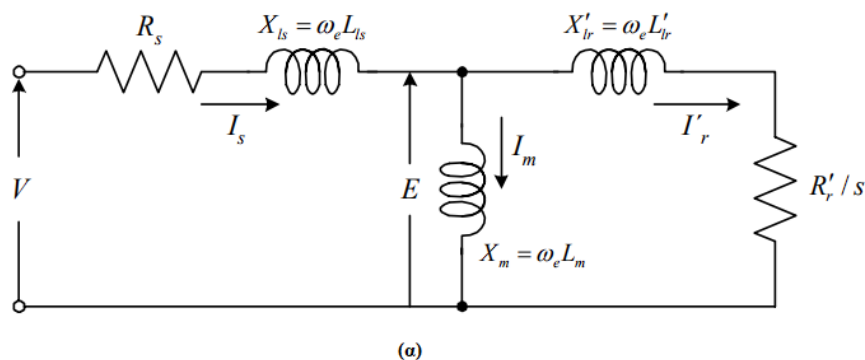
$$X_{ls} + X_m = \omega_e L_{st} \quad (1.6.10)$$

$$X'_{lr} + X_m = \omega_e L'_{rot} \quad (1.6.11)$$



Το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, από τις εξισώσεις 1.6.1, 1.6.2, φαίνεται στο σχήμα 1.6.2.(α). Στο ισοδύναμο κύκλωμα, η τάση του δρομέα είναι σταθερή  $E$  και η συχνότητα είναι ίση με εκείνη του στάτη  $\omega_e$ . Οι επιπτώσεις από τη μεταβολή της ταχύτητας έχουν ενσωματωθεί στην ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δρομέα  $X'_{lr} + R'_r/s$ , η οποία εξαρτάται από την ολίσθηση.

Στο σχήμα 1.6.2.(β). παρουσιάζεται το διάγραμμα στρεφόμενων ανυσμάτων (phasors), των τάσεων και των ρευμάτων του κινητήρα καθώς και τα μεγέθη στην πλευρά του δρομέα και τα μαγνητικά πεδία. Τα δύο πρώτα τεταρτημόρια αναφέρονται στα μεγέθη του κινητήρα, ανοιγμένα στο στάτη.



**Σχήμα 1.6.2** (α) Τυπικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα. Τα μεγέθη του δρομέα αναφέρονται στην τάση και τη συχνότητα του στάτη. (β) Ανυσματικό διάγραμμα των τάσεων, των ρευμάτων και των μαγνητικών πεδίων του επαγωγικού κινητήρα

## **1.7 Απώλειες επαγωγικού κινητήρα**

Ο βαθμός απόδοσης του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα αναφέρεται στο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας εισόδου που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια. Κατά τη διάρκεια αυτής της μετατροπής, υπάρχει μια απώλεια ισχύος που καταναλώνεται από τον κινητήρα και προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του. Αυτή η απώλεια αντιπροσωπεύει τις απώλειες της μηχανής και πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Οι συνιστώσες των ολικών απωλειών των επαγωγικών κινητήρων περιλαμβάνουν:

- Οι απώλειες χαλκού (copper, winding losses) οφείλονται στη ροή των ρευμάτων από τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη ορίζονται από τη σχέση:

$$P_{cu_s} = 3R_s I_s^2 \quad (1.7.1)$$

Και στο δρομέα από τη σχέση:

$$P_{cu_r} = 3R'_r I_r'^2 \quad (1.7.2)$$

Οι ολικές απώλειες χαλκού είναι ίσες με το άθροισμα των απωλειών στο στάτη και το δρομέα:

$$P_{cu} = P_{cu_r} + P_{cu_s} \quad (1.7.3)$$

Οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται από το μέγεθος των αντιστάσεων των τυλιγμάτων και το μέγεθος των ρευμάτων στο στάτη  $I_s$  και το δρομέα  $I'_r$ , τα οποία είναι συνάρτηση της ροπής του φορτίου. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη και το δρομέα συμβάλλουν κατά 33–40% και 15–22% αντίστοιχα, στις ολικές απώλειες των συμβατικών επαγωγικών κινητήρων υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.

- Οι απώλειες σιδήρου (iron/core losses) αφορούν τις απώλειες που προκύπτουν από την εναλλαγή της μαγνητικής ροής στον πυρήνα του επαγωγικού κινητήρα. Αυτές οι απώλειες αποτελούνται από τις απώλειες υστέρησης και τις απώλειες δινореυμάτων στον στάτη και το δρομέα του κινητήρα. Επηρεάζονται από το μέγεθος της μαγνητικής ροής στον διάκενο  $\varphi_m$  και τη συχνότητα μεταβολής της, αλλά δεν επηρεάζονται από την ροπή του φορτίου. Οι απώλειες σιδήρου στο στάτη υπολογίζονται με βάση τη σχέση:

$$P_{iron_s} = k_e \omega_e^2 \varphi_m^2 + k_h \omega_e \varphi_m^n \quad (1.7.4)$$

Και στο δρομέα από την:

$$P_{iron_r} = k_e (s\omega_e)^2 \varphi_m^2 + k_h s\omega_e \varphi_m^n \quad (1.7.5)$$

όπου  $k_e$  είναι ο συντελεστής απωλειών δινορευμάτων και  $k_h$  ο συντελεστής απωλειών υστέρησης. Ο εκθέτης  $n$  λαμβάνει τιμές από 1.5 έως 2.5 και συνήθως θεωρείται  $n = 2$ . Στην περίπτωση αυτή, οι ολικές απώλειες σιδήρου του επαγωγικού κινητήρα είναι ίσες με:

$$P_{iron_{s+r}} = [k_e(1 - s^2)\omega_e^2 + k_h(1 - s)\omega_e]\varphi_m^2 \quad (1.7.6)$$

Οι απώλειες σιδήρου του δρομέα είναι μικρότερες από εκείνες του στάτη, εξαιτίας της μικρότερης συχνότητας  $s\omega_e$ . Οι απώλειες σιδήρου αποτελούν τη δεύτερη σημαντικότερη συνιστώσα των ολικών απωλειών, με ποσοστό περίπου 20%. Στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.6.2.(α), οι μαγνητικές απώλειες μοντελοποιούνται με μία αντίσταση  $R_m$  σε παράλληλη σύνδεση με την αντίδραση μαγνήτισης. Η τιμή της αντίστασης απωλειών σιδήρου, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{iron_{s+r}} = \frac{E^2}{R_m} \quad (1.7.7)$$

Με αντικατάσταση της εξίσωσης 1.7.6 και θέτοντας  $E = \omega_e\varphi_m$ , προκύπτει:

$$R_m = \frac{1}{k_e(1 + s^2) + k_h(1 - s)/\omega_e} \quad (1.7.8)$$

- Οι μηχανικές απώλειες (mechanical losses) αναφέρονται στις απώλειες ενέργειας που προκύπτουν κατά τη λειτουργία του κινητήρα λόγω τριβής και αντίστασης αέρα. Η τριβή προκαλεί απώλειες ενέργειας λόγω της περιστροφής του άξονα, ενώ η συνιστώσα αερισμού προκαλεί απώλειες ενέργειας λόγω της λειτουργίας του ανεμιστήρα ψύξης. Αυτές οι απώλειες εξαρτώνται από την ταχύτητα του κινητήρα, δηλαδή όσο αυξάνεται αυτή, τόσο αυξάνονται και οι μηχανικές απώλειες.

$$P_{fw} = C_{fw}n_r^2 \quad (1.7.9)$$

όπου,  $C_{fw}$  είναι ο συντελεστής μηχανικών απωλειών. Οι μηχανικές απώλειες αποτελούν περίπου το 10% των ολικών απωλειών στο ονομαστικό φορτίο.

- Οι κατανεμημένες απώλειες (stray losses) είναι επιπλέον απώλειες στη μηχανή που προκύπτουν από τη σκέδαση του μαγνητικού πεδίου στα μη σχεδιασμένα μέρη της μηχανής, όπως τα διαχωριστικά, οι πλάκες κλπ. Αυτές οι απώλειες αυξάνονται με το φορτίο και τη συχνότητα, και είναι δύσκολο να προσδιοριστούν ακριβώς. Συνήθως, λαμβάνονται υπόψη ως ένα ποσοστό της ισχύος εξόδου της μηχανής στο ονομαστικό φορτίο. Αυτές οι απώλειες αντιστοιχούν στο 8-20% των συνολικών απωλειών της μηχανής, ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα.

## **1.8 Ισχύς και ροπή επαγωγικού κινητήρα**

Ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ εισόδου σε μηχανική. Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου ορίζεται από τη σχέση

$$P_{in} = 3V I_s \cos\varphi \quad (1.8.1)$$

όπου  $V$  είναι η φασική τάση,  $I_s$  το φασικό ρεύμα και  $\varphi$  η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος. Η ισχύς που μεταφέρεται από τον στάτη στον δρομέα ενός κινητήρα ονομάζεται ισχύς διακένου. Αυτή η ισχύς προκύπτει αφού αφαιρέσουμε τις απώλειες χαλκού και μαγνητικές απώλειες στο στάτη από την ισχύ εισόδου. Στο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα, η ισχύς διακένου μπορεί να καταναλωθεί μόνο από την αντίσταση  $R'_r$  του δρομέα. Η ισχύς διακένου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{ag} = 3I'^2_r \frac{R'_r}{s} = 3EI'^2_r \cos\theta_r \quad (1.8.2)$$

Ένα τμήμα της ισχύος διακένου χάνεται ως απώλειες χαλκού στο δρομέα και ένα τμήμα ως απώλειες σιδήρου στο δρομέα. Η ισχύς που απομένει  $P_m$ , μετατρέπεται σε μηχανική. Η ισχύς αυτή ονομάζεται αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς και ορίζεται από την παρακάτω σχέση, αν αγνοήσουμε τις μικρές απώλειες σιδήρου στο δρομέα.

$$P_m = P_{ag} - P_{cu_r} = 3I'^2_r \frac{R'_r}{s} - 3I'^2_r R'_r = P_{ag}(1 - s) \quad (1.8.3)$$

Συνήθως, οι απώλειες σιδήρου του δρομέα ενσωματώνονται στις μαγνητικές απώλειες του στάτη. Οι απώλειες χαλκού του δρομέα, από την εξίσωση 1.8.3, υπολογίζονται από το γινόμενο της ισχύος διακένου με την ολίσθηση.

$$P_{cu_r} = sP_{ag} \quad (1.8.4)$$

Όταν ο δρομέας δεν στρέφεται, όλη η ισχύς διακένου μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση του δρομέα. Αυτό συμβαίνει γιατί η ισχύς εξόδου είναι μηδενική. Η ωφέλιμη ισχύς εξόδου του επαγωγικού κινητήρα, είναι μικρότερη από την αναπτυσσόμενη ισχύ κατά τις μηχανικές και τις καταναεμημένες απώλειες.

$$P_{out} = P_m - P_{fw} - P_{stray} \quad (1.8.5)$$

Αντίστοιχα, η πραγματική ροπή στον άξονα του κινητήρα, εξαιτίας των τριβών και των καταναεμημένων απωλειών είναι μικρότερη από την εσωτερική ροπή. Η εσωτερική ροπή ονομάζεται αναπτυσσόμενη ή

ηλεκτρομαγνητική ροπή. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή ορίζεται από την αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύ και την κυκλική ταχύτητα του κινητήρα, ή ισοδύναμα από την ισχύ διακένου και τη σύγχρονη ταχύτητα.

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{(1-s)P_{ag}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (1.8.6)$$

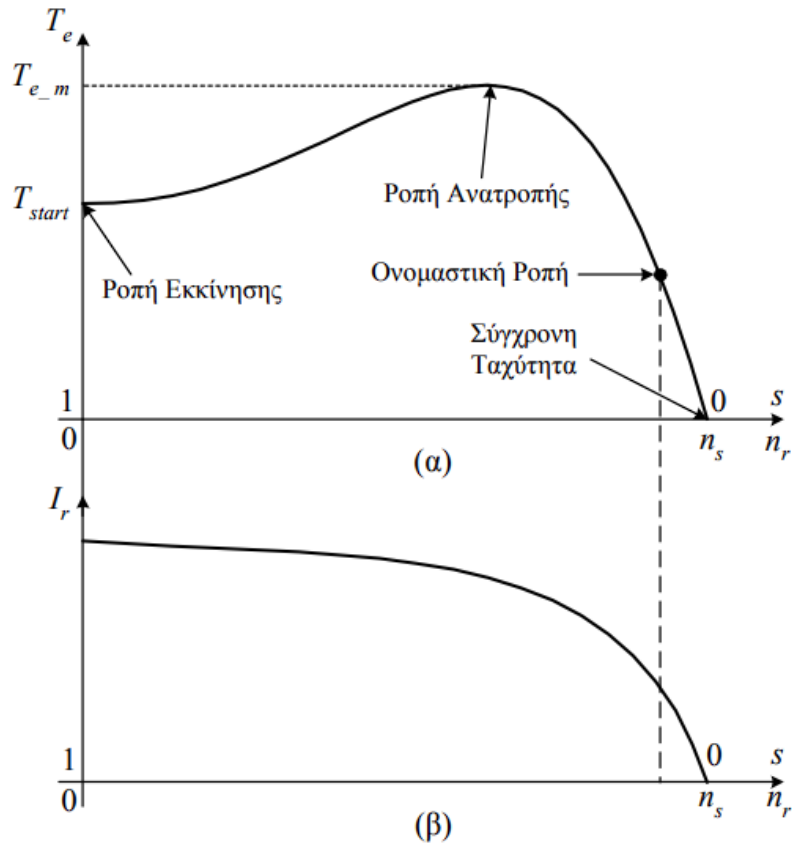
### **1.9 Χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής**

Ο επαγωγικός κινητήρας παράγει ροπή που μεταβάλλεται με την ταχύτητά, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.9.1(α)). Για να ερμηνευθεί αυτή η χαρακτηριστική, υποθέτουμε ότι ο κινητήρας λειτουργεί αρχικά χωρίς κάποιο φορτίο (σχήμα 1.9.2(α)). Αρχικά, όταν ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο, η ταχύτητά του είναι περίπου ίδια με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη (σύγχρονη ταχύτητα). Το μαγνητικό πεδίο του στάτη  $B_{sr}$  δημιουργείται από το ρεύμα παροχής στον στάτη  $I_s$ , ενώ το συνολικό μαγνητικό πεδίο  $B_m$  του κινητήρα εξαρτάται από το ρεύμα μαγνήτισης  $I_m$  που εξαρτάται από την τάση  $E$ , όταν ο κινητήρας είναι ακόρεστος. Επειδή η πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση του στάτη  $R_s + jX_{ls}$  είναι πολύ μικρή, η τάση  $E$  είναι σταθερή και περίπου ίση με την τάση τροφοδοσίας  $V$ . Επομένως, το ολικό μαγνητικό πεδίο στο διάκενο του κινητήρα είναι σταθερό και ανεξάρτητο από τη ροπή του φορτίου.

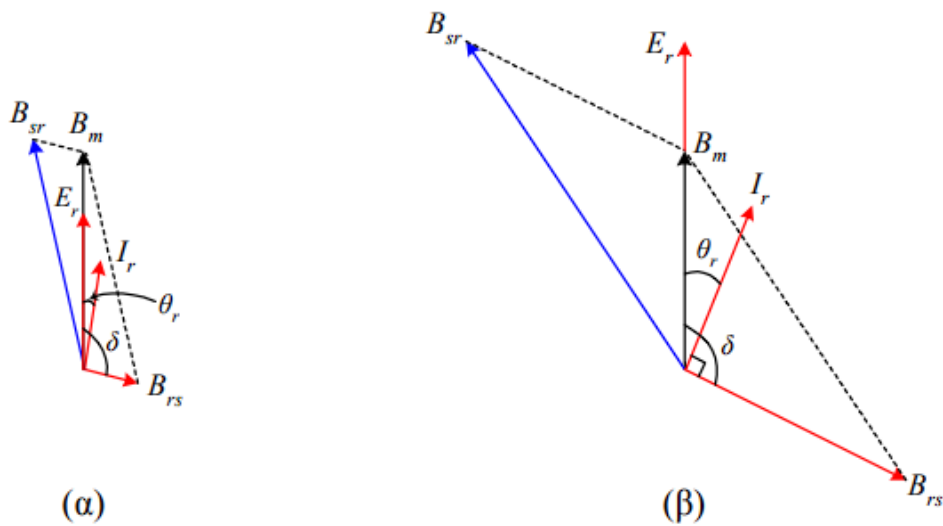
Η τάση που επάγεται στο τύλιγμα του δρομέα  $E_r$  είναι πολύ μικρή, εξαιτίας της μικρής ολίσθησης. Έτσι, το ρεύμα του δρομέα  $I_r$  και το αναπτυσσόμενο πεδίο  $B_{rs}$ , είναι μικρά. Λόγω της μικρής συχνότητας των επαγόμενων τάσεων, η αντίδραση του δρομέα είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ωμική του αντίσταση και η διαφορά φάσης μεταξύ  $I_r$  και  $E_r$  είναι ελάχιστη. Παρόλο που το ρεύμα του δρομέα είναι πολύ μικρό στη λειτουργία χωρίς φορτίο, το ρεύμα τροφοδοσίας του στάτη είναι αρκετά μεγάλο, καθώς παρέχει το ρεύμα μαγνήτισης. Το μέτρο της αναπτυσσόμενης ροπής δίνεται από τη σχέση:

$$T_e = C_T B_m B_{rs} \sin \delta \quad (1.9.1)$$

Επειδή το μαγνητικό πεδίο  $B_{rs}$  είναι μικρό, η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας είναι αρκετή ώστε να υπερνικήσει τις απώλειές του.



**Σχήμα 1.9.1** (α) Τυπική χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα.  
 (β) Μεταβολή του ρεύματος του δρομέα με την ταχύτητα.



**Σχήμα 1.9.2** (α) Μεταβολή των μαγνητικών πεδίων όταν ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο.  
 (β) Μεταβολή των μαγνητικών πεδίων όταν ο κινητήρας λειτουργεί με υψηλό φορτίο.

Όταν η ροπή του φορτίου φτάσει την ονομαστική τιμή, η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται, ενώ η ολίσθηση και η τάση εξ επαγωγής στο δρομέα αυξάνονται. Η αυξημένη τάση  $E_r$  προκαλεί την αύξηση του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου στο δρομέα. Ταυτόχρονα, η αύξηση της συχνότητας στο δρομέα έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διαφορά φάσης μεταξύ των  $E_r$  και  $I_r$  όπως φαίνεται στο σχήμα 1.9.2.(α). Η αντίδραση του δρομέα  $sX_{lr}$  είναι τώρα παραπλήσια της ωμικής του αντίστασης  $R_r$ . Η αύξηση του πεδίου  $B_{rs}$  αυξάνει την αναπτυσσόμενη ροπή, ενώ αντίθετα, η αύξηση της γωνίας  $\delta$ , η οποία είναι μεγαλύτερη από  $90^\circ$ , μειώνει τη ροπή. Καθώς η επίδραση του πεδίου είναι μεγαλύτερη από την επίδραση της γωνίας, η ροπή αυξάνεται.

Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα  $B_{rs}$  υπερσχύει της γωνίας  $\delta$ , μέχρι κάποια τιμή του φορτίου, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή και ονομάζεται ροπή ανατροπής και είναι 2-3 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής (σχήμα 1.9.1.(α)). Όταν η ροπή του φορτίου γίνει μεγαλύτερη από τη ροπή ανατροπής, η επίδραση του  $\sin\delta$  είναι μεγαλύτερη από εκείνη του μαγνητικού πεδίου και η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας μειώνεται. Το αποτέλεσμα στην περίπτωση αυτή είναι ο κινητήρας να σταματήσει.

Η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα σε σχέση με την ταχύτητα φαίνεται στο σχήμα 1.9.1.(β). Για μικρές τιμές της ολίσθησης  $s$ , η μεταβολή της ροπής και του ρεύματος του δρομέα είναι γραμμική με την ολίσθηση. Αυτό οφείλεται στην αμελητέα αντίδραση του δρομέα  $X'_{lr}$ , συγκριτικά με την  $R'_r/s$ . Για ροπές μεγαλύτερες της ονομαστικής, η συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα είναι αρκετά μεγάλη, η αντίδραση του δρομέα γίνεται συγκρίσιμη με την  $R'_r/s$ , και ο συντελεστής ισχύος του δρομέα  $\cos\theta_r = \sin\delta$  μειώνεται. Για ροπές μεγαλύτερες από την ονομαστική, μειώνεται η μεταβολή της ροπής και του ρεύματος του δρομέα. Για ροπές μεγαλύτερες από τη ροπή ανατροπής, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα μειώνεται αρκετά, η ροπή μειώνεται αντί για να αυξάνεται, ενώ το ρεύμα του δρομέα είναι περίπου σταθερό.

Η ροπή που αναπτύσσει η ασύγχρονη μηχανή στη μηδενική ταχύτητα, ονομάζεται ροπή εκκίνησης και είναι κατά περίπου 150% μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή.

## **1.10 Υπολογισμός ροπής επαγωγικών κινητήρων**

Για τον υπολογισμό της ροπής που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας, από την εξίσωση 1.9.1. πρέπει να γνωρίζουμε την ισχύ του διακένου αέρος. Για τον υπολογισμό αυτής όμως, πρέπει να γνωρίζουμε το ρεύμα στο δρομέα. Για τον υπολογισμό του ρεύματος δρομέα στο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα (σχήμα 1.10.1.(α)), αντικαθιστούμε το τμήμα του κυκλώματος αριστερά των σημείων A–B, με το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin. Η τάση και η σύνθετη αντίσταση Thevenin ορίζονται από τις σχέσεις:

$$V_T = \frac{jX_m}{R_s + j(X_{ls} + X_m)} V = V_T \angle \theta_T \quad (1.10.1)$$

$$Z_T = \frac{jX_m(R_s + jX_{ls})}{R_s + j(X_{ls} + X_m)} = R_T + jX_T \approx R_s + jX_{ls} \quad (1.10.2)$$

Το νέο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα φαίνεται στο σχήμα 1.10.1.(β). Το μέτρο του ρεύματος στο δρομέα είναι ίσο με:

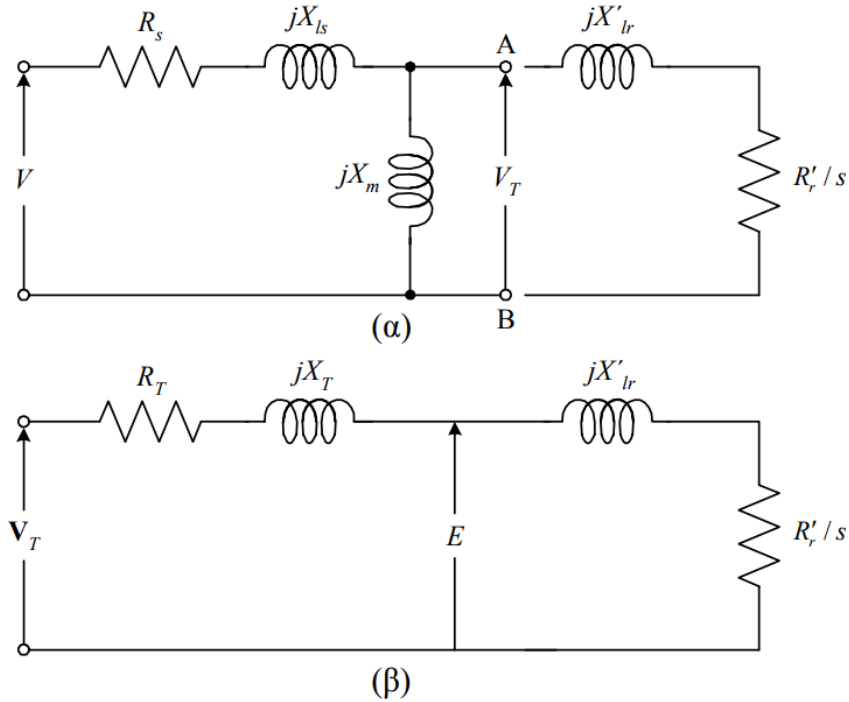
$$I'_r = \frac{V_T}{\sqrt{(R_T + R'_r/2)^2 + (X_T + X'_{lr})^2}} \quad (1.10.3)$$

Η ισχύς του διακένου δίνεται από την σχέση:

$$P_{ag} = 3I'^2_r \frac{R'_r}{s} = \frac{3V_T^2}{(R_T + R'_r/2)^2 + (X_T + X'_{lr})^2} \frac{R'_r}{s} \quad (1.10.4)$$

Η ροπή στο διάκενο δίνεται από την σχέση:

$$T_e = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{3V_T^2}{(R_T + R'_r/2)^2 + (X_T + X'_{lr})^2} \frac{R'_r}{s \omega_s} \quad (1.10.5)$$

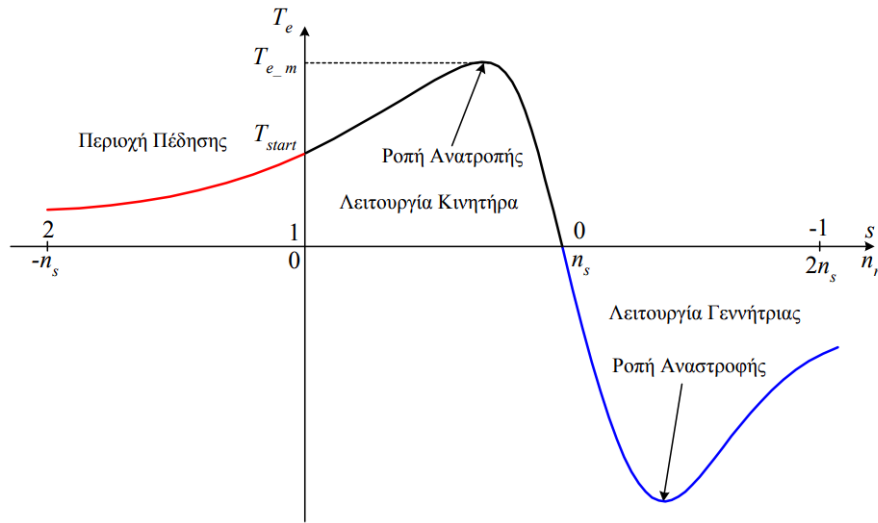


**Σχήμα 1.10.1** (α) Ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα.

(β) Ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα κατά Thevenin.



Από την εξίσωση 1.10.5 προκύπτει ότι, η ροπή του κινητήρα μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της τάσης τροφοδοσίας, δηλαδή μια μικρή μεταβολή στην τάση, μεταβάλλει σημαντικά την αναπτυσσόμενη ροπή. Στο σχήμα 1.10.2 φαίνεται η πλήρης χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα. Όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι μεγαλύτερη από τη σύγχρονη, η ολίσθηση είναι αρνητική και η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Η ολίσθηση είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα στο δεύτερο τεταρτημόριο, όπου η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά του στρεφόμενου πεδίου του στάτη. Η λειτουργία με  $s > 1$  επιτυγχάνεται με την αλλαγή της σύνδεσης δύο φάσεων στα τυλίγματα του στάτη, οπότε αντιστρέφεται η φορά των μαγνητικών πεδίων και ο κινητήρας είναι σε πέδηση.



**Σχήμα 1.10.2** Πλήρης χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα.

Ο κινητήρας αναπτύσσει τη μέγιστη ροπή όταν η ισχύς διακένου, η οποία καταναλώνεται στην ισοδύναμη αντίσταση  $R'_r/s$  είναι μέγιστη. Σύμφωνα με το θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος, η ισχύς διακένου είναι μέγιστη όταν ισχύει η σχέση:

$$\frac{R'_r}{s} = \sqrt{R_T^2 + (X_T + X'_{lr})^2} \quad (1.10.6)$$

Από την οποία προκύπτει η τιμή της ολίσθησης  $s_m$  που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής.

$$s_m = \frac{R'_r}{\sqrt{R_T^2 + (X_T + X'_{lr})^2}} \approx \frac{R'_r}{X_{ls} + X'_{lr}} \quad (1.10.7)$$

Από την εξίσωση 1.10.7, η τιμή της ολίσθησης στη ροπή ανατροπής είναι ανάλογη με την αντίσταση του δρομέα. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του δρομέα, σε τόσο μικρότερη ταχύτητα θα εμφανίζεται η μέγιστη ροπή. Αντικαθιστώντας την 1.10.7 στην 1.10.5, προκύπτει η ροπή ανατροπής.

$$T_{e_m} = \frac{3V_T^2}{2\omega_s \left[ R_T + \sqrt{R_T^2 + (X_T + X'_{lr})^2} \right]} \approx \frac{3V_T^2}{2\omega_s (X_{ls} + X'_{lr})} \quad (1.10.8)$$

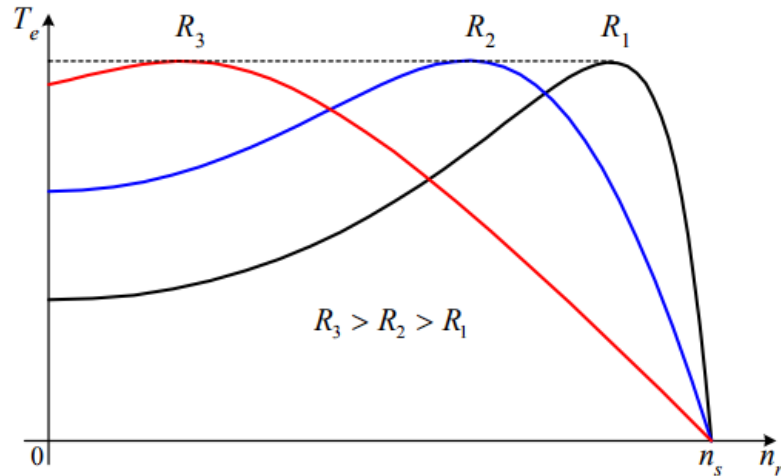
Η ροπή ανατροπής είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης τροφοδοσίας και αντιστρόφως ανάλογη των αντιδράσεων του στάτη και του δρομέα. Έτσι, οι αντιδράσεις σκέδασης πρέπει να είναι μικρές, όταν είναι επιθυμητή μια μεγάλη ροπή ανατροπής.

### **1.11 Κλάσεις των επαγωγικών κινητήρων**

Η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής–ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων εξαρτάται από την ωμική αντίσταση του δρομέα  $R'_r$  και την ολική αντίδραση σκέδασης  $X_{ls} + X'_{lr}$ . Ένας επαγωγικός κινητήρας με μεγάλη αντίσταση στο δρομέα, εμφανίζει τη μέγιστη ροπή σε μικρή ταχύτητα και έχει υψηλή ροπή εκκίνησης. Όμως, οι απώλειες ισχύος στην ονομαστική λειτουργία είναι υψηλές, εξαιτίας της μεγάλης ολίσθησης ( $P_{cu_r} = sP_{ag}$ ). Αντίθετα, ένας κινητήρας με μικρή αντίσταση στο δρομέα παρουσιάζει μικρή ροπή εκκίνησης, μεγάλο ρεύμα εκκίνησης, αλλά και υψηλό βαθμό απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία. Ταυτόχρονα, η μεταβολή της ταχύτητας με το φορτίο είναι περιορισμένη. Ο συνδυασμός της επιθυμητής υψηλής αντίστασης κατά την εκκίνηση και της μικρής αντίστασης στην ονομαστική λειτουργία, επιτυγχάνεται ιδανικά στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα. Κατά την εκκίνηση των κινητήρων δακτυλιοφόρου δρομέα, προστίθενται εξωτερικές αντιστάσεις σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα, το οποίο έχει μικρή αντίσταση. Οι αντιστάσεις αυτές αφαιρούνται στην κανονική λειτουργία του κινητήρα. Με τον τρόπο αυτό οι χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας του κινητήρα μεταβάλλονται όπως στο σχήμα 1.11.1.

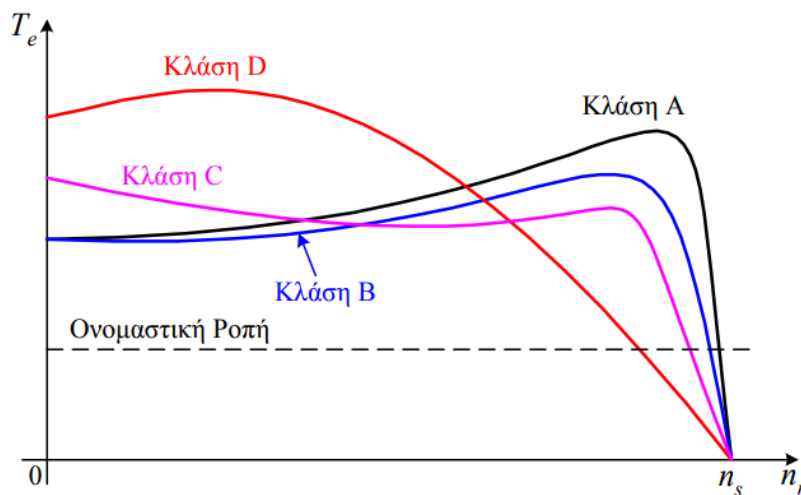
Η επιθυμητή μεταβολή της αντίστασης του δρομέα ανάλογα με την τιμή της ολίσθησης, μπορεί να επιτευχθεί και στους κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, με την κατάλληλη σχεδίαση των αυλακώσεων του δρομέα. Όταν οι αυλακώσεις είναι κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι ράβδοι του τυλίγματος κλωβού είναι σε ισχυρή σύζευξη με το τύλιγμα του στάτη. Επομένως, μόνο ένα μικρό τμήμα της ροής δεν συνδέει το τύλιγμα του στάτη και η αντίδραση σκέδασης του δρομέα  $X'_{lr}$  είναι μικρή.

Αντίθετα, όταν οι ράβδοι είναι τοποθετημένες βαθιά μέσα στο δρομέα, η ροή και η αντίδραση σκέδασης του δρομέα είναι υψηλές. Η ωμική αντίσταση του τυλίγματος κλωβού εξαρτάται από το μέγεθος των αυλακώσεων, η οποία επιβάλλει τη διατομή των ράβδων. Όσο μεγαλύτερη είναι η διατομή των ράβδων, τόσο μικρότερη είναι η ωμική αντίσταση του κλωβού.



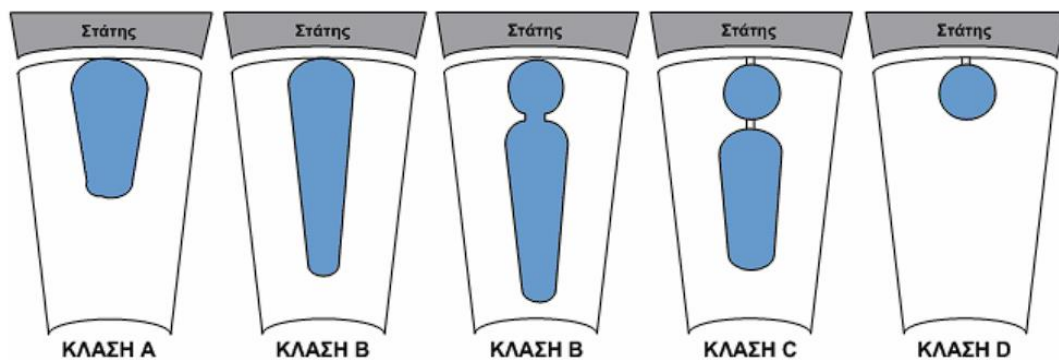
**Σχήμα 1.11.1** Τροποποίηση των χαρακτηριστικών ροπής–ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή της αντίστασης στο τύλιγμα του δρομέα.

Οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη διαμόρφωση των αυλακώσεων του δρομέα, οι οποίες ονομάζονται κλάσεις σχεδίασης. Στους κινητήρες κλάσης A, η διαμόρφωση των αυλακώσεων επιβάλλει τη χρήση ράβδων μεγάλης διατομής, οι οποίες βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα. Έτσι, το τύλιγμα κλωβού εμφανίζει μικρή αντίσταση και αντίδραση. Οι κινητήρες κλάσης A έχουν μικρή ροπή εκκίνησης και μεγάλο ρεύμα εκκίνησης. Όμως, η ολίσθηση του κινητήρα στο ονομαστικό φορτίο είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης να είναι υψηλός. Η χαρακτηριστική ροπής–ταχύτητας του κινητήρα φαίνεται στο σχήμα 1.11.2.



**Σχήμα 1.11.2** Χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου κλωβού, ανάλογα με την κλάση σχεδίασης.

Στους κινητήρες κλάσης B, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ολίσθηση επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με βαθιά αυλάκια. Στην ονομαστική λειτουργία, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων στο δρομέα είναι μικρή, το ρεύμα ρέει ομοιόμορφα σε όλη τη διατομή των ράβδων. Έτσι, η ενεργός διατομή των ράβδων είναι μεγάλη και η αντίσταση του δρομέα μικρή, όπως στους κινητήρες κλάσης A. Κατά την εκκίνηση, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μεγάλη, οι αντιδράσεις σκέδασης των ράβδων είναι υψηλές. Το ρεύμα του δρομέα ρέει μόνο από τις περιοχές των ράβδων που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι οποίες έχουν μικρές αντιδράσεις. Με τον τρόπο αυτό η ενεργός διατομή των ράβδων μειώνεται και η αντίσταση του δρομέα εμφανίζεται αυξημένη κατά την εκκίνηση, όπως στους κινητήρες κλάσης D. Η ροπή εκκίνησης των κινητήρων τάξης B είναι σχεδόν ίση με εκείνη των κινητήρων κλάσης A, αλλά το ρεύμα εκκίνησης είναι μειωμένο κατά περίπου 25%.



**Σχήμα 1.11.3** Αύλακες δρομέα ανάλογα την κλάση

Στους κινητήρες κλάσης C, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ταχύτητα είναι εντονότερη και επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με διπλό κλωβό. Ο κινητήρας έχει ένα τύλιγμα κλωβού, το οποίο αποτελείται από ράβδους μεγάλης διατομής τοποθετημένες στο εσωτερικό του δρομέα. Ένας δεύτερος ανεξάρτητος κλωβός από ράβδους μικρής διατομής βρίσκεται στην επιφάνεια του δρομέα. Στην κανονική λειτουργία του κινητήρα, το ρεύμα του δρομέα ρέει και από τα δύο τυλίγματα κλωβού και ο κινητήρας εμφανίζει μικρή αντίσταση στο δρομέα. Κατά την εκκίνηση, το ρεύμα κυκλοφορεί κυρίως από το εξωτερικά τοποθετημένο τύλιγμα κλωβού, με την υψηλή αντίσταση. Το μειονέκτημα των κινητήρων με διπλό κλωβό είναι το μεγαλύτερο κόστος κατασκευής τους, σε σχέση με τις υπόλοιπους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Στους κινητήρες κλάσης D, οι ράβδοι του κλωβού βρίσκονται και πάλι κοντά στην επιφάνεια του δρομέα αλλά έχουν μικρή διατομή. Έτσι, η αντίσταση του κλωβού είναι μεγάλη, ενώ η αντίδραση σκέδασης είναι μικρή. Ως αποτέλεσμα, οι κινητήρες κλάσης D έχουν μεγάλη ροπή εκκίνησης και μικρό ρεύμα εκκίνησης. Όμως, η ολίσθηση στο ονομαστικό φορτίο είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα τις υψηλές απώλειες στο δρομέα

και το μικρό βαθμό απόδοσης. Επιπλέον, η διακύμανση της ταχύτητας ανάλογα με το φορτίο είναι σημαντική.

Η αντίσταση του δρομέα στους κινητήρες κλάσης A και D είναι σταθερή. Αντίθετα, στους κινητήρες με κλάση σχεδίασης B και C, η αντίσταση του δρομέα μεταβάλλεται με την ολίσθηση. Έτσι, οι κινητήρες αυτοί συνδυάζουν την υψηλή ροπή εκκίνησης των κινητήρων κλάσης D και τον υψηλό βαθμό απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία των κινητήρων κλάσης A.

	<b>Κλάση A</b>	<b>Κλάση B</b>	<b>Κλάση C</b>	<b>Κλάση D</b>
<b>Τύπος</b>	Γενική χρήση	Γενική χρήση	Υψηλή ροπή εκκίνησης	Πολύ υψηλή ροπή εκκίνησης
<b>Ροπή Εκκίνησης</b>	100% της ονομαστικής για μεγάλους κινητήρες, 200% της ονομαστικής για μικρούς	100% της ονομαστικής για μεγάλους κινητήρες, 200% της ονομαστικής για μικρούς	Περίπου 250% της ονομαστικής	>275% της ονομαστικής
<b>Ρεύμα Εκκίνησης</b>	800% του ονομαστικού	500%-600% του ονομαστικού		
<b>Μέγιστη Ροπή</b>	200%-300% της ονομαστικής	≥200% της ονομαστικής	Λίγο χαμηλότερη από την κλάση A	
<b>Μέγιστη Ολίσθηση</b>	<0.2	<0.2		Υψηλή, μπορεί να φτάσει το 1
<b>Ονομαστική Ολίσθηση</b>	<0.05, μικρότερη από ίδιου μεγέθους μηχανές κλάσεως B	Πρέπει να είναι <0.05 Συνήθως <0.03	<0.05, μεγαλύτερη από ίδιου μεγέθους μηχανές κλάσεως B	Υψηλή, τυπικά 0.07 ως 0.11. Μπορεί να φτάσει το 0.17
<b>Εφαρμογές</b>	Ανεμιστήρες, Φυσητήρες, αντλίες, εργαλειομηχανές	Ανεμιστήρες, Φυσητήρες, αντλίες, εργαλειομηχανές	Συμπιεστές, αντλίες, ιμάντες μεταφοράς	Εφαρμογές υψηλής αδράνειας. Π.χ μηχανικές διατρήσεις

**Πίνακας 1.11.1** Χαρακτηριστικά κλάσεων επαγωγικών κινητήρων



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

#### **2.1 Εισαγωγή**

Όταν η επαγωγική μηχανή βρίσκεται σε μόνιμη λειτουργία και η ισχύς είναι σταθερή, οι τάσεις και τα ρεύματα που διακυμαίνονται είναι ημιτονοειδείς συναρτήσεις και η ταχύτητά της παραμένει σταθερή. Για να υπολογιστούν οι παράμετροι της στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούμε το ισοδύναμο κύκλωμα της ασύγχρονης μηχανής. Ωστόσο, όταν πρέπει να εξετάσουμε τη συμπεριφορά της μηχανής σε δυναμικές καταστάσεις, όπως κατά την εκκίνησή της, η αναλυτική λύση των εξισώσεων είναι σχεδόν αδύνατη.

Η ανάγκη για επίλυση πολύπλοκων γεωμετριών, οδήγησε στην ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων επίλυσης προβλημάτων οι οποίες μετατρέπουν το πρόβλημα των συνεχών διαφορικών εξισώσεων σε διακριτό, ώστε να είναι δυνατό να επιλυθεί από τον υπολογιστή. Υπάρχουν πολλές αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, με βασικότερες τις εξής: μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και μέθοδος των οριακών στοιχείων.

Οι αριθμητικές μέθοδοι που αναφέρονται παραπάνω μπορεί να είναι λιγότερο ακριβείς από τις αναλυτικές λύσεις για απλά προβλήματα γεωμετρίας. Ωστόσο, η πολύπλοκη γεωμετρία των ηλεκτρικών μηχανών και οι δυσκολίες στην ανάλυση αυτών των προβλημάτων καθιστούν τις αναλυτικές λύσεις αδύνατες ή ακατάλληλες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μια αριθμητική μέθοδος είναι η καλύτερη επιλογή, καθώς προσφέρει ακριβέστερα αποτελέσματα από τις απλοποιημένες αναλυτικές λύσεις, οι οποίες δεν είναι απόλυτα ακριβείς. Για τη μελέτη των μοντέλων των ηλεκτρικών μηχανών, γίνεται χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

#### **2.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων**

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται στην επίλυση μηχανικών προβλημάτων για την προσέγγιση της λύσης με βάση τα στοιχεία ενός συστήματος. Στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, το πρόβλημα μετατρέπεται σε ένα σύστημα εξισώσεων που περιέχει πεπερασμένο αριθμό αγνώστων, οι οποίες προσεγγίζονται με βάση τη γεωμετρία και την κατανομή τους στον χώρο. Το σύστημα εξισώσεων λύνεται αριθμητικά με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία

είναι μικρά τμήματα του συστήματος και υπολογίζονται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα στοιχεία. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται σε πολλά προβλήματα μηχανικής, όπως η ανάλυση των επιπέδων τάσεων και ρευμάτων σε ηλεκτρικά κυκλώματα, η μελέτη της διάχυσης θερμότητας σε υλικά και η ανάλυση της κίνησης ρευστών και αερίων σε διαφορετικά συστήματα.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων σε επαγωγικές μηχανές. Στην ουσία, η μέθοδος αυτή χωρίζει τον χώρο σε μικρά τμήματα, ονομάζονται στοιχεία, και επιλύει τη διαφορική εξίσωση σε κάθε τμήμα ξεχωριστά.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην προσέγγιση της λύσης της διαφορικής εξίσωσης μέσω μιας γραμμικής συνάρτησης που προσαρμόζεται στις αρχικές συνθήκες και τις οριακές συνθήκες του προβλήματος. Κατά την επίλυση της εξίσωσης στο κάθε στοιχείο, οι γειτονικές τιμές της λύσης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της τιμής της λύσης στο κέντρο του στοιχείου. Οι λύσεις σε κάθε στοιχείο συνενώνονται για να δοθεί η τελική λύση του προβλήματος.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αρκετά αξιόπιστη μέθοδος για τη μελέτη ηλεκτρικών μηχανών και χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία και στην έρευνα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Ένα από τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι είναι προσεγγιστική και όχι ακριβής, καθώς βασίζεται στην αντικατάσταση ενός μεγάλου αριθμού μικρών στοιχείων με συνεχή μεγέθη. Επιπλέον, η μέθοδος μπορεί να παρουσιάσει δυσκολίες στην αντιμετώπιση ορισμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών και χαρακτηριστικών υλικών που είναι απαραίτητα για την επίλυση της μεθόδου. Επιπλέον, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του δικτύου των στοιχείων που χρησιμοποιούνται. Επίσης, με την αύξηση της πολυπλοκότητας του προβλήματος αυξάνεται και ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος για την επίλυσή του.

Οι υπολογιστές και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των εξισώσεων των πεπερασμένων στοιχείων έχουν αναπτυχθεί και βελτιωθεί στη διάρκεια των τελευταίων ετών, και σήμερα είναι δυνατό να υπολογιστούν πολύπλοκα προβλήματα ηλεκτρομηχανολογικής μηχανικής με ακρίβεια και σε λογικό χρόνο. Επιπλέον, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων δίνει τη δυνατότητα να δοκιμάζονται διαφορετικές σχεδιαστικές λύσεις και να βρίσκονται οι βέλτιστες λύσεις στα προβλήματα μηχανολογικής μηχανικής. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει αποδειχθεί αποτελεσματική και αξιόπιστη στη μελέτη ηλεκτρομηχανολογικών προβλημάτων, και έχει ενσωματωθεί στην καθημερινή πρακτική της βιομηχανίας.



### 2.3 Οι εξισώσεις των πεπερασμένων στοιχείων

Ανάλογα με το πρόβλημα υιοθετούνται οι κατάλληλες εξισώσεις για την επίλυση του. Τα προβλήματα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: μαγνητοστατικά και αρμονικά. Στα μαγνητοστατικά προβλήματα, τα μεγέθη είναι σταθερά στο χρόνο, ενώ στα αρμονικά προβλήματα είναι μεταβαλλόμενα στο χρόνο και χρησιμοποιούνται ημιτονοειδείς εκφράσεις για την επίλυσή τους.

Στην περίπτωση των μαγνητοστατικών προβλημάτων που είναι χρονικά αμετάβλητα, η ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$  και η μαγνητική επαγωγή  $B$  δίνονται από τις εξισώσεις του Maxwell:

$$\nabla \times H = J \quad (2.3.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.3.2)$$

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου και η μαγνητική επαγωγή συνδέονται για κάθε υλικό μέσω της μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu$ .

$$B = \mu \cdot H \quad (2.3.3)$$

Η επίλυση των εξισώσεων (2.3.1) και (2.3.2) στις δύο διαστάσεις γίνεται με χρήση του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού  $A$  το οποίο ορίζεται ως:

$$B = \nabla \times A \quad (2.3.4)$$

Αντικαθιστώντας στην (2.3.1), προκύπτει η εξίσωση:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (2.3.5)$$

Για ένα γραμμικό ισотροπικό υλικό και λαμβάνοντας υπόψη την συνθήκη του Coulomb:

$$\nabla \times A = 0 \quad (2.3.6)$$

Η εξίσωση (2.3.5) μετατρέπεται στην εξίσωση:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \quad (2.3.7)$$

Στα χρονικά μεταβαλλόμενα πεδία, δημιουργούνται δινορεύματα σε υλικά που έχουν μη μηδενική αγωγιμότητα  $\sigma$ . Στην περίπτωση αυτή οι εξισώσεις του Maxwell που σχετίζονται με την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου πρέπει να καθορισθούν. Η πυκνότητα ρεύματος  $J$  συνδέεται με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  μέσω της εξίσωσης:

$$J = \sigma E \quad (2.3.8)$$

Το εξ επαγωγής προκαλούμενο ηλεκτρικό πεδίο δίνεται από την σχέση:

$$\nabla \times E = -\frac{dB}{dt} \quad (2.3.9)$$

Αντικαθιστώντας την (2.3.4) στην (2.3.9) προκύπτει:

$$\nabla \times E = -\nabla \times \frac{dA}{dt} \quad (2.3.10)$$

Και αντικαθιστώντας στην (2.3.7) προκύπτει:

$$-\frac{1}{\mu}\nabla^2 A = J - \sigma \frac{dA}{dt} \quad (2.3.11)$$

Για τα προβλήματα δύο διαστάσεων, μόνο η αξονική συνιστώσα του μαγνητικού δυναμικού λαμβάνεται υπόψη. Στην περίπτωση της ανάλυσης της μηχανής με περιστροφή του δρομέα υπό φορτίο, λαμβάνεται υπόψη και η εξίσωση της κίνησης:

$$T = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.3.12)$$

Όπου: T: η ροπή, J: η ροπή αδράνειας και θ: η γωνία. Η ροπή T εμπεριέχει τους όρους:  $T_{Em}$ : ηλεκτρομαγνητική ροπή,  $T_L$ : ροπή φορτίου και  $T_F$ : ροπή τριβών.

$$T = T_{Em} + T_L + T_F \quad (2.3.13)$$

## **2.4 Οριακές συνθήκες**

Οι οριακές συνθήκες τίθενται στο εκάστοτε πρόβλημα για τη σωστή επίλυση του προβλήματος και τη μείωση της επιφάνειας επίλυσης, άρα και τη μείωση του χρόνου. Χωρίζονται σε 4 κατηγορίες οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

### **2.4.1 Οριακή συνθήκη Dirichlet**

Η συνθήκη που περιγράφεται αναφέρεται στην περίπτωση όπου το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό έχει σταθερή τιμή και η ροή εφάπτεται στο όριο του προβλήματος χωρίς να το διαπερνά. Για την επίλυση του προβλήματος, συνήθως χρησιμοποιείται η ομογενοποιημένη συνθήκη Dirichlet στα εξωτερικά όρια του χώρου, η οποία θέτει το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό  $A_z$  ίσο με το μηδέν. Αυτή η συνθήκη είναι ισοδύναμη με τη θεώρηση ότι το χώρος πέρα από τα εξωτερικά όρια είναι γεμάτος με ένα μονωτικό υλικό που έχει μηδενική μαγνητική διαπερατότητα.

### **2.4.2 Οριακή συνθήκη Neumann**

Η συνθήκη αυτή αναφέρεται στον περιορισμό της παραγώγου του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού στο όριο του προβλήματος, καθιστώντας τις γραμμές της ροής κάθετες στο όριο. Η εφαρμογή της συνθήκης Neumann προκαλεί τη μείωση της μαγνητικής επαγωγής  $B$  με αποτέλεσμα να έχει μόνο συνιστώσες στη γραμμή του ορίου. Είναι ισοδύναμη με την ύπαρξη ενός εξωτερικού υλικού με άπειρη μαγνητική διαπερατότητα, καθώς αυτό το υλικό απορροφά το μαγνητικό πεδίο και αποτρέπει τη διείσδυσή του στο εσωτερικό του υλικού.

### **2.4.3 Οριακή συνθήκη Robin**

Η οριακή συνθήκη Robin, ορίζει μια σχέση ανάμεσα στην τιμή του μαγνητικού δυναμικού  $A$  και στην κάθετη παράγωγο του στο όριο. Αυτό το είδος οριακής συνθήκης είναι συνδυασμός των οριακών συνθηκών Dirichlet και Neumann, και χρησιμοποιείται συχνά στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων σε προβλήματα με δινορεύματα.

### **2.4.4 Περιοδική και Αντιπεριοδική Οριακή συνθήκη**

Η περιοδική συνθήκη απαιτεί το μαγνητικό πεδίο να επαναλαμβάνεται κάθε ορισμένη περίοδο στις γραμμές του ορίου. Η χρήση αυτής της συνθήκης μπορεί να μειώσει αρκετά τον χρόνο επίλυσης του προβλήματος, καθώς απλοποιεί το μαγνητικό πεδίο στην επαναλαμβανόμενη περίοδο. Αντίθετα, η αντιπεριοδική συνθήκη χρησιμοποιείται σε προβλήματα όπου δεν υπάρχει περιοδική δομή και απαιτεί την ισορροπία του μαγνητικού πεδίου σε δύο αντίθετα σημεία του ορίου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί θέτοντας το μαγνητικό δυναμικό σε αυτά τα σημεία ίσο αλλά με αντίθετο πρόσημο, ώστε να αντισταθμίζουν το ένα το άλλο.

## **2.5 Υλοποίηση των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων**

Το πρόγραμμα αναλύει το μαγνητικό πεδίο που παράγει ένας κινητήρας, λαμβάνοντας υπόψη τα υλικά και τις διαστάσεις του κινητήρα. Η ανάλυση μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική, με τη δεύτερη να λαμβάνει υπόψη τη  $B-H$  μαγνητική χαρακτηριστική των υλικών. Για την επίλυση του προβλήματος, χρησιμοποιείται ένα εξωτερικό κύκλωμα που είναι συνδεδεμένο με μια πηγή τάσης και τροφοδοτεί το μοντέλο του κινητήρα. Τα τυλίγματα του κινητήρα θεωρούνται ως αντιδράσεις-πηγία συνδεδεμένες σε σειρά με εξωτερικές αντιστάσεις και με την πηγή τάσης.

Η διαδικασία ανάλυσης μιας ασύγχρονης μηχανής με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί τη δημιουργία της γεωμετρίας ενός μοντέλου τριών ή δύο διαστάσεων σε ένα γραφικό περιβάλλον. Το μοντέλο αυτό διακρίνεται από πεπερασμένα στοιχεία και δημιουργείται ένα πλέγμα. Στη συνέχεια, επιλέγεται η μέθοδος επίλυσης και προστίθενται επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται για την επίλυση. Αφού προετοιμαστούν τα δεδομένα, χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα επίλυσης (solver) για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος. Αφού ολοκληρωθεί η επίλυση του προβλήματος, χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα μετεπεξεργασίας (post-processor) για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

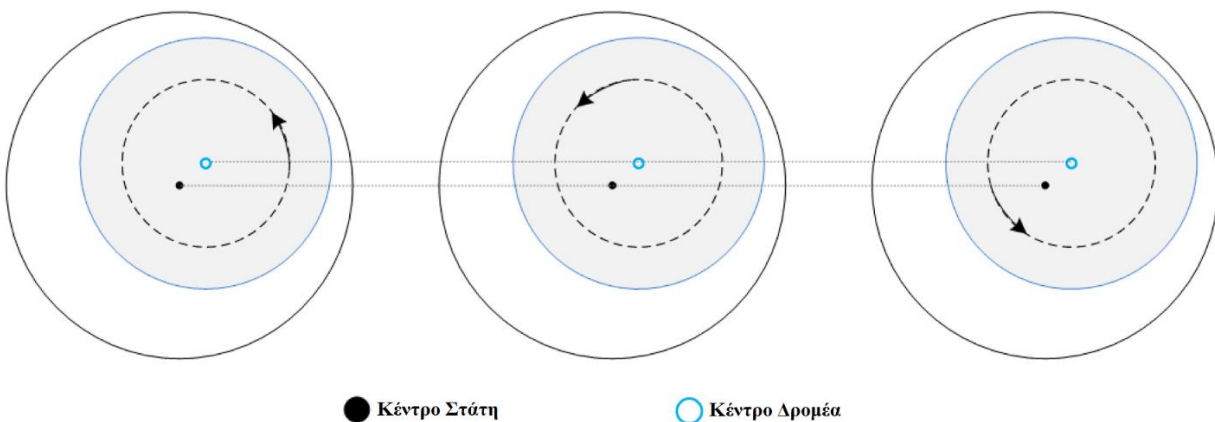
### ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΥΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

#### 3.1 Εισαγωγή

Ένας από τους πιο συνηθισμένους τύπους μηχανικής βλάβης σε επαγωγικούς κινητήρες είναι το σφάλμα εκκεντρότητας. Αυτό προκαλεί ένα άνισο διάκενο αέρος ανάμεσα σε στάτη και δρομέα με αποτέλεσμα τη μη ισορροπημένη μαγνητική έλξη. Εάν δε διαγνωσθούν έγκαιρα, τα σφάλματα εκκεντρότητας μπορεί να οδηγήσουν σε τριβή μεταξύ στάτη και δρομέα και πλήρη καταστροφή της ηλεκτρικής μηχανής. Υπάρχουν τρία είδη σφαλμάτων εκκεντρότητας: στατική, δυναμική και μεικτή εκκεντρότητα.

#### 3.2 Στατική εκκεντρότητα

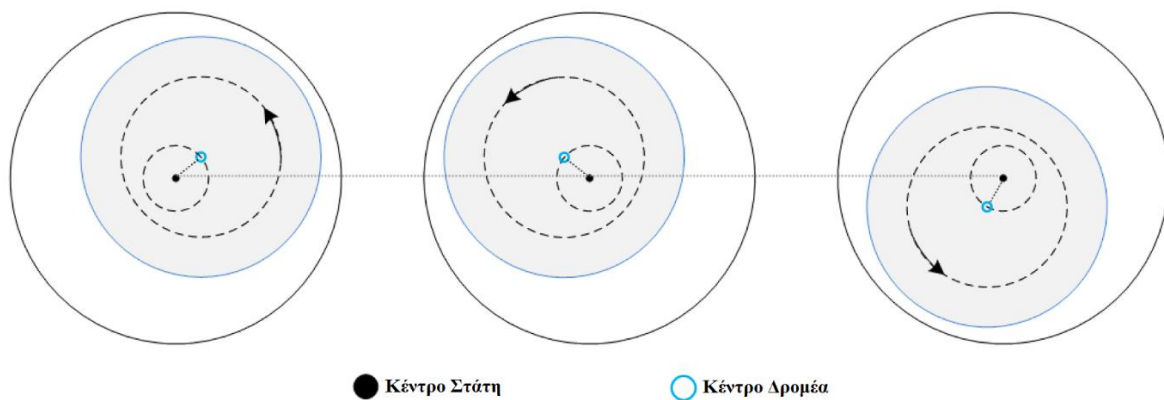
Στη στατική εκκεντρότητα, ο άξονας περιστροφής του δρομέα δεν είναι ίδιος με το γεωμετρικό κέντρο του στάτη. Δηλαδή ο δρομέας περιστρέφεται γύρω από έναν καινούριο σταθερό άξονα με αποτέλεσμα να υπάρχει ασυμμετρία στο διάκενο αέρος, η οποία όμως είναι σταθερή και δεν μεταβάλλεται στο χρόνο. Τέτοιου είδους ασυμμετρία προκαλείται συνήθως στην κατασκευή της ηλεκτρικής μηχανής από την λανθασμένη στήριξη του δρομέα στα έδρανα. Στο σχήμα 3.2.1 φαίνεται η όμως γραφική αναπαράσταση της στατικής εκκεντρότητας.



Σχήμα 3.2.1 Γραφική αναπαράσταση στατικής εκκεντρότητας

### **3.3 Δυναμική εκκεντρότητα**

Στη δυναμική εκκεντρότητα, ο άξονας περιστροφής του δρομέα δεν είναι ίδιος με το γεωμετρικό κέντρο του ίδιου του δρομέα. Δηλαδή ο δρομέας περιστρέφεται γύρω από έναν καινούριο, και διαφορετικό από το κέντρο του, άξονα με αποτέλεσμα να υπάρχει ασυμμετρία στο διάκενο αέρος, η οποία όμως δεν είναι πλέον σταθερή και μεταβάλλεται στο χρόνο σε αντίθεση με την περίπτωση της στατικής εκκεντρότητας. Τέτοιου είδους ασυμμετρία προκαλείται συνήθως από στραβό άξονα, φθορά στα έδρανα και γενικά μηχανικές καταπονήσεις. Στο σχήμα 3.3.1 φαίνεται η γραφική αναπαράσταση της δυναμικής εκκεντρότητας.



Σχήμα 3.3.1 Γραφική αναπαράσταση δυναμικής εκκεντρότητας

### **3.4 Μεικτή εκκεντρότητα**

Η μεικτή εκκεντρότητα συνδυάζει τα χαρακτηριστικά της στατικής και της δυναμικής εκκεντρότητας. Στην περίπτωση αυτή, ο άξονας περιστροφής του δρομέα δεν συμπίπτει ούτε με το γεωμετρικό κέντρο του στάτη ούτε με το γεωμετρικό κέντρο του δρομέα αλλά περιστρέφεται γύρω από έναν καινούριο άξονα με αποτέλεσμα να υπάρχει μια μεταβαλλόμενη στο χρόνο ασυμμετρία στο διάκενο αέρος. Τέτοιου είδους ασυμμετρία προκαλείται από τους λόγους που αναφέρθηκαν στις δύο παραπάνω εκκεντρότητες. Στο σχήμα 3.4.1 φαίνεται η γραφική αναπαράσταση της μεικτής εκκεντρότητας.





Σχήμα 3.4.1 Γραφική αναπαράσταση μεικτής εκκεντρότητας

### 3.5 Μέθοδοι προσδιορισμού σφαλμάτων εκκεντρότητας

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι για την αξιόπιστη διάγνωση της εκκεντρότητας σε μηχανές. Τα περισσότερα άρθρα χρησιμοποιούν την διαδεδομένη μέθοδο MCSA, η οποία βασίζεται στην ανάλυση του φάσματος συχνοτήτων των ρευμάτων του στάτη για τη διάγνωση των σφαλμάτων. Η παρακάτω εξίσωση 3.5.1 παρέχει τις αρμονικές της στατικής και δυναμικής εκκεντρότητας, καθώς και τις αρμονικές που σχετίζονται με το δρομέα PSH (Principle Slot Harmonics) σε μια τριφασική επαγωγική μηχανή.

$$f_{ecc} = f_s [(KR + n_d) \left( \frac{1-s}{p} \right) + n_{ws}] \quad (3.5.1)$$

Όπου  $f_{ecc}$  είναι η αρμονική συχνότητα της εκκεντρότητας του διακένου αέρα που μελετάται,  $f_s$  είναι η συχνότητα παροχής σε Hz, K είναι ένας ακέραιος, R είναι ο αριθμός των αυλακώσεων του δρομέα, το  $n_d$  είναι μηδέν για στατική εκκεντρότητα και  $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots$  για δυναμική εκκεντρότητα, s: ολίσθηση, p: αριθμός ζευγών πόλων και  $n_{ws} : \pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \dots$  η τάξη αρμονικών τροφοδοσίας του στάτη.

Η παρακάτω εξίσωση 3.5.2 προσδιορίζει τον αριθμό αυλακώσεων του δρομέα των επαγωγικών μηχανών για τις οποίες η εξίσωση 3.5.1 προσφέρει καλή διαγνωστική ικανότητα.

$$R = 2p[3(m \pm q) \pm r] \pm k \quad (3.5.2)$$

Όπου  $m \pm q = 0, 1, 2, \dots$ ,  $r = 0, 1$  και  $k = 1, 2$ . Η εξίσωση 3.5.2, για  $k = 1$ , δίνει περιττό αριθμό αυλακώσεων του δρομέα και η εξίσωση 3.5.1 λειτουργεί πολύ καλά για την ανίχνευση σφαλμάτων εκκεντρότητας. Αντίθετα, για άρτιους αριθμούς αυλακώσεων, ο τύπος αυτός δεν είναι τόσο αποτελεσματικός και μπορεί

να ανιχνεύει αδύναμες αρμονικές σφαλμάτων. Για  $k = 0$  η εξίσωση 3.5.2, δίνει τον αριθμό των αυλακώσεων για μηχανές που παρουσιάζουν PSH. Δηλαδή για αυτές τις περιπτώσεις, αν υπάρχει στατική εκκεντρότητα, η εξίσωση 3.5.1 δεν προσφέρει καλή διαγνωστική ικανότητα διότι οι υπογραφές του σφάλματος εμφανίζονται στις ίδιες συχνότητες με τις PSH. Η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα της MCSA παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5.

Για το πρόβλημα της διάγνωσης στατικής εκκεντρότητας στους κινητήρες που παράγουν συχνότητες PSH, υπάρχει επίσης η μέθοδος SFD-MCSA (Static Fault Diagnosis-Motor Current Signature Analysis). Η μέθοδος είναι μία off-line διαγνωστική μέθοδος, καθώς το σφάλμα που προκύπτει από τη στατική εκκεντρότητα της μηχανής εξαρτάται αποκλειστικά από την ποιότητα της κατασκευής της και όχι από τη λειτουργία της. Συνεπώς, με την μέθοδο αυτή αναγνωρίζεται το σφάλμα και το επίπεδό του πριν η ηλεκτρική μηχανή παραδοθεί στον αγοραστή και μπει σε λειτουργία. Η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα της SFD-MCSA παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5.

Μια επίσης διαδεδομένη on-line διαγνωστική μέθοδος, που βασίζεται στην ανάλυση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό ή εξωτερικό της μηχανής για τον προσδιορισμό των σφαλμάτων εκκεντρότητας, είναι η stray flux analysis/monitoring. Η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα της παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5.

Γενικά υπάρχουν πολλές μέθοδοι που μπορούν να προσδιορίσουν τα σφάλματα της εκκεντρότητας στις επαγωγικές μηχανές. Μία από αυτές είναι η μέθοδος του διανύσματος Park, όπου το διάνυσμα του ρεύματος περιστρέφεται στον άξονα του συστήματος συντεταγμένων και η εκκεντρότητα μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέτρηση της διαφοράς μεταξύ των δύο εκτιμήσεων της εκκεντρότητας που προκύπτουν από την απεικόνιση του διανύσματος. Επίσης, μία άλλη μέθοδος είναι η χρήση του φάσματος της ισχύος, όπου η εκκεντρότητα μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέτρηση της απόστασης μεταξύ των δύο κορυφών του φάσματος. Συνολικά, ο προσδιορισμός της εκκεντρότητας ώστε να αποφεύγεται νωρίς το σφάλμα είναι απαραίτητος για την αποτελεσματική λειτουργία και αποφυγή καταστροφής των ηλεκτρικών μηχανών.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**

#### **4.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η μοντελοποίηση του επαγωγικού κινητήρα. Αναφέρονται τα ονομαστικά χαρακτηριστικά και παρουσιάζεται η γεωμετρία του κινητήρα καθώς επίσης περιγράφεται η σχεδίαση στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων femm. Τέλος παρουσιάζεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων.

#### **4.2 Επαγωγικός Διπολικός Κινητήρας Ισχύος 22kW**

##### **4.2.1 Ονομαστικά χαρακτηριστικά**

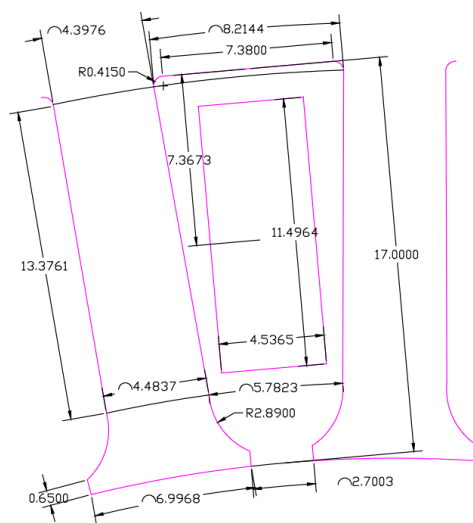
Στον πίνακα 4.2.1.1 παρουσιάζονται τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του επαγωγικού κινητήρα που θα μελετηθεί.

<b>Τάση (V)</b>	230V (Delta Connected)
<b>Ρεύμα (I)</b>	37.75 A
<b>Πόλοι (P)</b>	2
<b>Συχνότητα (f)</b>	50Hz
<b>Σύγχρονη Ταχύτητα (<math>n_s</math>)</b>	3000rpm
<b>Ασύγχρονη Ταχύτητα (n)</b>	2900rpm
<b>Ολίσθηση (s)</b>	3.33%
<b>Μηχανική Ισχύς (<math>P_{μηχ}</math>)</b>	22000W
<b>Ηλεκτρική Ισχύς (<math>P_{ηλ}</math>)</b>	24910.1W

Πίνακας 4.2.1.1 Ονομαστικά χαρακτηριστικά κινητήρα

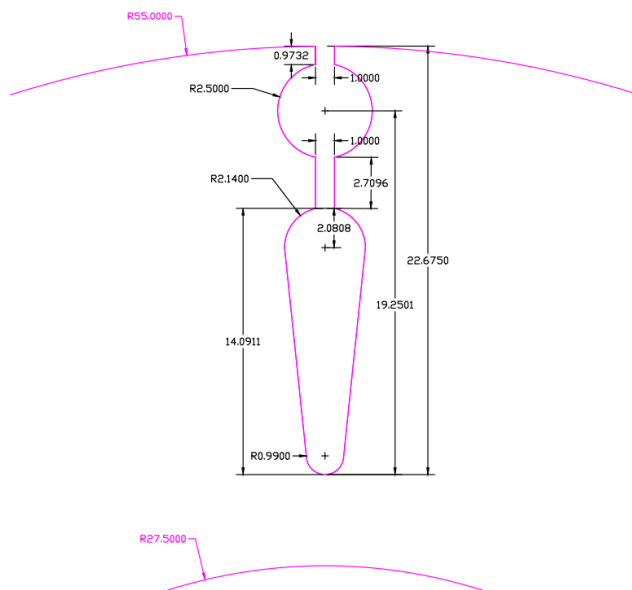
##### **4.2.2 Γεωμετρία επαγωγικού κινητήρα**

Ο κινητήρας αποτελείται από στάτη εξωτερικής διαμέτρου 200 mm και εσωτερικής 111.12 mm. Ο στάτης αποτελείται από 36 οδοντώσεις ύψους 17 mm, πλάτους επάνω πλευράς 8.21 mm και πλάτους κάτω πλευράς 5.78 mm. Οι αύλακες του στάτη είναι ημίκλειστες, με άνοιγμα προς το διάκενο 2.7 mm. Η γεωμετρία του δοντιού του στάτη φαίνεται στο σχήμα 4.2.2.1.



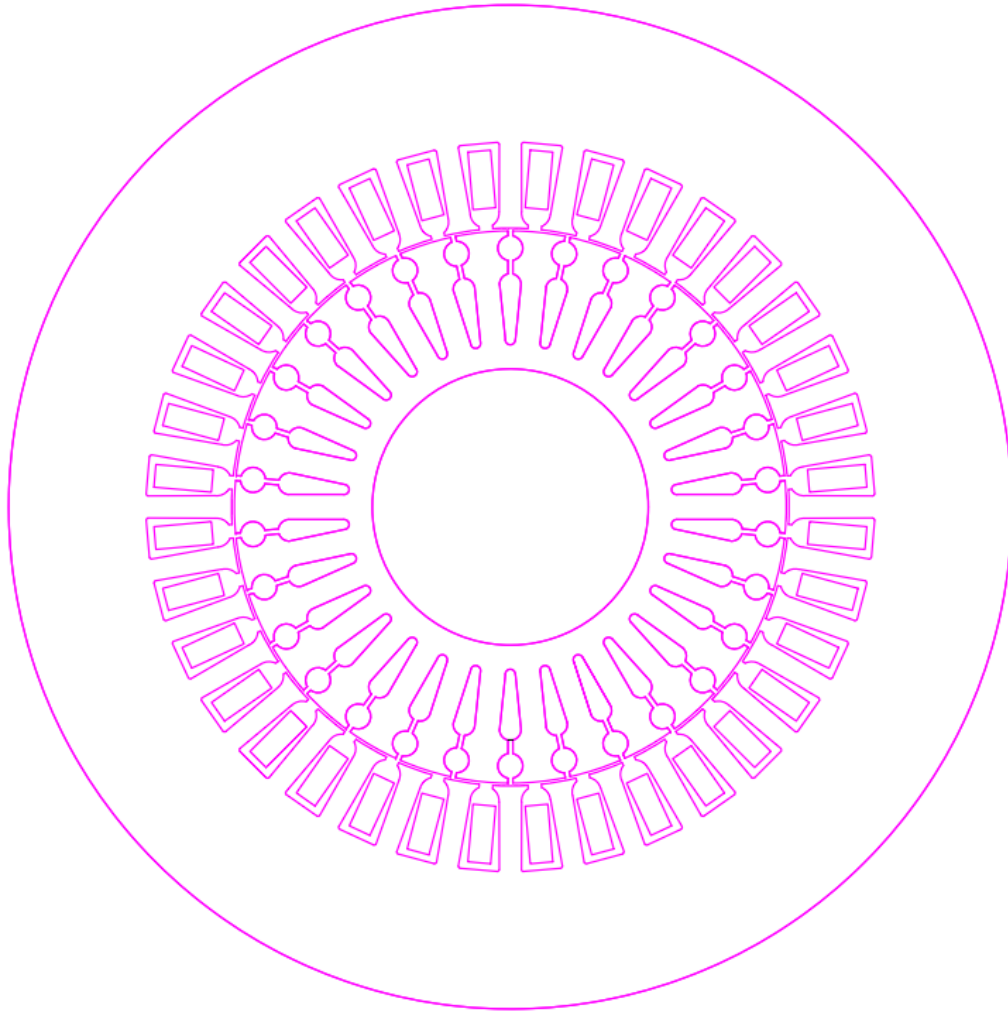
**Σχήμα 4.2.2.1** Γεωμετρία δοντιού στάτη

Ο κινητήρας αποτελείται από δρομέα εξωτερικής διαμέτρου 110 mm και εσωτερικής 55 mm. Ο δρομέας αποτελείται από 30 οδοντώσεις ύψους 22.675 mm. Οι αύλακες του δρομέα είναι κλάσης B και η γεωμετρία τους φαίνεται στο σχήμα 4.2.2.2.



**Σχήμα 4.2.2.2** Γεωμετρία αύλακα δρομέα

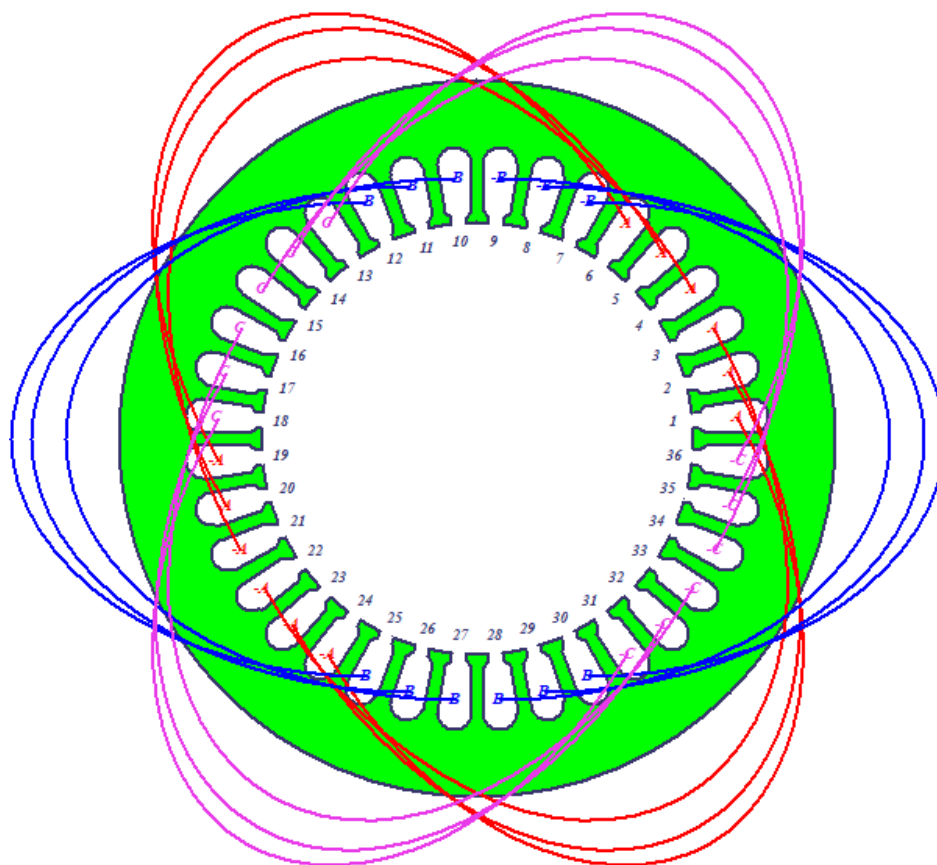
Το μήκος της μηχανής είναι 300mm και το διάκενο αέρος του κινητήρα έχει πλάτος 0.56 mm. Στο σχήμα 4.2.2.3 φαίνεται η κάθετη τομή του κινητήρα.



**Σχήμα 4.2.2.3** Γεωμετρία επαγωγικού κινητήρα

### 4.2.3 Τύλιγμα στάτη

Ο στάτης του κινητήρα φέρει τύλιγμα βροχοειδούς μορφής. Κάθε φάση αποτελείται από 6 πηνία 11 σπειρών συνδεδεμένα σε σειρά. Δηλαδή, το πρώτο πηνίο έχει τη μία πλευρά (ρεύμα που εισρέει) στον αύλακα 1, και την άλλη πλευρά (ρεύμα που ρέει έξω) στον αύλακα 24. Έπειτα το πηνίο συνδέεται με το δεύτερο πηνίο, το οποίο έχει τη μία πλευρά (ρεύμα που εισρέει) στον αύλακα 2 και την άλλη πλευρά (ρεύμα που ρέει έξω) στον αύλακα 23, και ούτω καθεξής, μέχρι να φτάσει στο πηνίο 6 της φάσης Α. Το ίδιο ισχύει και για τις άλλες δύο φάσεις. Στο παρακάτω σχήμα και πίνακα 4.2.3.1 φαίνεται η συνδεσμολογία και φορά των πηνίων του στάτη.



**Σχήμα 4.2.3.1** Συνδεσμολογία πηνίων επαγωγικού κινητήρα

	Phase	Turns	In Slot	Out Slot
Coil_1	A	11	1	24
Coil_2	A	11	2	23
Coil_3	A	11	3	22
Coil_4	A	11	4	21
Coil_5	A	11	5	20
Coil_6	A	11	6	19
Coil_7	B	11	30	7
Coil_8	B	11	29	8
Coil_9	B	11	28	9
Coil_10	B	11	27	10
Coil_11	B	11	26	11
Coil_12	B	11	25	12
Coil_13	C	11	13	36
Coil_14	C	11	14	35
Coil_15	C	11	15	34
Coil_16	C	11	16	33
Coil_17	C	11	17	32
Coil_18	C	11	18	31

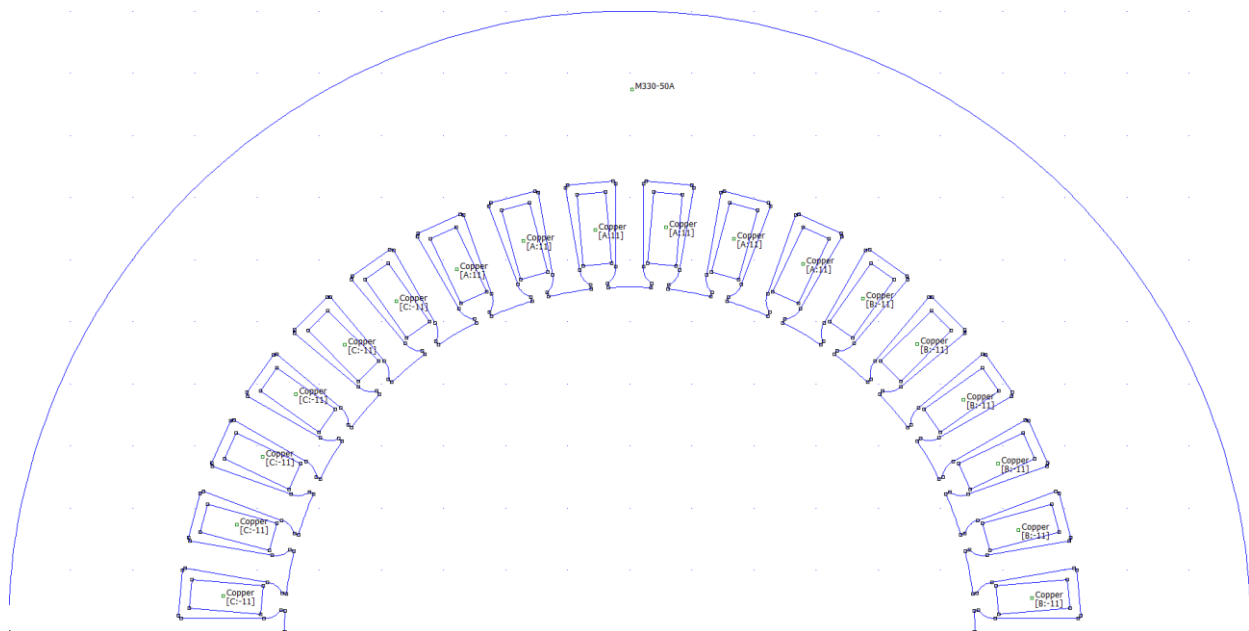
**Πίνακας 4.2.3.1** Συνδεσμολογία πηνίων επαγωγικού κινητήρα

### **4.3 Υλοποίηση του επαγωγικού κινητήρα στο πρόγραμμα femm**

Η υλοποίηση της γεωμετρίας του κινητήρα πραγματοποιήθηκε αρχικά σε πρόγραμμα CAD και έπειτα μεταφέρθηκε στο πρόγραμμα femm. Ο κινητήρας είναι διπολικός οπότε λόγω συμμετρίας και για να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος, σχεδιάστηκε το μισό της μηχανής, δηλαδή ένας πόλος με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες που θα αναλυθούν παρακάτω.

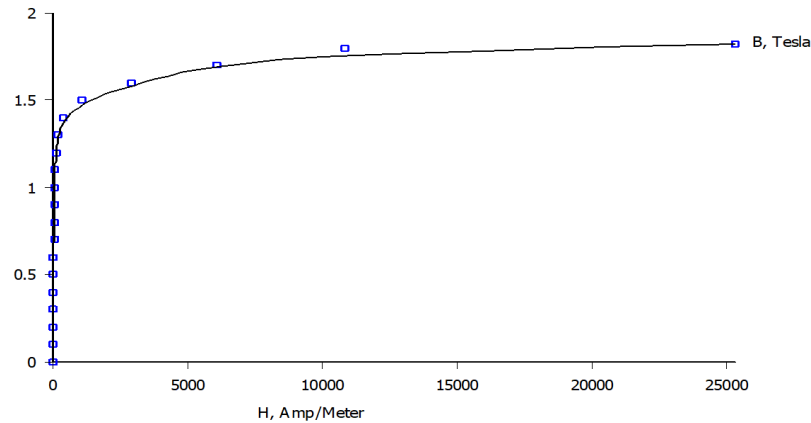
#### **4.3.1 Σχεδίαση στάτη**

Σε κάθε πόλο ο στάτης έχει 12 οδοντώσεις και αύλακες. Για το υλικό του στάτη χρησιμοποιήθηκε ο σίδηρος M5330-50A με ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma=2 \text{ MS/m}$  και συντελεστή πληρότητας 0.95. Η γεωμετρία του ενός πόλου του στάτη φαίνεται στο σχήμα 3.3.1.1, ενώ η καμπύλη μαγνητικής επαγωγής – μαγνητικού φάσματος ( $B - H$ ) του σιδήρου φαίνεται στο σχήμα 4.3.1.2.



**Σχήμα 4.3.1.1** Γεωμετρία του στάτη

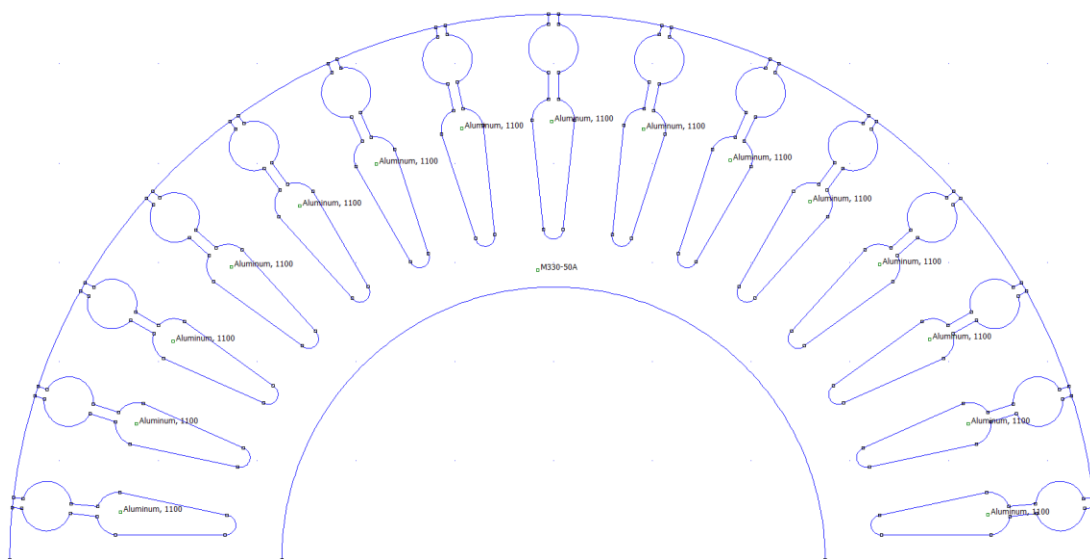




**Σχήμα 4.3.1.2** Καμπύλη μαγνητικής επαγωγής – μαγνητικού φάσματος (B – H), του υλικού του στάτη

### 4.3.2 Σχεδίαση δρομέα

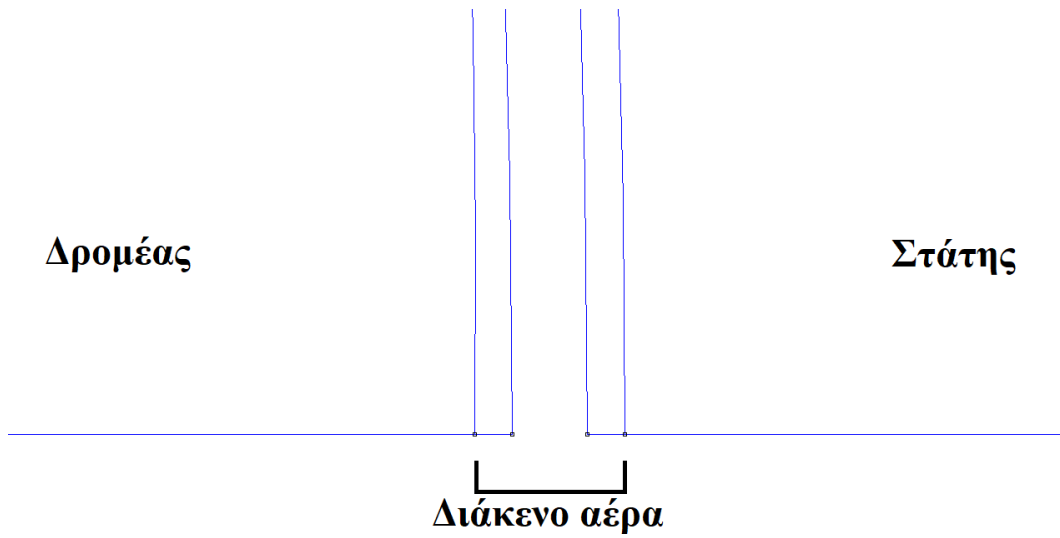
Το υλικό του δρομέα είναι ίδιο με του στάτη (σχήμα 4.3.1.2), ενώ οι μπάρες του είναι αλουμίνιο αγωγιμότητας  $\sigma = 38 \text{ MS/m}$ . Σε κάθε πόλο έχει 15 μπάρες και η γεωμετρία του φαίνεται στο σχήμα 4.3.2.1.



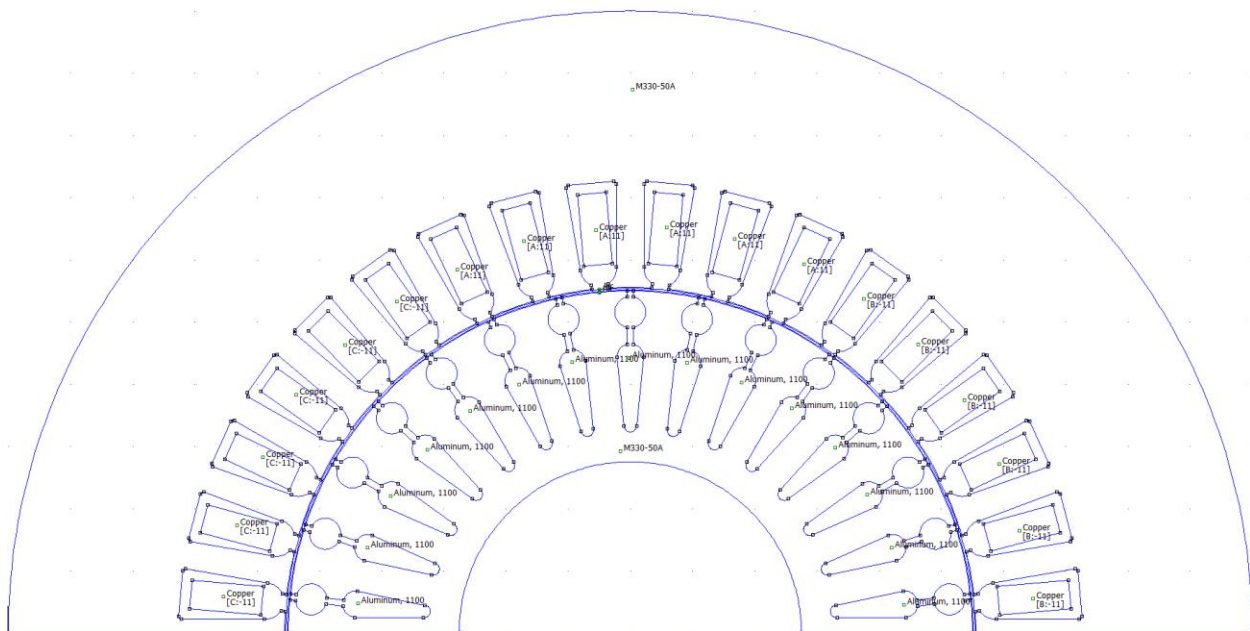
**Σχήμα 4.3.2.1** Γεωμετρία του δρομέα

### 4.3.3 Διάκενο αέρος

Το διάκενο έχει πλάτος 0.56mm και αποτελεί το σημαντικότερο κομμάτι της σχεδίασης διότι μέσω αυτού πραγματοποιείται η προσομοίωση της κίνηση του δρομέα ως προς τον στάτη. Χωρίστηκε σε 3 μέρη ώστε να σχηματιστεί μικρό πλέγμα στις περιοχές αυτές και να υπάρχει όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια. Η γεωμετρία του διακένου φαίνεται στο σχήμα 4.3.3.1 και η ολοκληρωμένη γεωμετρία του κινητήρα στο σχήμα 4.3.3.2



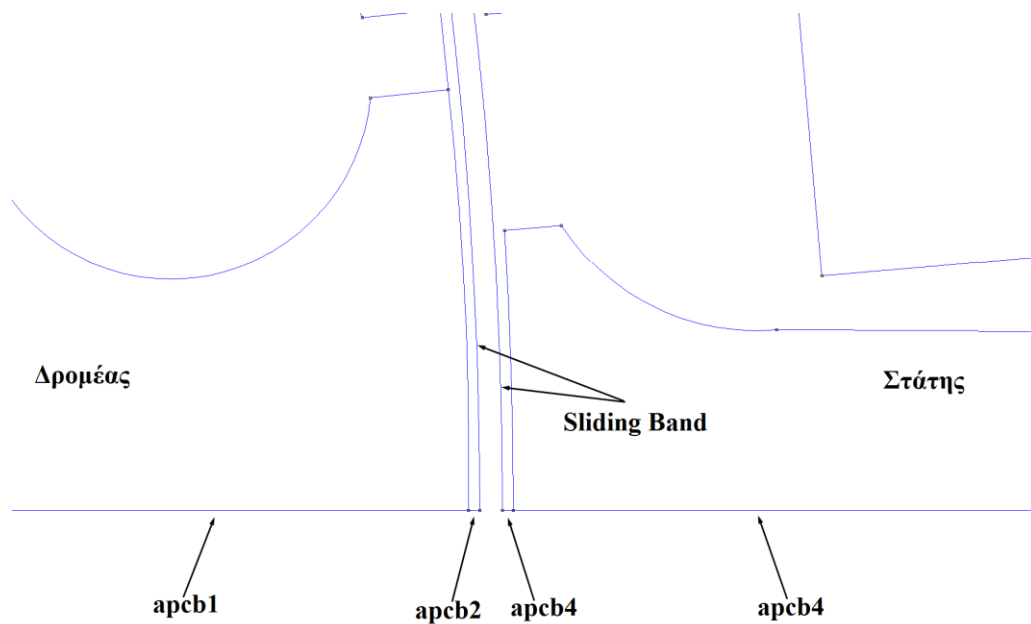
Σχήμα 4.3.3.1 Διάκενο αέρος



Σχήμα 4.3.3.2 Γεωμετρία κινητήρα

#### 4.3.4 Οριακές συνθήκες

Στο μοντέλο, μια περιοχή χωρίς πλέγμα σχεδιάζεται στη μέση του διακένου αέρα και η οριακή συνθήκη αντιπεριοδικού διακένου αέρα εφαρμόζεται και στις δύο πλευρές του διακένου, όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 4.3.4.1. Οι συνθήκες arbc1-arbc4 αντιπροσωπεύουν κανονικές αντιπεριοδικές οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται σε περιοδικές ακμές της μηχανής.



**Σχήμα 4.3.4.1** Οριακές συνθήκες διακένου

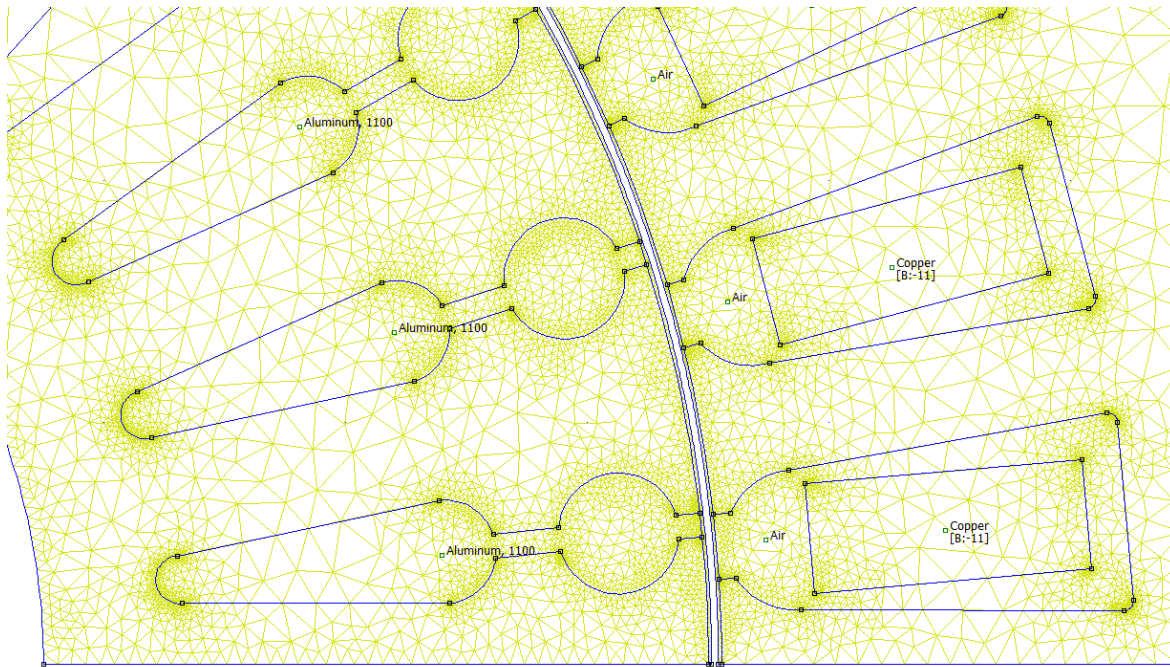
Για το sliding band επιλέγεται “Anti-periodic Air Gap” λόγω της αντιπεριοδικής γεωμετρίας του προβλήματος. Αν μοντελοποιούνταν δύο πόλοι ή ολόκληρη η μηχανή, θα χρησιμοποιούνταν αντ' αυτού η οριακή συνθήκη “Periodic Air Gap”. Το sliding band έχει δύο παραμέτρους, τα "Inner angle" και "Outer angle", τα οποία χρησιμοποιούνται για να ορίσουν μια μετατόπιση μεταξύ των δύο πλευρών του ορίου. Αυτές οι γωνίες ουσιαστικά ορίζουν την κίνηση του δρομέα. Το πλαίσιο εσωτερικής γωνίας ορίζει τη γωνιακή μετατόπιση του δρομέα και το πλαίσιο εξωτερικής γωνίας ορίζει τη μετατόπιση του στάτη. Εδώ, η εξωτερική γωνία τίθεται στο μηδέν που υποδηλώνει καμία κίνηση του στάτη, ενώ η εσωτερική γωνία ορίζεται στον επιθυμητό προσανατολισμό του δρομέα.

Εσωτερικά, το πρόγραμμα δημιουργεί ένα σταθερό πλέγμα στο διάκενο αέρα. Στη συνέχεια, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί κυβική παρεμβολή για να χαρτογραφήσει τους κόμβους σε επιφάνειες που ορίζονται ως οριακές συνθήκες διακένου αέρα στα τετράπλευρα στοιχεία στο διάκενο αέρα. Δεδομένου ότι χρησιμοποιείται μια υψηλής τάξης, συνεχώς διαφοροποιήσιμη παρεμβολή, η σύνθεση παράγει ομαλή τάση και αποτελέσματα ροπής καθώς ο δρομέας κινείται.

Ο δρομέας και ο στάτης δεν κινούνται πραγματικά μεταξύ τους, αλλά η λύση εμφανίζει τα αποτελέσματα της αλλαγής στη θέση του δρομέα. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν αλλαγές στη διαμόρφωση του προβλήματος όταν ο δρομέας κινείται, το πλέγμα παραμένει ίδιο ανεξάρτητα από τη θέση του δρομέα. Δεδομένου ότι το πλέγμα του δρομέα και του στάτη είναι το ίδιο ανεξάρτητα από τη γωνία του δρομέα, το remeshing εξαλείφεται ως πηγή αριθμητικών σφαλμάτων.

### 4.3.5 Πλέγμα

Αφού ολοκληρωθεί η γεωμετρία και ο ορισμός των οριακών συνθηκών δημιουργείται το πλέγμα. Στο σχήμα 4.3.5.1 φαίνεται η δημιουργία του πλέγματος από το πρόγραμμα femm. Παρατηρείται ότι στο διαχωρισμένο διάκενο που χρειάζεται περισσότερη ακρίβεια, το πλέγμα είναι αρκετά μικρότερο από ότι στις υπόλοιπες περιοχές της σχεδίασης.



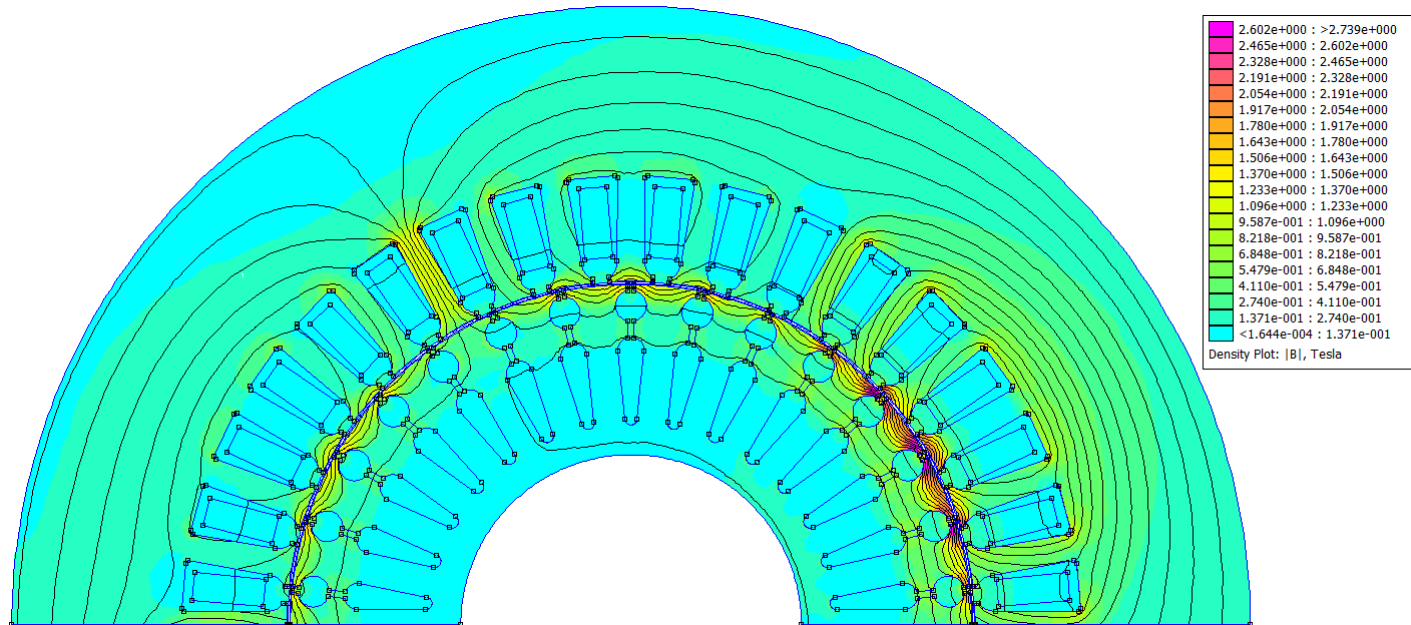
Σχήμα 4.3.5.1 Οριακές συνθήκες διακένου

### 4.4 Προσομοίωση

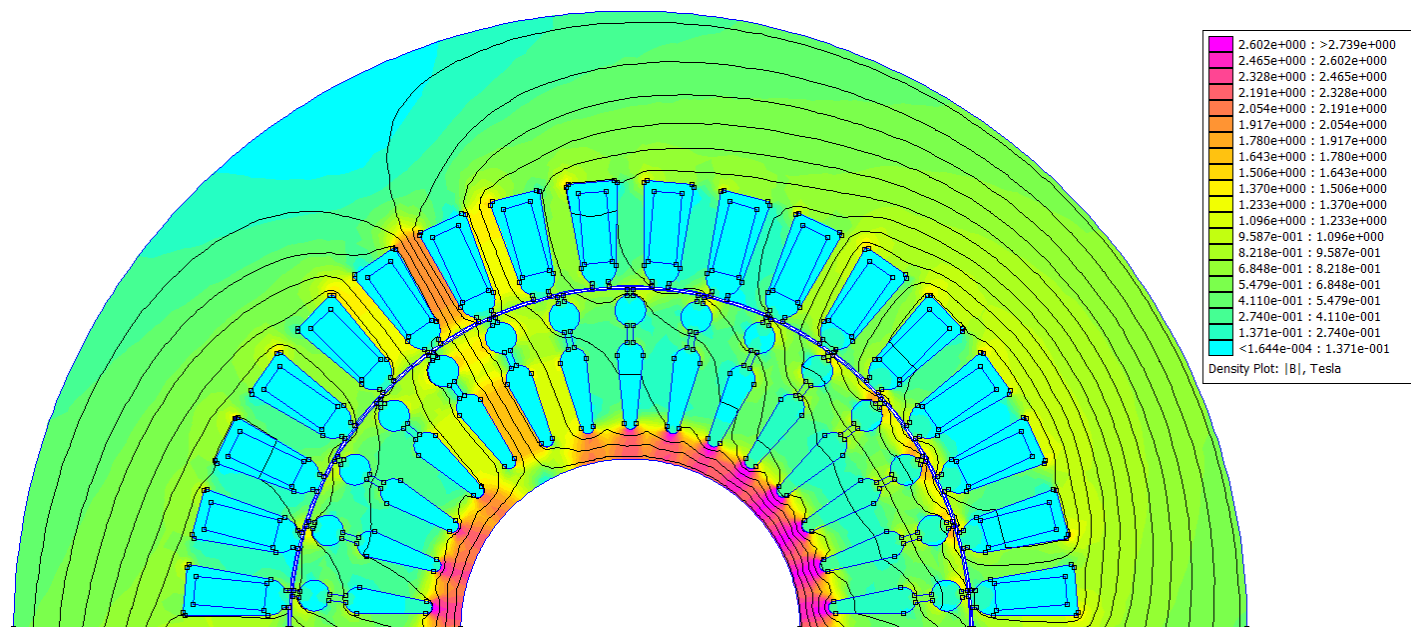
Το femm δέχεται σαν είσοδο το ρεύμα  $V_{peak}$  για κάθε πηνίο του στάτη για να προσομοιώσει την ηλεκτρική μηχανή. Στην περίπτωση μας έχουμε  $V_{rms} = 37.75V$ , οπότε τα πηνία θα έχουν μέγιστη φόρτιση  $\sqrt{2} \cdot V_{rms}$ .

Επίσης το femm πρέπει να γνωρίζει τη ολίσθηση της μηχανής, δηλαδή την ταχύτητα του δρομέα, ώστε να την προσομοιώσει. Γνωρίζοντας ότι η μηχανή με φορτίο 72.44Nm κινείται με 2900rpm στην μόνιμη κατάσταση, η ολίσθηση είναι  $s = 0.0333$  και δίνεται στο femm σαν συχνότητα  $0.333 \cdot (f_s = 50Hz)$ . Για την εύρεση της ροπής δημιουργήθηκε κώδικας στο πρόγραμμα MATLAB, ο οποίος καλούσε το πρόγραμμα femm και προσομοίωνε τη μηχανή για ολίσθηση από 0.0333 και μετρούσε τη ροπή στο sliding band του σχήματος 4.3.4.1.

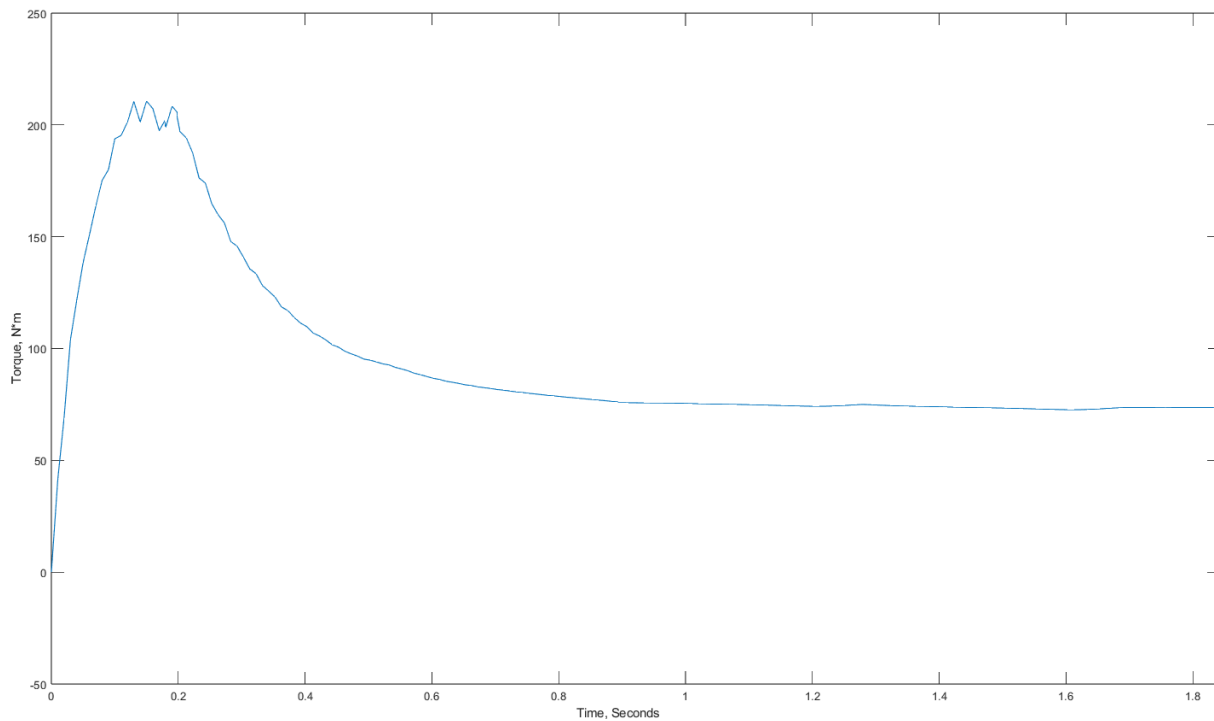
Στα σχήματα 4.4.1 , 4.4.2 φαίνεται η χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής κατά την εκκίνηση του κινητήρα και την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, αντίστοιχα. Στο σχήμα 4.4.3 παρουσιάζεται ροπή της μηχανής.



Σχήμα 4.4.1 Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής κατά την εκκίνηση του κινητήρα



Σχήμα 4.4.2 Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας



**Σχήμα 4.4.3** Ροπή

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα, η σχεδίαση και λειτουργία της επαγωγικής μηχανής είναι η επιθυμητή. Μέσω του προγράμματος femm μπορεί να γίνει σχετικά εύκολα ηλεκτρομαγνητική ανάλυση ενός επαγωγικού κινητήρα. Επειδή όμως για τον σκοπό της διπλωματικής εργασίας έχουμε να διαχειριστούμε σφάλματα εκκεντρότητας τα οποία για να προσδιοριστούν απαιτείται η μελέτη και επεξεργασία μεγεθών τα οποία δύσκολα εξάγονται από το femm, επιλέχθηκε το πρόγραμμα Ansys Maxwell.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑΣ** **ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**

#### **5.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό γίνονται οι προσομοιώσεις του επαγωγικού κινητήρα και αναλύονται τα αποτελέσματα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Ansys Maxwell. Η μηχανή προσομοιώθηκε για το ίδιο φορτίο, αρχικά υπό υγιείς συνθήκες και έπειτα υπό στατικά, δυναμικά και μικτά σφάλματα εκκεντρότητας. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που επηρεάστηκαν λόγω των σφαλμάτων μελετήθηκαν ώστε να βρεθούν τρόποι διάγνωσης της εκκεντρότητας μιας επαγωγικής μηχανής.

#### **5.2 Υλοποίηση του επαγωγικού κινητήρα στο πρόγραμμα Ansys Maxwell**

Το Ansys Maxwell είναι το κορυφαίο λογισμικό προσομοίωσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στη βιομηχανία για το σχεδιασμό και την ανάλυση ηλεκτρικών κινητήρων, αισθητήρων, μετασχηματιστών και άλλων ηλεκτρομαγνητικών και ηλεκτρομηχανικών συσκευών. Με το Maxwell χαρακτηρίζονται με ακρίβεια η μη γραμμική, μεταβατική κατάσταση των ηλεκτρομηχανικών εξαρτημάτων και οι επιπτώσεις τους στο κύκλωμα κίνησης και στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου.

Η γεωμετρία της μηχανής που μελετάται είναι ίδια με αυτή του προγράμματος femm όποτε δεν χρειάζεται να αναλυθεί ξανά ο τρόπος σχεδίασης για το πρόγραμμα Ansys, επομένως απλά αναφέρεται περιληπτικά παρακάτω.

Η επαγωγικής μηχανής σχεδιάστηκε αρχικά στο πρόγραμμα Ansys RMxprt, το οποίο είναι ένα εργαλείο σχεδιασμού ηλεκτρικής μηχανής βασισμένο σε πρότυπα και παρέχει μεγάλη ευκολία στη δημιουργία της γεωμετρίας. Αφού σχεδιάστηκε η μηχανή εκεί, μεταφέρθηκε στο Ansys Maxwell για την παραμετροποίηση και προσομοίωση της λειτουργίας της.

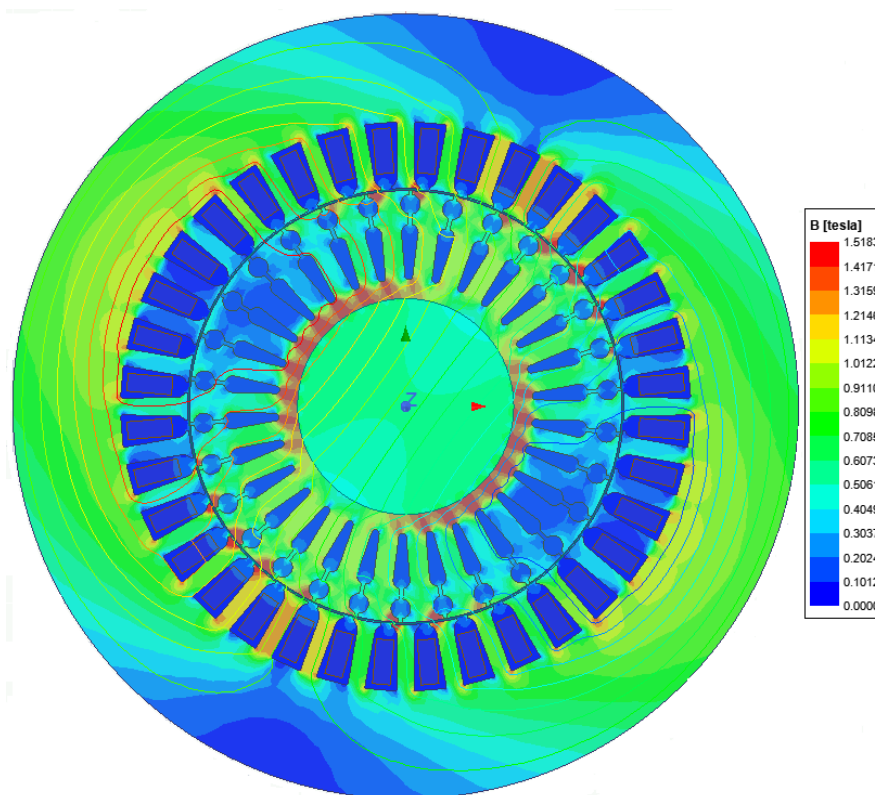
##### **5.2.1 Προσομοίωση**

Για την προσομοίωση της επαγωγικής μηχανής στην υγιή περίπτωση καθώς και στις περιπτώσεις σφαλμάτων εκκεντρότητας, οι παράμετροι παραμένουν ίδιες με την μόνη διαφορά να είναι ο άξονας γύρω από τον οποίο περιστρέφεται ο δρομέας. Τα τυλίγματα της μηχανής είναι συνδεδεσολογία τριγώνου, έχουν

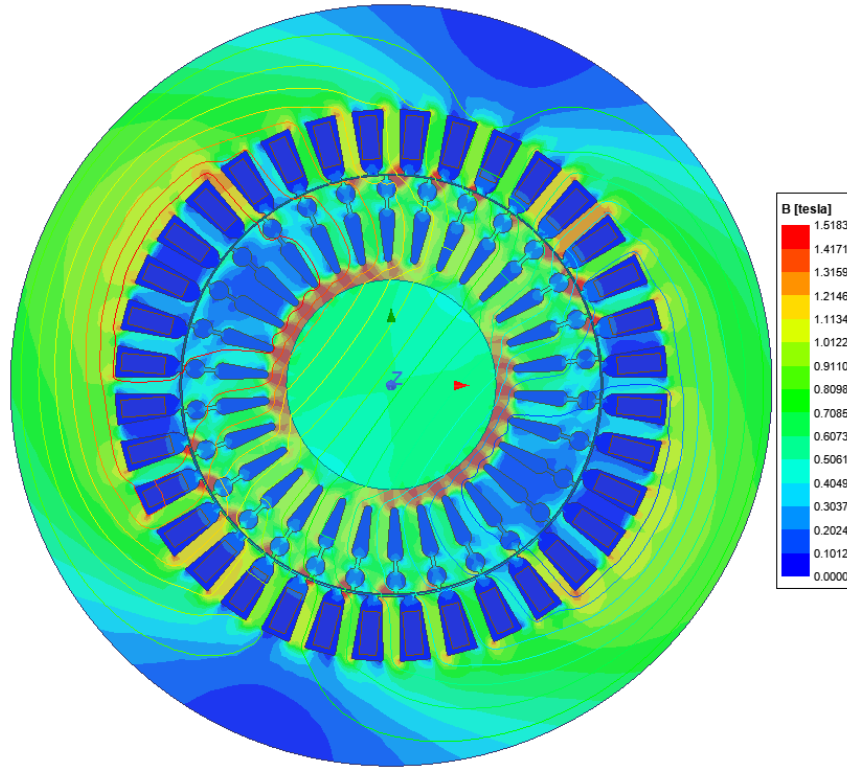


αντίσταση φάσης 0.25ohm και τροφοδοτούνται με 230V. Η μηχανή έχει παράμετρο αδράνειας 0.15 kg\*m<sup>2</sup> και ροπή φορτίου 72.44Nm. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι δέκα, διάρκειας 3.5 δευτερολέπτων, μία για την υγιή μηχανή και τρεις (βαθμοί σοβαρότητας) για κάθε ένα από τα τρία σφάλματα: στατικής (SE), δυναμικής (DE) και μικτής (ME) εκκεντρότητας.

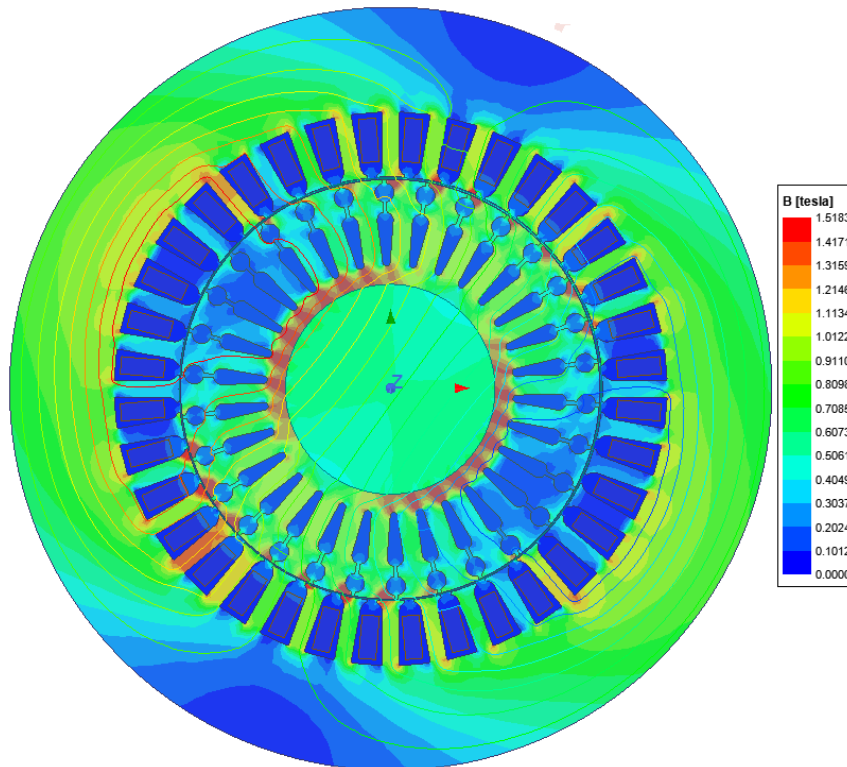
Στο σχήμα 5.2.1.1 φαίνεται η χωρική κατανομή του πλάτους της μαγνητικής επαγωγής και ροής όταν οι κινητήρες λειτουργούν περίπου στα 2900rpm, για την υγιή περίπτωση σε σύγκριση με τις τρεις χειρότερες περιπτώσεις σφαλμάτων(SE 30%, DE 30%, ME 15%). Γίνεται αμέσως φανερό πως όταν ο κινητήρας είναι έκκεντρος, είναι πολύ δύσκολη η ανίχνευση τυχόν ασυμμετρίας στην κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο χώρο. Αυτό συμβαίνει διότι ο βαθμός σφάλματος είναι πολύ μικρός σε σχέση με το μέγεθος του κινητήρα. Το διάκενο της μηχανής είναι 0.56mm οπότε ακόμα και με το χειρότερο βαθμό σφάλματος 30%, ο δρομέας μετακινείται κατά 0.168mm.



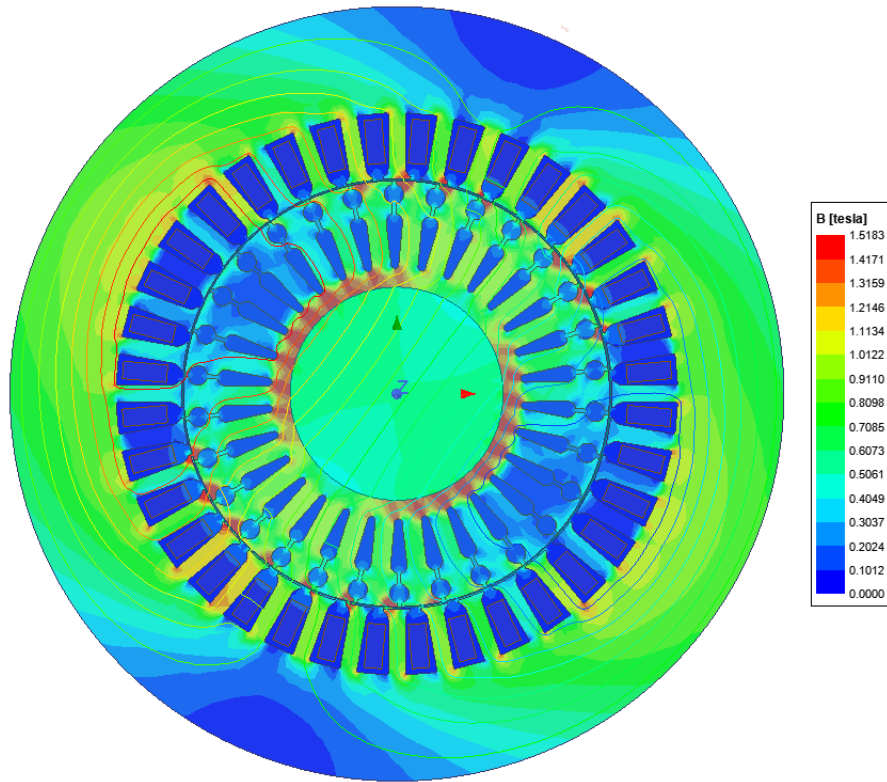
**Σχήμα 5.2.1.1** (α) Χωρική κατανομή της μαγνητικής επαγωγής και ροής στον κινητήρα υπό υγιείς συνθήκες



Σχήμα 5.2.1.1 (β) Χωρική κατανομή της μαγνητικής επαγωγής και ροής στον κινητήρα με SE 30%



Σχήμα 5.2.1.1 (γ) Χωρική κατανομή της μαγνητικής επαγωγής και ροής στον κινητήρα με DE 30%

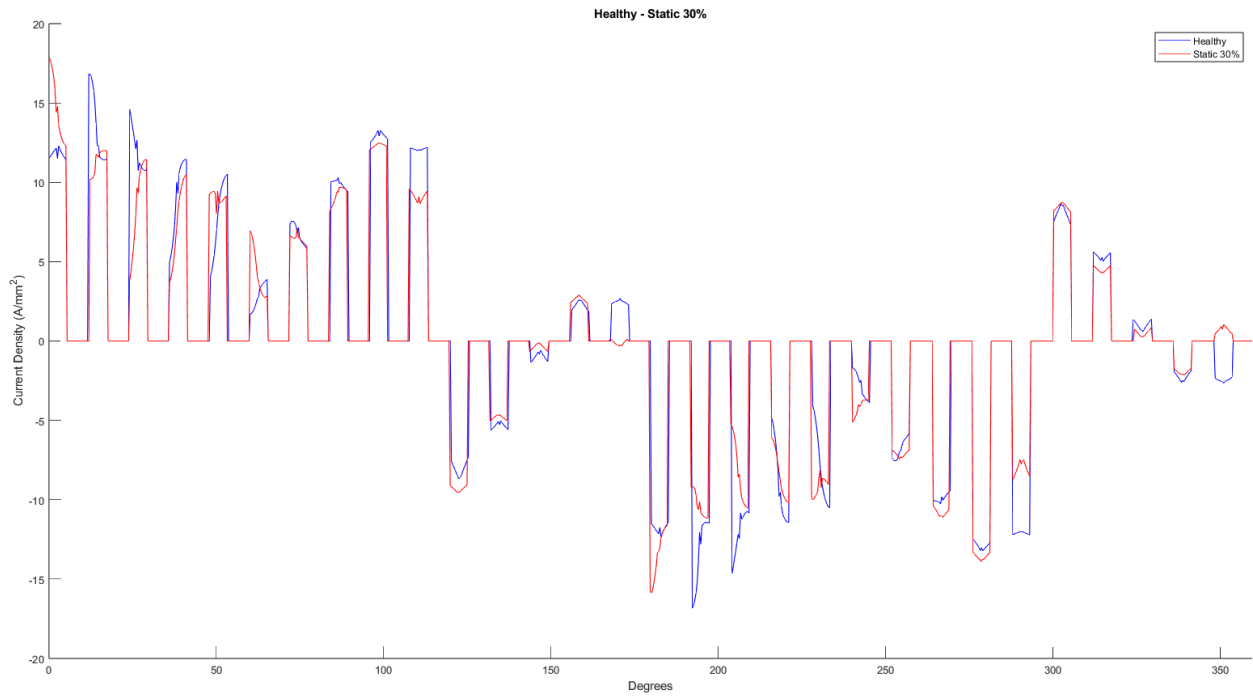


**Σχήμα 5.2.1.1** (δ) Χωρική κατανομή της μαγνητικής επαγωγής και ροής στον κινητήρα με ME 15%

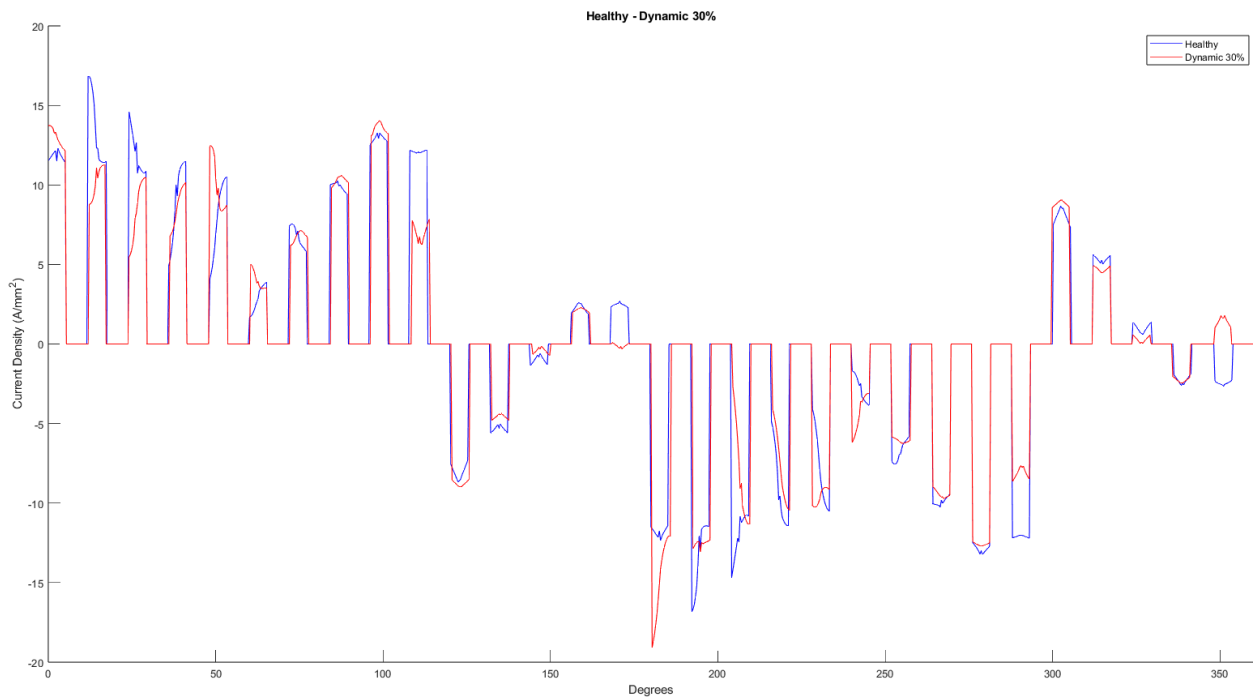
Στα παρακάτω σχήματα 5.2.1.2 α,β,γ φαίνονται οι κατανομές των πυκνοτήτων των ρευμάτων σε 52mm απόσταση από την αρχή των αξόνων, κατά μήκος όλης της γωνίας από 0 έως τις 360 μοίρες, για τις τρεις χειρότερες περιπτώσεις σφαλμάτων(SE 30%, DE 30%, ME 15%) σε σχέση με την υγιή μηχανή.

Παρατηρείται πως και για τις τρεις περιπτώσεις σφαλμάτων υπάρχουν κάποιες συμμετρικές, μεταξύ των δύο πόλων, μπάρες που παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στο πλάτος σε σχέση με την υγιή μηχανή. Στην περίπτωση μας αυτό είναι λογικό, διότι ο τρόπος μέτρησης της πυκνότητας ρεύματος δεν αλλάζει όσο αναφορά τον δρομέα, αφού γίνεται πάνω στο κύκλο ακτίνας 52mm με κέντρο το γεωμετρικό κέντρο του δρομέα, αλλά ο δρομέας βρίσκεται σε διαφορετική θέση σε σχέση με τον στάτη ανάλογα με τα σφάλματα.

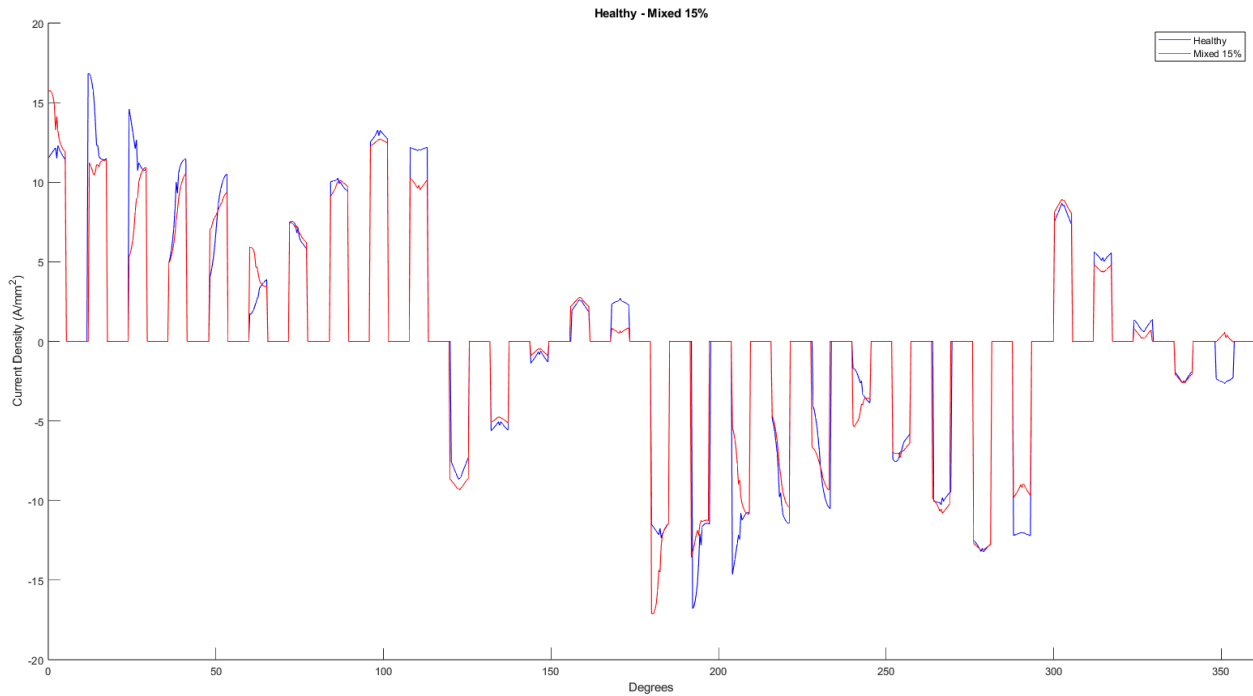
Η μέτρηση αυτή είναι αρκετά σημαντική, καθώς μπορεί να αποτελέσει ένα ενδιαφέρον θέμα μελλοντικής έρευνας σχετικά με το αν τα σφάλματα εκκεντρότητας μπορεί να προκαλέσουν σφάλμα σπασμένης μπάρας.



**Σχήμα 5.2.1.2 (α)** Χωρική κατανομή της πυκνότητας ρεύματος συναρτήσει της γεωμετρικής γωνίας ανάμεσα σε υγιή μηχανή(μπλε) και μηχανή με στατική εκκεντρότητα 30%(κόκκινο)



**Σχήμα 5.2.1.2 (β)** Χωρική κατανομή της πυκνότητας ρεύματος συναρτήσει της γεωμετρικής γωνίας ανάμεσα σε υγιή μηχανή(μπλε) και μηχανή με δυναμική εκκεντρότητα 30%(κόκκινο)



**Σχήμα 5.2.1.2 (γ)** Χωρική κατανομή της πυκνότητας ρεύματος συναρτήσει της γεωμετρικής γωνίας ανάμεσα σε υγιή μηχανή(μπλε) και μηχανή με μικτή εκκεντρότητα 15%(κόκκινο)

Στις παρακάτω ενότητες του κεφαλαίου παρουσιάζονται και αναλύονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις στο πρόγραμμα Ansys τόσο για την υγιή μηχανή όσο και για τις εσφαλμένες. Τονίζεται εδώ πως τα περισσότερα αποτελέσματα που παρουσιάζονται δεν προκύπτουν σαν έξοδος από το Ansys, αλλά δημιουργήθηκαν μετά από επεξεργασία αυτών μέσω γνωστών εξισώσεων της θεωρίας και προγραμμάτων στη MATLAB.

Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό των  $\cos\phi$ , δημιουργήθηκε κώδικας στη MATLAB ο οποίος παίρνει σαν είσοδο τη θεμελιώδη συχνότητα, τα φασικά ρεύματα και τις τάσεις και με την βοήθεια των εξισώσεων 5.2.1.1 και 5.2.1.2, υπολογίζει την ενεργό και άεργο ισχύ για κάθε φάση και έπειτα το πηλίκο τους. Είναι γνωστό από το τρίγωνο ισχύος πως αν στο πηλίκο αυτό εφαρμοστεί τόξο εφαπτομένης( $\tan^{-1}$ ), προκύπτει η γωνία  $\phi$ , και άρα το  $\cos\phi$ .

$$P = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t V(\omega t) \cdot I(\omega t) dt \quad (5.2.1.1)$$

$$Q = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t V(\omega t) \cdot I\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) dt \quad (5.2.1.2)$$

Να τονιστεί πως οι παραπάνω εξισώσεις δεν μπορούν να εφαρμοστούν με ολοκλήρωμα στην περίπτωση μας διότι το Ansys βγάζει διακριτά αποτελέσματα. Οπότε χρησιμοποιείται άθροισμα( $\Sigma$ ) και ακέραια πολλαπλάσια των περιόδων των φασικών ρευμάτων και τάσεων.

### 5.3 Στατική Εκκεντρότητα

Η επαγωγική μηχανή προς εξέταση είναι αυτή του κεφαλαίου 4 η οποία μοντελοποιήθηκε αρχικά υπό υγιείς συνθήκες και έπειτα με στατική εκκεντρότητα 10%, 20% και 30%. Οι τιμές των μεγεθών που φαίνονται στους παρακάτω πίνακες προκύπτουν μετά από κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Ansys.

Υγής Μηχανή													
V <sub>A</sub> (rms)	I <sub>A</sub> (rms)	Cosφ A	V <sub>B</sub> (rms)	I <sub>B</sub> (rms)	Cosφ B	V <sub>C</sub> (rms)	I <sub>C</sub> (rms)	Cosφ C	T <sub>E</sub> (Nm)	n (rpm)	P <sub>E</sub> (W)	P <sub>M</sub> (W)	η (%)
230	37.9659	0.9510	229.98	37.965	0.9510	229.98	37.968	0.95111	74.797	2899.8	24914.9	21998.1	86.65

Στατική Εκκεντρότητα 10%													
V <sub>A</sub> (rms)	I <sub>A</sub> (rms)	Cosφ A	V <sub>B</sub> (rms)	I <sub>B</sub> (rms)	Cosφ B	V <sub>C</sub> (rms)	I <sub>C</sub> (rms)	Cosφ C	T <sub>E</sub> (Nm)	n (rpm)	P <sub>E</sub> (W)	P <sub>M</sub> (W)	η (%)
230	37.6448	0.9505	229.98	37.678	0.9506	229.98	37.624	0.95058	74.157	2900.7	24693.1	22005.1	86.76

Στατική Εκκεντρότητα 20%													
V <sub>A</sub> (rms)	I <sub>A</sub> (rms)	Cosφ A	V <sub>B</sub> (rms)	I <sub>B</sub> (rms)	Cosφ B	V <sub>C</sub> (rms)	I <sub>C</sub> (rms)	Cosφ C	T <sub>E</sub> (Nm)	n (rpm)	P <sub>E</sub> (W)	P <sub>M</sub> (W)	η (%)
230	37.88732	0.9504	229.98	37.822	0.9503	229.98	37.838	0.95025	74.483	2900.1	24817.1	22000.5	86.63

Στατική Εκκεντρότητα 30%													
V <sub>A</sub> (rms)	I <sub>A</sub> (rms)	Cosφ A	V <sub>B</sub> (rms)	I <sub>B</sub> (rms)	Cosφ B	V <sub>C</sub> (rms)	I <sub>C</sub> (rms)	Cosφ C	T <sub>E</sub> (Nm)	n (rpm)	P <sub>E</sub> (W)	P <sub>M</sub> (W)	η (%)
230	38.02308	0.95038	229.986	37.784	0.9498	229.98	37.928	0.94993	74.424	2899.9	24851.4	21998.9	86.51

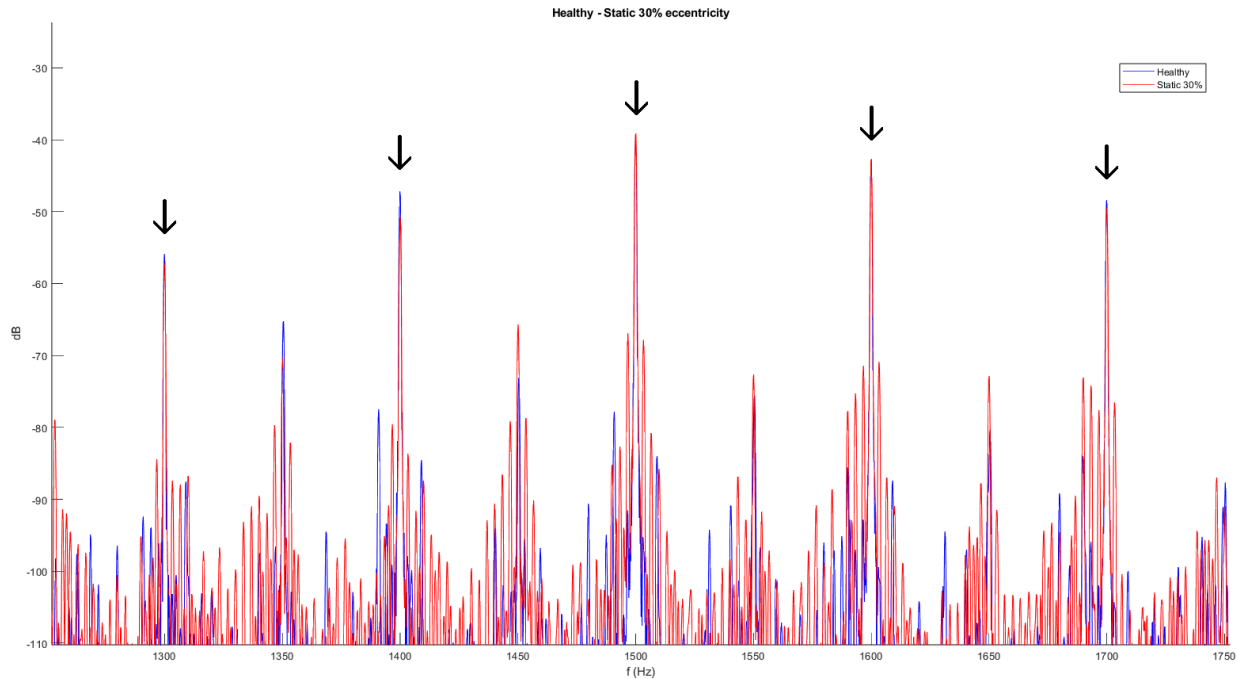
#### 5.3.1 Μέθοδος MCSA

Τα ρεύματα του στάτη τους καταγράφηκαν και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν Fast Fourier Transform (FFT) και Short Time Fourier Transform (STFT) αναλύσεις στα ρεύματα φάσης και γραμμής του στάτη ώστε να προσδιοριστούν οι σημαντικότερες αρμονικές και συχνότητες, ανάλογα με την σοβαρότητα του σφάλματος. Η εξίσωση 5.3.1.1 παρέχει τις αρμονικές της στατικής και δυναμικής εκκεντρότητας, καθώς και τις αρμονικές που σχετίζονται με το δρομέα PSH (Principle Slot Harmonics).

$$f_{ecc} = f_s [(KR + n_d) \left( \frac{1-s}{p} \right) + n_{ws}] \quad (5.3.1.1)$$

Όπου  $f_{ecc}$  είναι η αρμονική συχνότητα της εκκεντρότητας του διακένου αέρα που μελετάται,  $f_s$  είναι η συχνότητα παροχής σε Hz, K είναι ένας ακέραιος, R είναι ο αριθμός των αυλακώσεων του δρομέα, το  $n_d$  είναι μηδέν για στατική εκκεντρότητα και  $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots$  για δυναμική εκκεντρότητα, s: ολίσθηση, p: αριθμός ζευγών πόλων και  $n_{ws} : \pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \dots$  η τάξη αρμονικών τροφοδοσίας του στάτη.

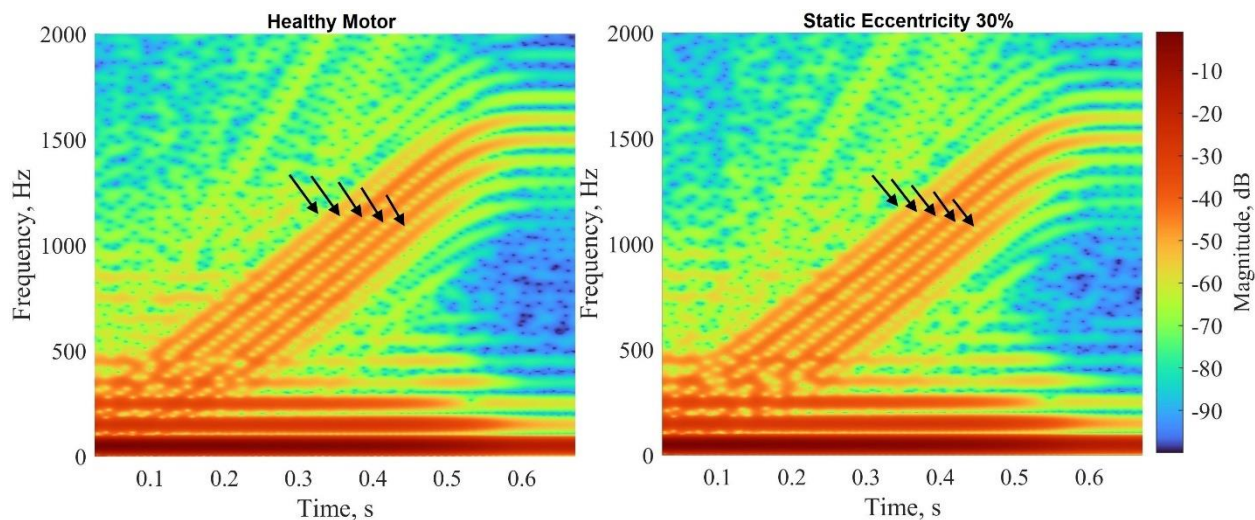
Για τα σφάλματα στατικής εκκεντρότητας, οι συχνότητες ενδιαφέροντος που δίνονται από το παραπάνω τύπο (1) είναι οι ...,1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800,...(Hz). Παρατηρώντας τον FFT του ρεύματος φάσης A της υγιούς μηχανής σε σχέση με την περίπτωση στατικής εκκεντρότητας 30%, γίνεται φανερό πως η διαφορά στο πλάτος αυτών των αρμονικών είναι αμελητέα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 5.3.1.1.



**Σχήμα 5.3.1.1** Φάσμα ρεύματος φάσης A της υγιούς μηχανής σε σχέση με την περίπτωση στατικής εκκεντρότητας 30%.

Αντίστοιχα, παρατηρώντας την STFT ανάλυση του μεταβατικού(transient) ρεύματος φάσης A της υγιούς μηχανής σε σχέση με την περίπτωση στατικής εκκεντρότητας 30%, δεν εμφανίζονται διαφορές, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.3.1.2.





**Σχήμα 5.3.1.2** STFT ανάλυση του μεταβατικού(transient) ρεύματος φάσης Α της υγιούς μηχανής σε σχέση με την περίπτωση στατικής εκκεντρότητας 30%.

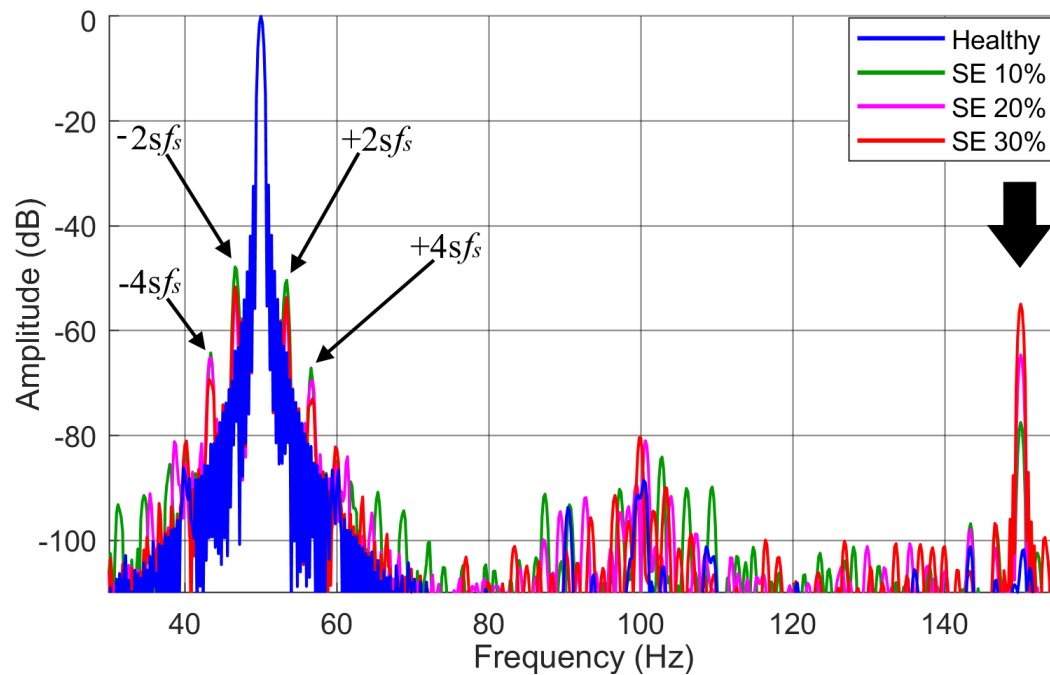
Αναλύοντας τον FFT του ρεύματος γραμμής (φάση Α – φάση Γ) της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας 10%, 20% και 30%, παρατηρούνται διάφορες συχνότητες που επηρεάζονται λόγω των σφαλμάτων, οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 5.3.1.1.

$n_{ws}$	Frequency (Hz)	Healthy (dB)	Static Eccentricity		
			10%(dB)	20%(dB)	30%(dB)
	150	-101.71	-77.5	-64.6	-54.9
	623.5	-115.9	-82.34	-82.88	-82.73
	626.75	-103.1	-77.56	-75.53	-73.48
	823.5	-104.17	-82.43	-82.52	-84.81
	826.75	-117.22	-81.25	-81.47	-82.1
-3	1300	-94.32	-81.45	-77.2	-69.254
3	1600	-96.95	-71.29	-68.33	-62.408
7	1800	-68.45	-60.47	-60.34	-60.29
9	1900	-94.66	-89.22	-82.84	-75.67

**Πίνακας 5.3.1.1** Πλάτη συχνοτήτων του ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας

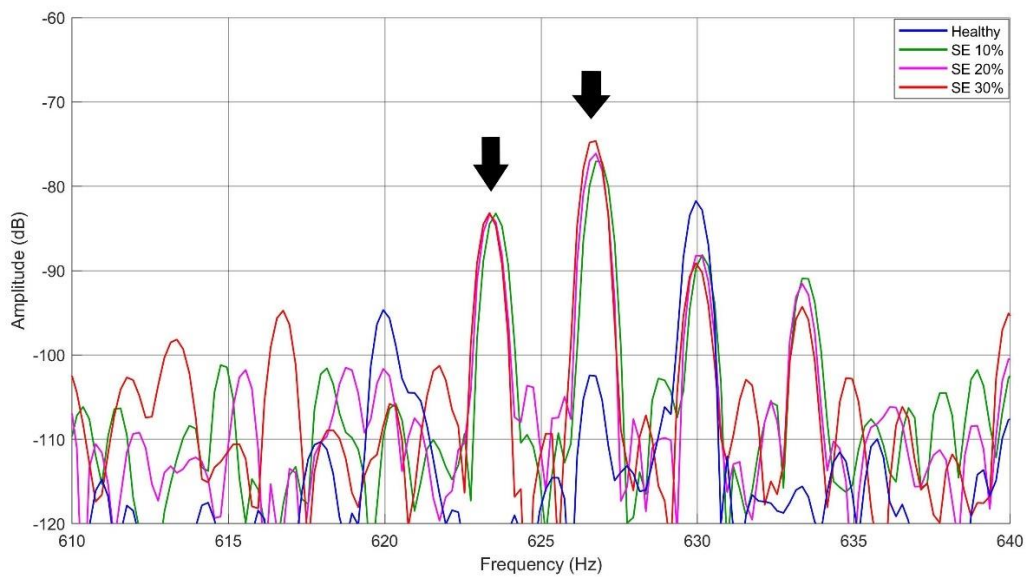


Γύρω από την θεμελιώδη συχνότητα 50 Hz και συγκεκριμένα στα 43.4, 46.6, 53.4 και 56.6 Hz εμφανίζονται πλάτη και για τις τρεις σοβαρότατες σφαλμάτων τα οποία προκύπτουν από τον τύπο  $f_{eccen} = f_s \pm ksf_s$  (για  $k=2, k=4$ ), όμως δεν χειροτερεύουν ανάλογα με αυτές. Αντιθέτως, στην 3<sup>η</sup> αρμονική στα 150 Hz, παρατηρείται αύξηση κατά 24 dB μεταξύ της υγιούς μηχανής και της περίπτωσης με SE 10%, ενώ έπειτα μια γραμμική αύξηση κατά περίπου 10 dB μεταξύ των εσφαλμένων περιπτώσεων. Το φαινόμενο αυτό είναι στενά συνδεδεμένο με τη μη γραμμική B-H μαγνητική χαρακτηριστική του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.3.1.1 και το σχήμα 5.3.1.3.



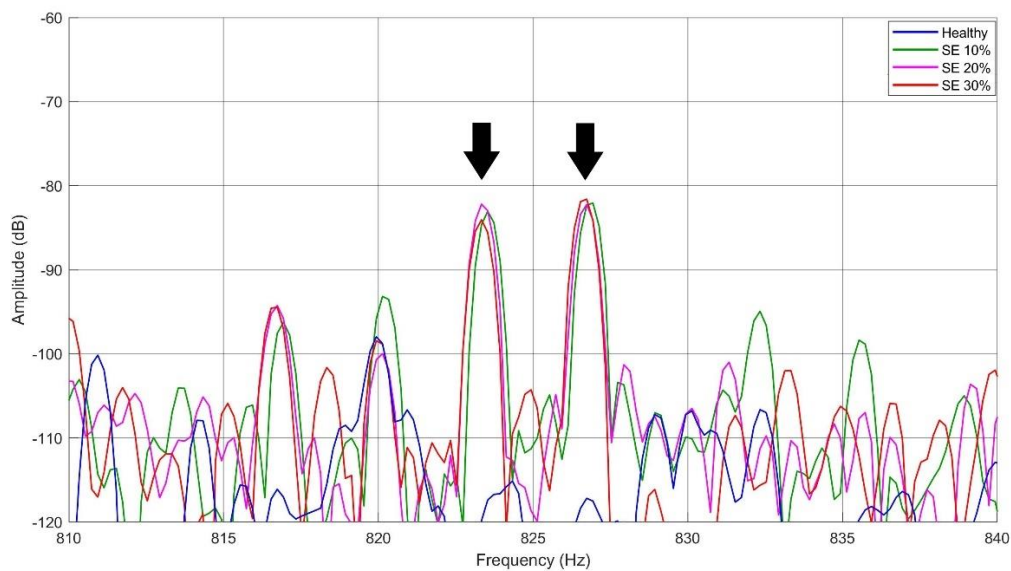
**Σχήμα 5.3.1.3** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας

Στα 623.5 Hz εμφανίζονται πλάτη, που δεν υπήρχαν στο υγιές μοντέλο, ίδιου μεγέθους για όλες τις εσφαλμένες περιπτώσεις, τα οποία ξεπερνούν αυτό του υγιούς μοντέλου κατά 33.5 dB. Στα 626.75 Hz παρατηρούνται πλάτη που δεν υπήρχαν στο υγιές μοντέλο, με μία αύξηση περίπου 26 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με SE 10% ενώ έπειτα υπάρχει μία γραμμική αύξηση κατά περίπου 2 dB μεταξύ των σφαλμάτων, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.3.1.1 και το σχήμα 5.3.1.4.



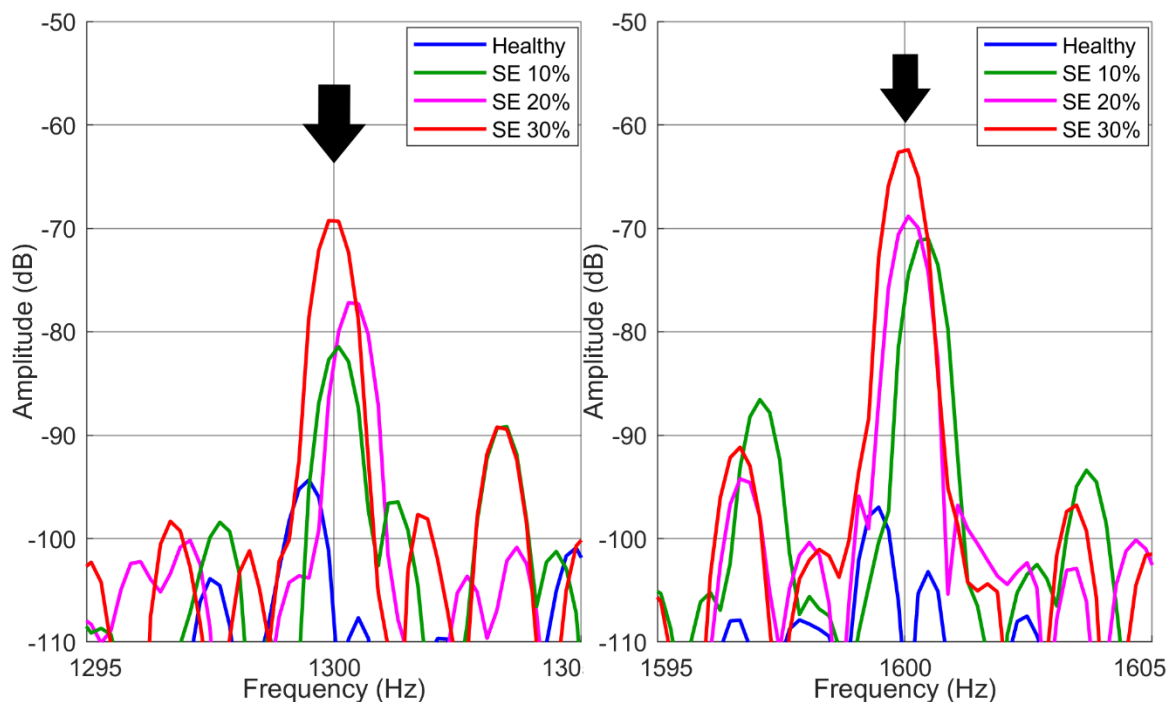
**Σχήμα 5.3.1.4** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας

Στα 823.5 Hz παρατηρούνται πλάτη που δεν υπήρχαν στο υγιές μοντέλο, ίδιου περίπου μεγέθους για όλες τις εσφαλμένες περιπτώσεις, τα οποία ξεπερνούν αυτό του υγιούς μοντέλου κατά 22 dB. Στα 826.75 Hz εμφανίζονται πλάτη, που δεν υπήρχαν στο υγιές μοντέλο, ίδιου περίπου μεγέθους για όλες τις εσφαλμένες περιπτώσεις, τα οποία ξεπερνούν αυτό του υγιούς μοντέλου κατά 36 dB, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.3.1.1 και το σχήμα 5.3.1.5.



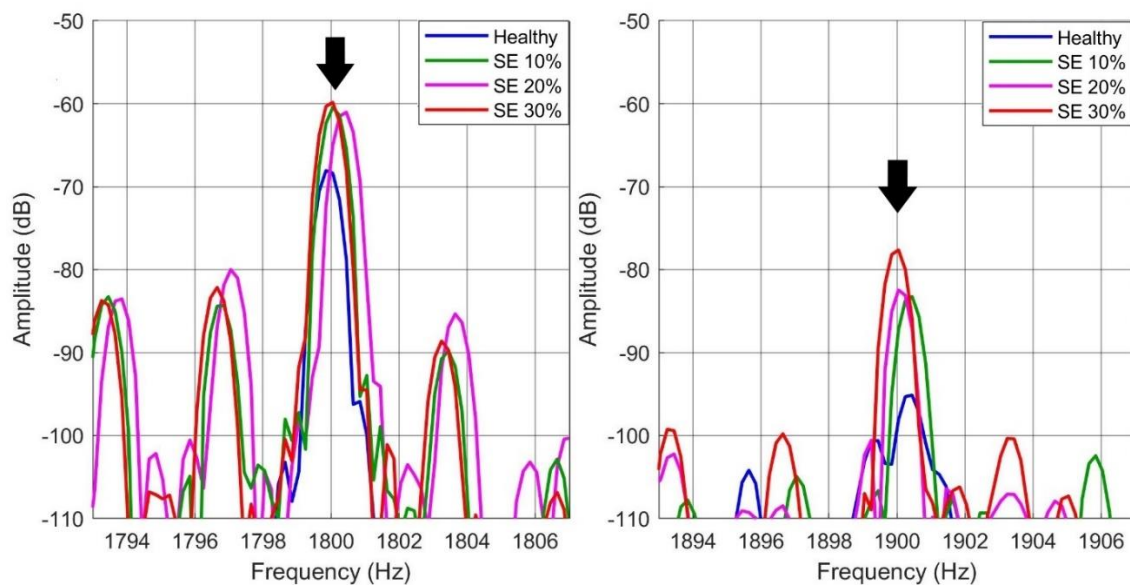
**Σχήμα 5.3.1.5** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας

Στον πίνακα 5.3.1.1, υπάρχουν δύο αρμονικές, που προβλέπονται από την εξίσωση 5.3.1 για  $n_{ws} = -3$  και  $3$ , είναι αρκετά ευαίσθητες στα σφάλματα και είναι η καλύτερη ένδειξη στατικής εκκεντρότητας στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Αυτές οι αρμονικές είναι οι 1300Hz και 1600Hz, στις οποίες παρατηρείται αύξηση των μεγεθών των ανάλογα με την σοβαρότητα των σφαλμάτων. Έχει αποδειχθεί πως υπάρχει πάντα ένα ζευγάρι από RSHs το οποίο δεν εμφανίζεται στην υγιή μηχανή, αλλά εμφανίζεται όταν υπάρχει στατική εκκεντρότητα. Στην περίπτωση διπολικής μηχανής με 30 μάρκες στον δρομέα, το ζευγάρι αρμονικών προκύπτει από τον τύπο [1] με  $n_{ws} = [-3,3]$ . Στη συχνότητα 1300 Hz παρατηρείται μία αύξηση περίπου 13 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με στατική εκκεντρότητα 10%, ενώ έπειτα μία αύξηση περίπου 4 dB από το μοντέλο με στατική εκκεντρότητα 10% στο μοντέλο με στατική εκκεντρότητα 20% και τέλος μία αύξηση περίπου 8 dB από το μοντέλο με στατική εκκεντρότητα 20% στο μοντέλο με στατική εκκεντρότητα 30%. Στη συχνότητα 1600 Hz παρατηρείται μία αύξηση περίπου 25.5 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με στατική εκκεντρότητα 10%, ενώ έπειτα μία αύξηση περίπου 3 dB από το μοντέλο με στατική εκκεντρότητα 10% στο μοντέλο με στατική εκκεντρότητα 20% και τέλος μία αύξηση περίπου 6 dB από το μοντέλο με στατική εκκεντρότητα 20% στο μοντέλο με στατική εκκεντρότητα 30%, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.3.1.1 και το σχήμα 5.3.1.6.



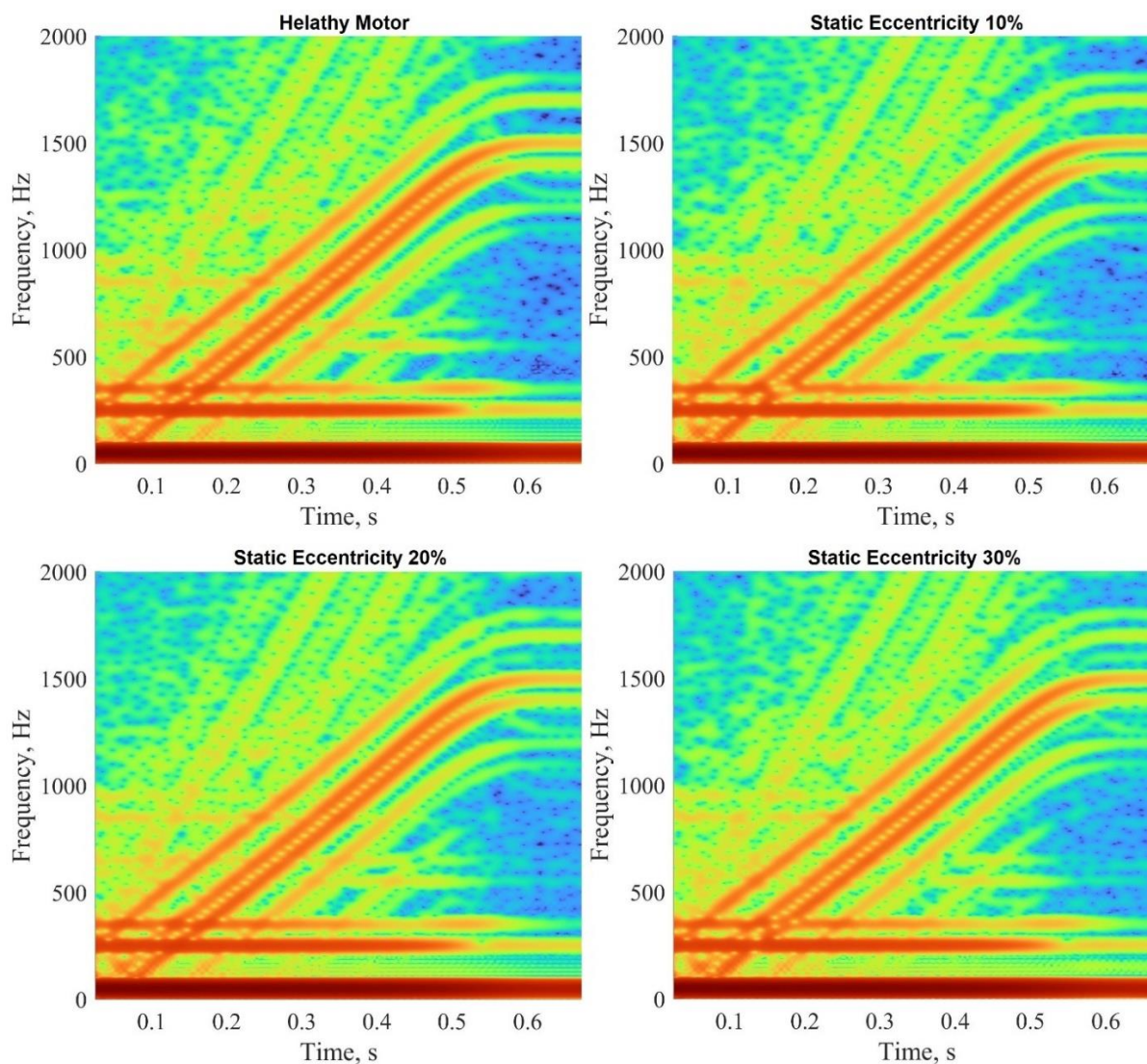
**Σχήμα 5.3.1.6** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας στις συχνότητες 1300Hz και 1600Hz

Στον πίνακα 5.3.1.1, υπάρχει η αρμονική 1800Hz, που προβλέπεται από τον τύπο 1 για  $n_{ws} = 7$ . Τα πλάτη είναι ίδιου μεγέθους για όλες τις εσφαλμένες περιπτώσεις, τα οποία ξεπερνούν αυτό του υγιούς μοντέλου κατά 8 dB. Αυτό σημαίνει πως τα μεγέθη δεν επηρεάζονται με την σοβαρότητα των σφαλμάτων αλλά με την ύπαρξη αυτού. Τέλος, υπάρχει η αρμονική 1900Hz, που προβλέπεται από τον τύπο 1 για  $n_{ws} = 9$ . Παρατηρείται μία αύξηση περίπου 5 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με στατική εκκεντρότητα 10%, ενώ έπειτα υπάρχει μία γραμμική αύξηση κατά περίπου 7 dB μεταξύ των σφαλμάτων, το οποίο σημαίνει πως επηρεάζονται με την σοβαρότητα αυτών, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3.1.7.



**Σχήμα 5.3.1.7** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας στις συχνότητες 1800Hz και 1900Hz

Παρατηρώντας την STFT ανάλυση του transient ρεύματος γραμμής Α-Γ της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας του σχήματος 5.3.1.8, φαίνεται πως τα πλάτη των αρμονικών είναι αρκετά μικρά και δεν είναι εμφανή στις παρακάτω εικόνες. Οι συχνότητες 1300Hz και 1600Hz ξεχωρίζουν στις εσφαλμένες περιπτώσεις όταν η μηχανή φτάσει στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της μετά τα 0.6s.



**Σχήμα 5.3.1.8** STFT ανάλυση του μεταβατικού(transient) ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας.

### 5.3.2 Μέθοδος Stray Flux Analysis

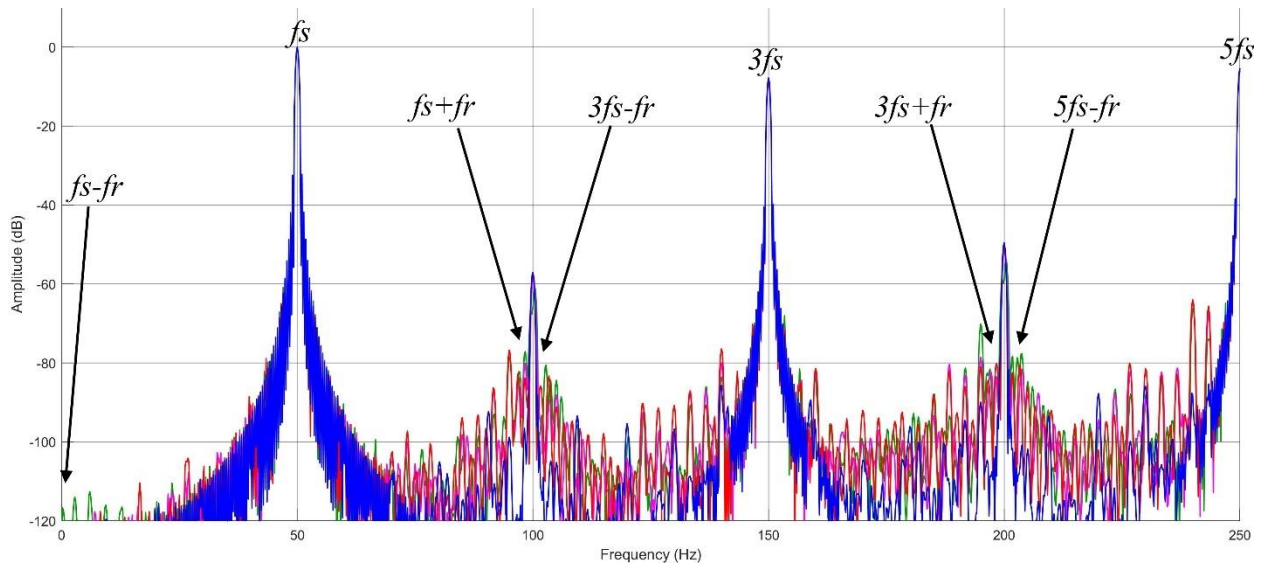
Για την μεθοδολογία αυτή δημιουργήθηκε ένα πηνίο 2000 σπειρών πολύ κοντά στον στάτη εξωτερικά του κινητήρα, το οποίο λειτουργούσε σαν αισθητήρας μαγνητικής ροής. Η επαγόμενη τάση στο πηνίο αποθηκεύεται και εφαρμόζεται σε αυτήν FFT ώστε να προσδιοριστούν οι υπογραφές των σφαλμάτων εφόσον υπάρχουν. Στον πίνακα 5.3.2.1 φαίνονται οι συχνότητες ενδιαφέροντος του υγιή κινητήρα και των κινητήρων με στατική εκκεντρότητα 10%, 20% και 30%.



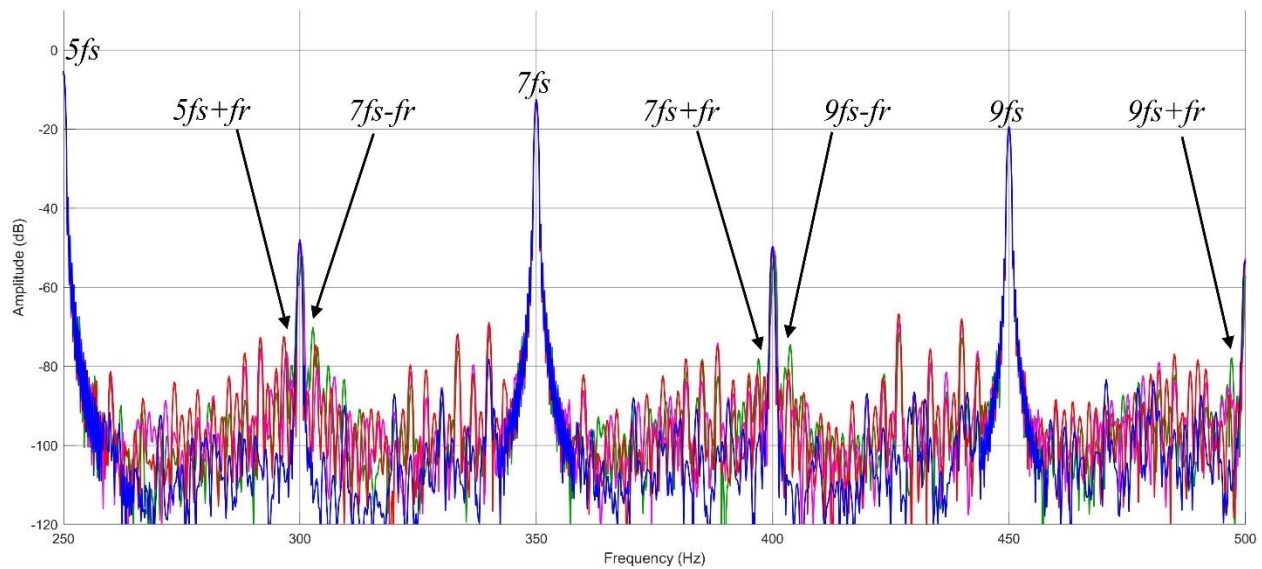
Στη περίπτωση της στατικής εκκεντρότητας γίνεται αμέσως σαφές πως η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να διαγνώσει μόνο στατική εκκεντρότητα. Το καταλαβαίνουμε διότι δεν παρατηρούνται σοβαρές διαφορές μεταξύ της υγιούς μηχανής και των μηχανών με στατική εκκεντρότητα, αλλά ούτε και μεταξύ των σφαλμάτων, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.3.2.1 α, β.

Frequency (Hz)	Healthy (dB)	SE 10% (dB)	SE 20% (dB)	SE 30% (dB)
$f_s - f_r$	-130.3	-127.7	-127.7	-130.9
$f_s + f_r$	-96.47	-77.1	-80.07	-83.88
$3f_s - f_r$	-110.83	-93.26	-95.95	-85.77
$3f_s + f_r$	-93.07	-83.68	-83.93	-80.12
$5f_s - f_r$	-101.64	-78.3	-83.3	-82.4
$5f_s + f_r$	-96.1	-79.76	-83.44	-85.73
$7f_s - f_r$	-100.6	-80.52	-86.24	-87.25
$7f_s + f_r$	-105.35	-82.67	-88.57	-82.73
$9f_s - f_r$	-96.08	-84.46	-88.54	-85.53
$9f_s + f_r$	-100.74	-87.55	-100.52	-88.94

**Πίνακας 5.3.2.1** Πλάτη συχνοτήτων της επαγόμενης τάσης στον αισθητήρα μαγνητικής ροής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας



(α)



(β)

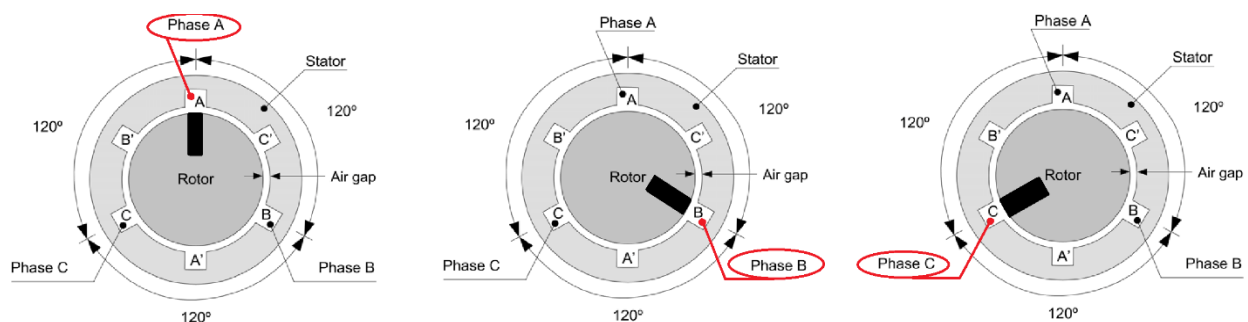
**Σχήμα 5.3.2.1** Φάσμα συχνοτήτων της επαγόμενης τάσης στον αισθητήρα μαγνητικής ροής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας

Ο λόγος για τον οποίο η μέθοδος δεν έχει καλή διαγνωστική ικανότητα στην περίπτωση της στατικής εκκεντρότητας είναι επειδή ο δρομέας περιστρέφεται σταθερά γύρω από ένα σημείο και ας είναι μετατοπισμένος από το γεωμετρικό κέντρο του στάτη. Επειδή λοιπόν η ασυμμετρία στο διάκενο αέρος δεν μεταβάλλεται στο χρόνο, δεν μεταβάλλεται σε μεγάλο βαθμό η μαγνητική ροή, με αποτέλεσμα να μη μεταβάλλεται και σε μεγάλο βαθμό η επαγόμενη τάση στον αισθητήρα.

### 5.3.3 Μέθοδος SFD-MCSA

Για την μεθοδολογία αυτή ακολουθούνται τα εξής βήματα: Ο δρομέας είναι σταθερός σε μια τυχαία θέση. Τροφοδοτούνται οι τρεις φάσεις του στάτη και αποθηκεύεται η κυματομορφή του ρεύματος της πρώτης φάσης, έστω της Α. Στη συνέχεια, ο δρομέας του κινητήρα περιστρέφεται κατά 120 μοίρες. Σε αυτή τη νέα θέση του δρομέα, αποθηκεύεται η κυματομορφή του ρεύματος της δεύτερης φάσης, έστω της Β. Τέλος, ο δρομέας περιστρέφεται προς την ίδια κατεύθυνση κατά επιπλέον 120 μοίρες και αποθηκεύεται η κυματομορφή του ρεύματος της τρίτης φάσης, έστω της C. Οι στιγμιαίες τιμές των τριών αυτών φασικών ρευμάτων Α, Β και C προστίθενται, και ως αποτέλεσμα προκύπτει ένα "τεχνητό" ρεύμα μηδενικής ακολουθίας απαλλαγμένο από τη γεωμετρία του δρομέα.

Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας που περιγράφεται δημιουργήθηκε το σχήμα 5.3.3.1. Αρχικά, θέτεται μια μπάρα ως μπάρα αναφοράς, η οποία σημειώνεται με μαύρο χρώμα. Υποθέτουμε ότι στην πρώτη μέτρηση, η μπάρα αναφοράς βρίσκεται απέναντι από τη φάση Α. Για τη δεύτερη μέτρηση, στρέφεται ο δρομέας δεξιά κατά 120 μοίρες. Παρατηρείται ότι η μπάρα αναφοράς βρίσκεται τώρα απέναντι από τη φάση Β. Τέλος, στην τρίτη μέτρηση ο δρομέας περιστρέφεται άλλες 120 μοίρες δεξιά και η μπάρα αναφοράς βρίσκεται τώρα απέναντι από τη φάση C. Σε καθένα από τα στιγμιότυπα αυτά, η κάθε φάση διαδοχικά "βλέπει" την ίδια γεωμετρία του δρομέα. Έτσι η μέθοδος που περιεγράφηκε, είναι ανεξάρτητη από τη γεωμετρία του δρομέα και τη σχετική θέση στάτη-δρομέα.



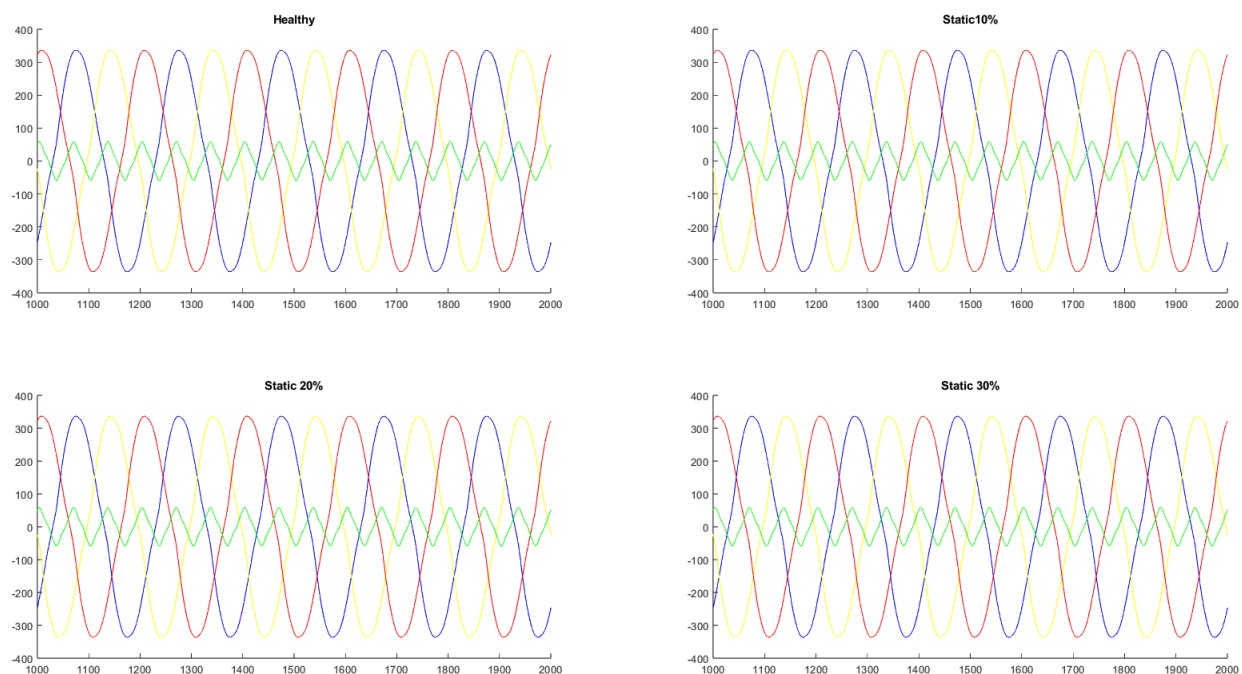
**Σχήμα 5.3.3.1** Διαδοχικά, τα βήματα της μεθόδου που ακολουθήθηκε. Με μαύρο χρώμα φαίνεται η μπάρα αναφοράς, ενώ με κόκκινο έχει κυκλωθεί η φάση της οποίας το ρεύμα αποθηκεύεται σε κάθε περιστροφή του δρομέα.



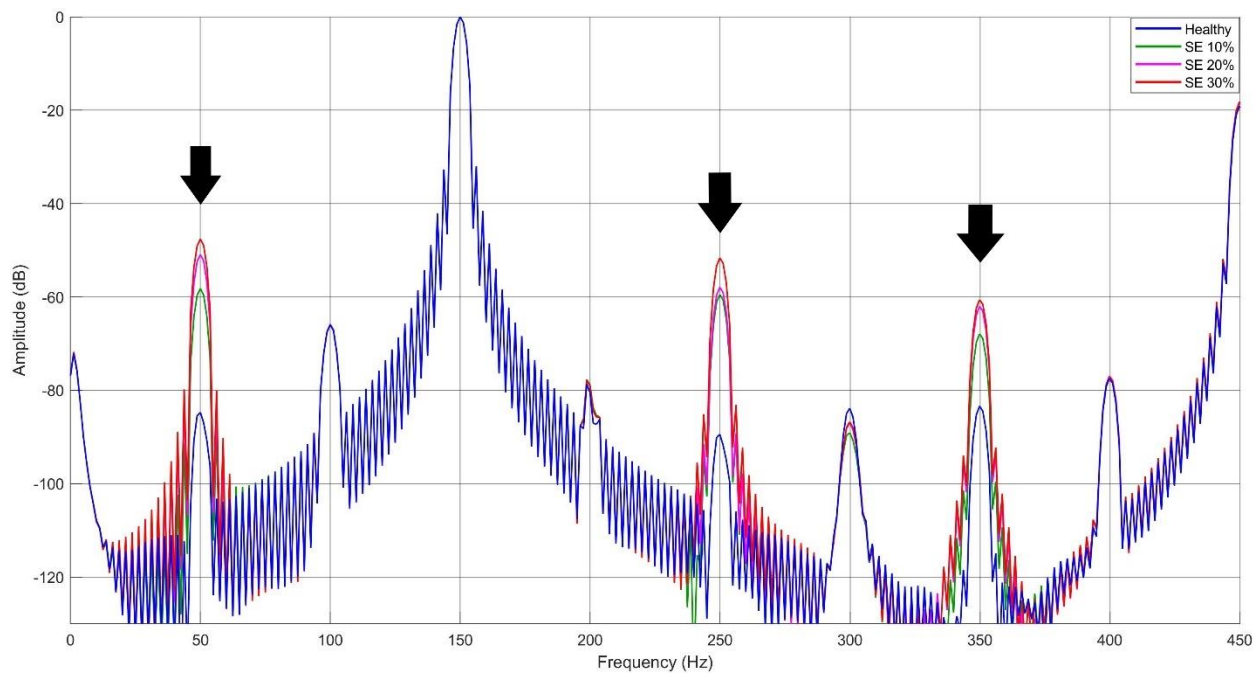
Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε και υλοποιήθηκε με προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων. Οι παράμετροι της προσομοίωσης μένουν ως είχαν, δηλαδή:

- Ο δρομέας του κινητήρα είναι ακίνητος.
- Οι τρεις φάσεις του στάτη είναι συνδεδεμένες σε τρίγωνο.
- Οι τρεις τάσεις τροφοδοσίας είναι συμμετρικές, ημιτονοειδείς και 230V.

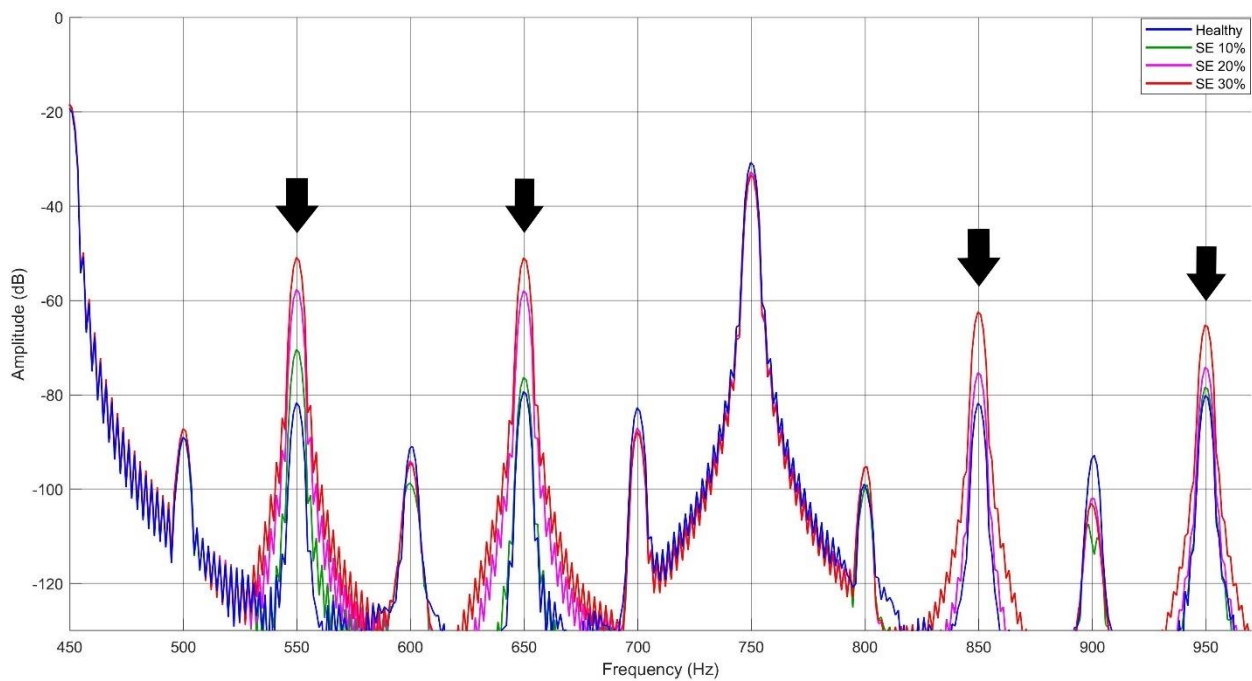
Πραγματοποιήθηκαν 12 προσομοιώσεις. Δηλαδή 3 θέσεις του δρομέα για κάθε μια από τις 4 περιπτώσεις μηχανών (Υγιής, SE 10%, SE 20%, SE 30%). Οι στιγμιαίες τιμές των τριών φασικών ρευμάτων που αποθηκεύτηκαν προστίθενται, και το φάσμα του αθροίσματος μελετάται μετά την εφαρμογή του FFT. Στο σχήμα 5.3.3.2 φαίνονται τα τρία φασικά ρεύματα με το άθροισμά τους για κάθε περίπτωση κινητήρα, ενώ στο σχήμα 5.3.3.3.(α,β) φαίνονται συγκριτικά τα φάσματα συχνοτήτων των "τεχνητών" ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας των τεσσάρων περιπτώσεων κινητήρα.



**Σχήμα 5.3.3.2** Τα τρία φασικά ρεύματα με το άθροισμά τους για κάθε περίπτωση κινητήρα.



**Σχήμα 5.3.3.3 (α)** Συγκριτικά τα φάσματα συχνοτήτων των "τεχνητών" ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας των τεσσάρων περιπτώσεων κινητήρα, για περιοχή συχνοτήτων 0Hz – 450Hz



**Σχήμα 5.3.3.3 (β)** Συγκριτικά τα φάσματα συχνοτήτων των "τεχνητών" ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας των τεσσάρων περιπτώσεων κινητήρα, για περιοχή συχνοτήτων 450Hz – 1000Hz

Στον παρακάτω πίνακα 5.3.3.1, φαίνονται τα πλάτη των αρμονικών του "τεχνητού" ρεύματος για τις 3 περιπτώσεις σφαλμάτων σε σχέση με την υγιή μηχανή. Καταρχήν είναι σαφές ότι η βασική αρμονική του "τεχνητού" ρεύματος μηδενικής ακολουθίας είναι η τρίτη αρμονική αφού με την πρόσθεση των ρευμάτων φάσης, το "τεχνητό" ρεύμα που προκύπτει έχει συχνότητα 150Hz.

Frequency (Hz)	Healthy (dB)	Static Eccentricity		
		10%(dB)	20%(dB)	30%(dB)
50	-84.7	-58.19	-50.92	-47.6
250	-89.46	-59.46	-57.91	-51.63
350	-83.4	-67.9	-62.04	-60.579
550	-81.67	-70.32	-57.61	-50.82
650	-79.26	-76.21	-57.88	-50.91
850	-81.8	-75.37	-75.37	-62.44
950	-80.24	-78.42	-74.22	-65.24

**Πίνακας 5.3.3.1** Πλάτη συχνοτήτων του "τεχνητού" ρεύματος μηδενικής ακολουθίας της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας

Οι αρμονικές που επηρεάζονται λόγω των σφαλμάτων είναι οι 50Hz, 250Hz, 350Hz, 550Hz, 650Hz, 850Hz και 950Hz. Ο λόγος είναι, επειδή ο δρομέας βρίσκεται σε μόνιμη μετατόπιση από το κέντρο συμμετρίας του στάτη, κάθε φάση φορτίζεται με διαφορετικό ρεύμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το άθροισμα των φασικών ρευμάτων να περιλαμβάνει και τις αρμονικές συχνότητες οι οποίες εξαρτώνται από τη μαγνητεγερτική δύναμη του στάτη, όπως η βασική, η πέμπτη, η έβδομη κλπ.

Σημαντική αύξηση παρατηρείται στην αρμονική 50Hz όταν υπάρχει σφάλμα. Πιο συγκεκριμένα, η αρμονική αυτή αυξάνεται κατά 26dB, 34dB και 37dB για τις περιπτώσεις των κινητήρων με 10%, 20% και 30% στατική εκκεντρότητα αντίστοιχα, σε σχέση με τον υγιή κινητήρα. Επίσης σημαντική αύξηση παρατηρείται στην αρμονική 250Hz η οποία αυξάνεται κατά 30dB, 32dB και 38dB για τις περιπτώσεις των κινητήρων με 10%, 20% και 30% στατική εκκεντρότητα αντίστοιχα, σε σχέση με τον υγιή κινητήρα. Γενικά όμως, οι αρμονικές που φαίνονται στα παραπάνω σχήματα αυξάνονται σημαντικά στους εσφαλμένους κινητήρες, σε σχέση με τον υγιή.

## 5.4 Δυναμική Εκκεντρότητα

Οι επαγωγικές μηχανές προς εξέταση μοντελοποιήθηκαν με σφάλματα δυναμικής εκκεντρότητας 10%, 20% και 30% και συγκρίθηκαν με την υγιή. Οι τιμές των μεγεθών που φαίνονται στους παρακάτω πίνακες προκύπτουν μετά από κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Ansys.

Υγιής Μηχανή													
V <sub>A</sub> (rms)	I <sub>A</sub> (rms)	Cosφ A	V <sub>B</sub> (rms)	I <sub>B</sub> (rms)	Cosφ B	V <sub>C</sub> (rms)	I <sub>C</sub> (rms)	Cosφ C	T <sub>E</sub> (Nm)	n (rpm)	P <sub>E</sub> (W)	P <sub>M</sub> (W)	η (%)
230	37.9659	0.9510	229.98	37.965	0.9510	229.98	37.968	0.95111	74.797	2899.8	24914.9	21998.1	86.65

Δυναμική Εκκεντρότητα 10%													
V <sub>A</sub> (rms)	I <sub>A</sub> (rms)	Cosφ A	V <sub>B</sub> (rms)	I <sub>B</sub> (rms)	Cosφ B	V <sub>C</sub> (rms)	I <sub>C</sub> (rms)	Cosφ C	T <sub>E</sub> (Nm)	n (rpm)	P <sub>E</sub> (W)	P <sub>M</sub> (W)	η (%)
230	37.42244	0.95081	229.986	37.400	0.9506	229.98	37.447	0.95095	73.765	2901.4	24544.9	22010.2	86.89

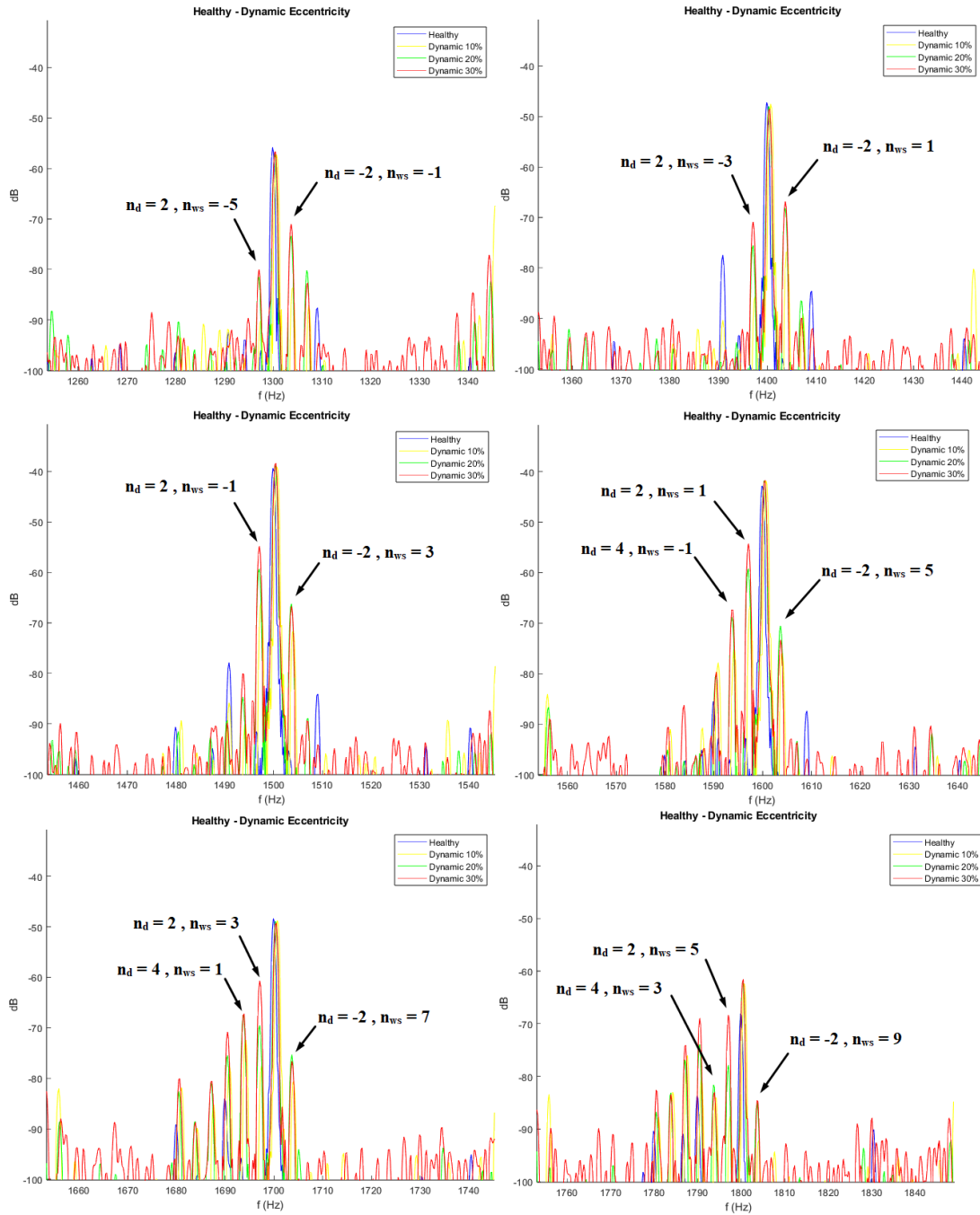
Δυναμική Εκκεντρότητα 20%													
V <sub>A</sub> (rms)	I <sub>A</sub> (rms)	Cosφ A	V <sub>B</sub> (rms)	I <sub>B</sub> (rms)	Cosφ B	V <sub>C</sub> (rms)	I <sub>C</sub> (rms)	Cosφ C	T <sub>E</sub> (Nm)	n (rpm)	P <sub>E</sub> (W)	P <sub>M</sub> (W)	η (%)
230	37.69789	0.95050	229.986	37.651	0.9503	229.98	37.707	0.95055	74.202	2900.6	24713.8	22004.4	86.73

Δυναμική Εκκεντρότητα 30%													
V <sub>A</sub> (rms)	I <sub>A</sub> (rms)	Cosφ A	V <sub>B</sub> (rms)	I <sub>B</sub> (rms)	Cosφ B	V <sub>C</sub> (rms)	I <sub>C</sub> (rms)	Cosφ C	T <sub>E</sub> (Nm)	n (rpm)	P <sub>E</sub> (W)	P <sub>M</sub> (W)	η (%)
230	37.66594	0.95050	229.986	37.586	0.9501	229.98	37.704	0.95058	74.085	2900.7	24690.8	22004.1	86.66

### 5.4.1 Μέθοδος MCSA

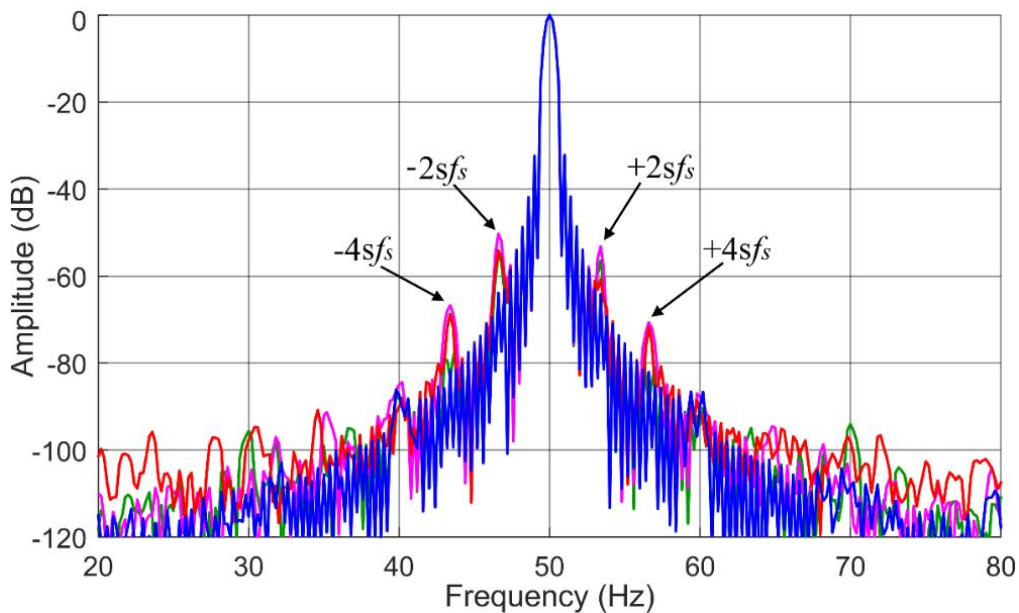
Για τον προσδιορισμό των συχνοτήτων ενδιαφέροντος για την περίπτωση των σφαλμάτων δυναμικής εκκεντρότητας, έγινε σύγκριση των συχνοτήτων που δίνονται από την εξίσωση 5.3.1.1, με τα γραφήματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.

Παρατηρώντας τον FFT του ρεύματος φάσης Α της υγιούς μηχανής σε σχέση με την περίπτωση δυναμικής εκκεντρότητας, γίνεται φανερό πως οι συχνότητες που προκύπτουν από την εξίσωση 5.3.1.1 με  $n_d = [-2, 2, 4]$ , υπάρχουν στο φάσμα του ρεύματος φάσης Α.



**Σχήμα 5.4.1.1** Φάσμα ρεύματος φάσης Α της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας

Γύρω από την θεμελιώδη συχνότητα 50 Hz και συγκεκριμένα στα 43.4, 46.6, 53.4 και 56.6 Hz εμφανίζονται πλάτη και για τις τρεις σοβαρότατες σφαλμάτων τα οποία προκύπτουν από τον τύπο  $f_{eccen} = f_s \pm k f_s$  (για  $k=2, k=4$ ), όμως δεν χειροτερεύουν ανάλογα με αυτές, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4.1.2.



**Σχήμα 5.4.1.2** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας

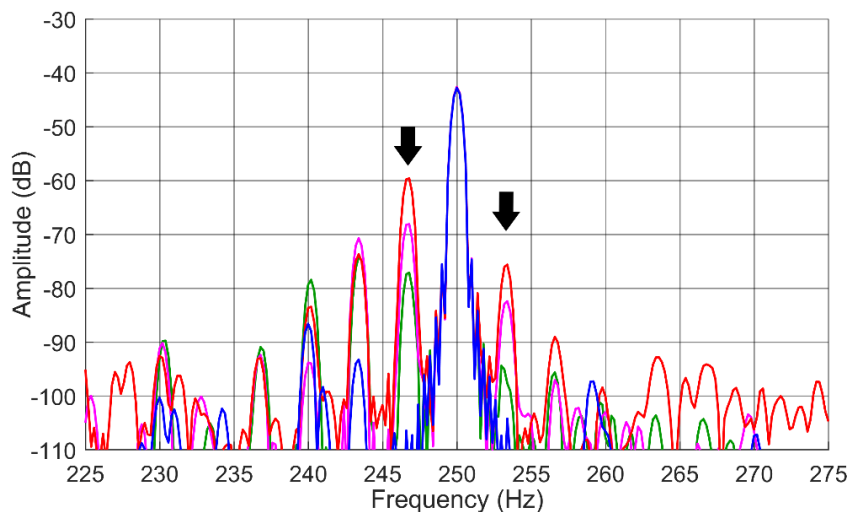
Στα ρεύματα γραμμής στις περιπτώσεις της δυναμικής εκκεντρότητας, οι συχνότητες στα 1300Hz και 1600Hz δεν εμφανίζονται, σε αντίθεση με τις περιπτώσεις του ρεύματος φάσης καθώς και των περιπτώσεων στατικής εκκεντρότητας. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται για τις συχνότητες γύρω στα 1300Hz και 1600Hz. Υπάρχουν όμως οι συχνότητες γύρω από τα 1400, 1500, 1700 και 1800 Hz στις εσφαλμένες περιπτώσεις. Ο λόγος για τον οποίο οι συχνότητες γύρω από τα 1300Hz και 1600Hz δεν υπάρχουν, μπορεί να οφείλεται στο ότι αυτά είναι ομοπολικά στο ρεύμα φάσης και ακυρώνονται κατά τον υπολογισμό του ρεύματος γραμμής.

Αναλύοντας τον FFT του ρεύματος γραμμής (φάση Α – φάση Γ) της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας 10%, 20% και 30%, παρατηρούνται διάφορες συχνότητες που προκύπτουν από την εξίσωση 5.3.1.1 και επηρεάζονται λόγω των σφαλμάτων, και φαίνονται στον Πίνακα 5.4.1.1.

n <sub>d</sub>	n <sub>ws</sub>	Frequency (Hz)	Healthy Motor (dB)	Dynamic Eccentricity		
				10%(dB)	20%(dB)	30%(dB)
		246.78	-106.4	-77.09	-68.09	-59.6
		253.38	-104.2	-89.51	-82.4	-75.62
2	-3	1397	-100.21	-83.8	-74.94	-70.04
-2	1	1404	-97.7	-76.74	-67.95	-66.62
2	-1	1497	-90.72	-66.5	-59.3	-54.93
-2	3	1504	-94.26	-71.8	-66.37	-66.9
4	1	1694	-96.13	-72.18	-67.4	-67.4
2	3	1697	-101.47	-77.41	-69.39	-60.52
-2	7	1704	-101.42	-79.33	-75.63	-77.81
4	3	1794	-110.9	-84.1	-82.27	-81.9
2	5	1797	-119	-87.82	-78.27	-68.36
-2	9	1804	-112.63	-93.22	-84.85	-82.82

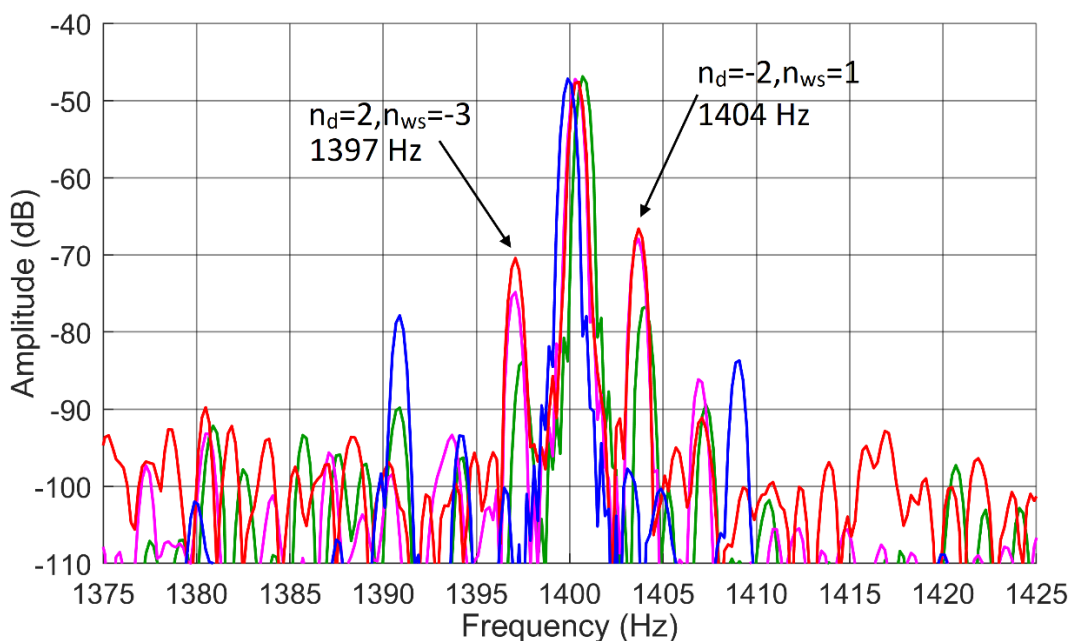
**Πίνακας 5.4.1.1** Πλάτη συχνοτήτων του ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας

Πριν την 5<sup>η</sup> αρμονική, στα 246.78 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 29 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με δυναμική εκκεντρότητα 10% ενώ έπειτα υπάρχει μία γραμμική αύξηση κατά περίπου 10 dB μεταξύ των σφαλμάτων. Μετά την 5<sup>η</sup> αρμονική, στα 253.38 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 10 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με δυναμική εκκεντρότητα 10% ενώ έπειτα υπάρχει μία γραμμική αύξηση κατά περίπου 7 dB μεταξύ των σφαλμάτων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 5.4.1.3.



**Σχήμα 5.4.1.3** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας

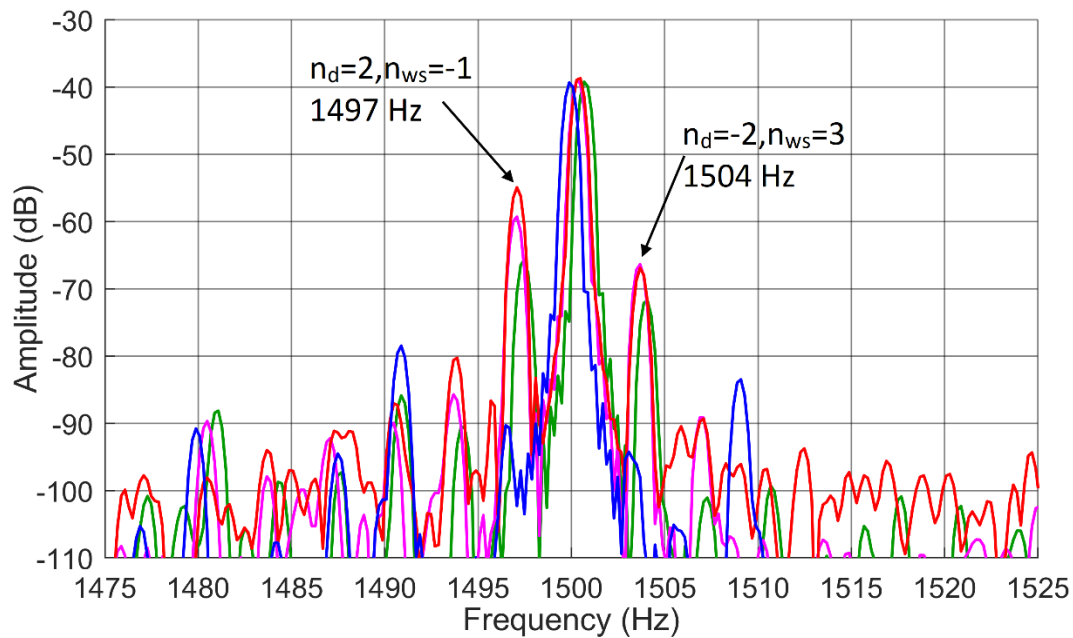
Από την εξίσωση 5.3.1.1 για  $n_d = 2$  και  $n_{ws} = -3$  προκύπτει η συχνότητα ενδιαφέροντος 1397 Hz ενώ για  $n_d = -2$  και  $n_{ws} = 1$  προκύπτει η 1404 Hz. Στον πίνακα 5.3.1.1 φαίνεται πως στη συχνότητα 1397 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 16 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με δυναμική εκκεντρότητα 10% ενώ έπειτα υπάρχει μία αύξηση κατά περίπου 9 dB μεταξύ των σφαλμάτων με DE 10% και DE 20%, και αύξηση κατά περίπου 5 dB μεταξύ των σφαλμάτων με DE 20% και DE 30%. Στη συχνότητα 1404 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 20 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με DE 10%, ενώ έπειτα υπάρχει μία αύξηση κατά περίπου 9 dB μεταξύ των σφαλμάτων με DE 10% και DE 20%, και αύξηση κατά περίπου 1 dB μεταξύ των σφαλμάτων με DE 20% και DE 30%. Οι συχνότητες αυτές βρίσκονται δίπλα στην αρμονική 1400 Hz και φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 5.4.1.4.



**Σχήμα 5.4.1.4** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας

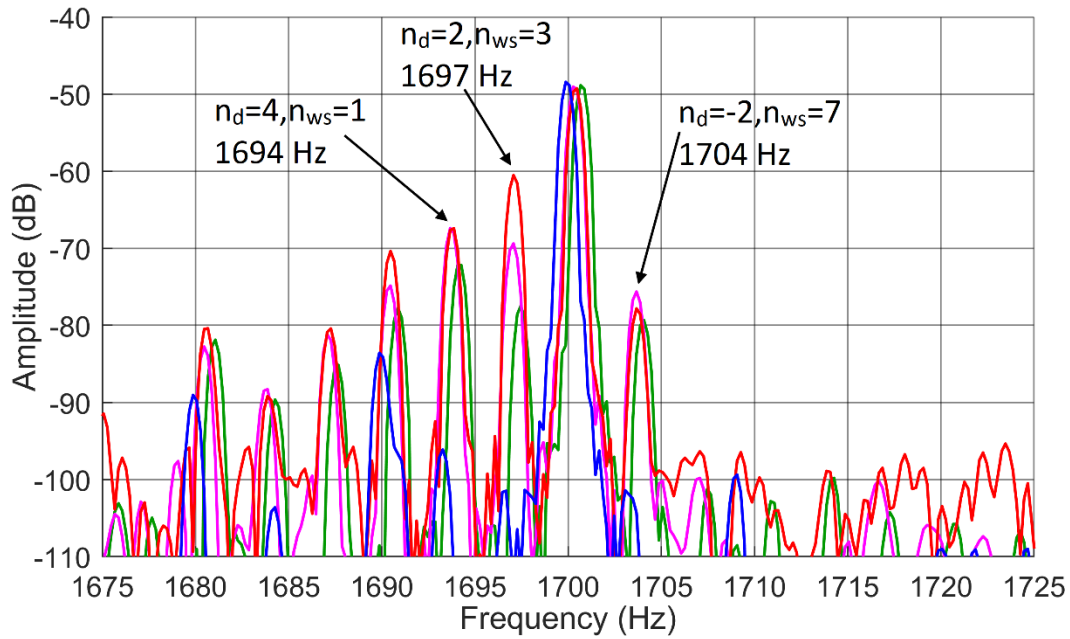
Από την εξίσωση 5.3.1.1 για  $n_d = 2$  και  $n_{ws} = -1$  προκύπτει η συχνότητα ενδιαφέροντος 1497 Hz ενώ για  $n_d = -2$  και  $n_{ws} = 3$  προκύπτει η 1504 Hz. Στον πίνακα 5.3.1.1 φαίνεται πως στη συχνότητα 1497 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 24 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με δυναμική εκκεντρότητα 10% ενώ έπειτα υπάρχει μία αύξηση κατά περίπου 7 dB μεταξύ των σφαλμάτων με DE 10% και DE 20%, και αύξηση κατά περίπου 4 dB μεταξύ των σφαλμάτων με DE 20% και DE 30%. Στη συχνότητα 1504 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 23 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με DE 10%, ενώ έπειτα υπάρχει μία αύξηση κατά περίπου 5 dB μεταξύ των σφαλμάτων με DE 10% και DE 20%, και περίπου ίδια μεγέθη για τις περιπτώσεις με DE 20% και DE 30%. Οι συχνότητες αυτές βρίσκονται δίπλα στην αρμονική 1500 Hz και φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 5.4.1.5.





**Σχήμα 5.4.1.5** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας

Από την εξίσωση 5.3.1.1 για  $n_d = 4$  και  $n_{ws} = 1$  προκύπτει η συχνότητα ενδιαφέροντος 1694 Hz, για  $n_d = 2$  και  $n_{ws} = 3$  προκύπτει η 1697 Hz, ενώ για  $n_d = -2$  και  $n_{ws} = 7$  προκύπτει η 1704 Hz. Στον πίνακα 5.3.1.1 φαίνεται πως στη συχνότητα 1694 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 24 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με δυναμική εκκεντρότητα 10% ενώ έπειτα υπάρχει μία αύξηση κατά περίπου 5 dB μεταξύ των σφαλμάτων με DE 10% και DE 20%, και περίπου ίδια μεγέθη για τις περιπτώσεις με DE 20% και DE 30%. Στη συχνότητα 1697 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 24 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με δυναμική εκκεντρότητα 10% ενώ έπειτα υπάρχει μία γραμμική αύξηση κατά περίπου 9 dB μεταξύ των σφαλμάτων. Στη συχνότητα 1704 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 22 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με δυναμική εκκεντρότητα 10%, και περίπου ίδια μεγέθη για τις περιπτώσεις με DE 10%, DE 20% και DE 30%, το οποίο δείχνει πως τα μεγέθη για την συχνότητα αυτή επηρεάζονται σημαντικά λόγω των σφαλμάτων, αλλά όχι απαραίτητα από τη σοβαρότητα αυτών. Οι συχνότητες αυτές βρίσκονται δίπλα στην αρμονική 1700 Hz και φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 5.4.1.6.



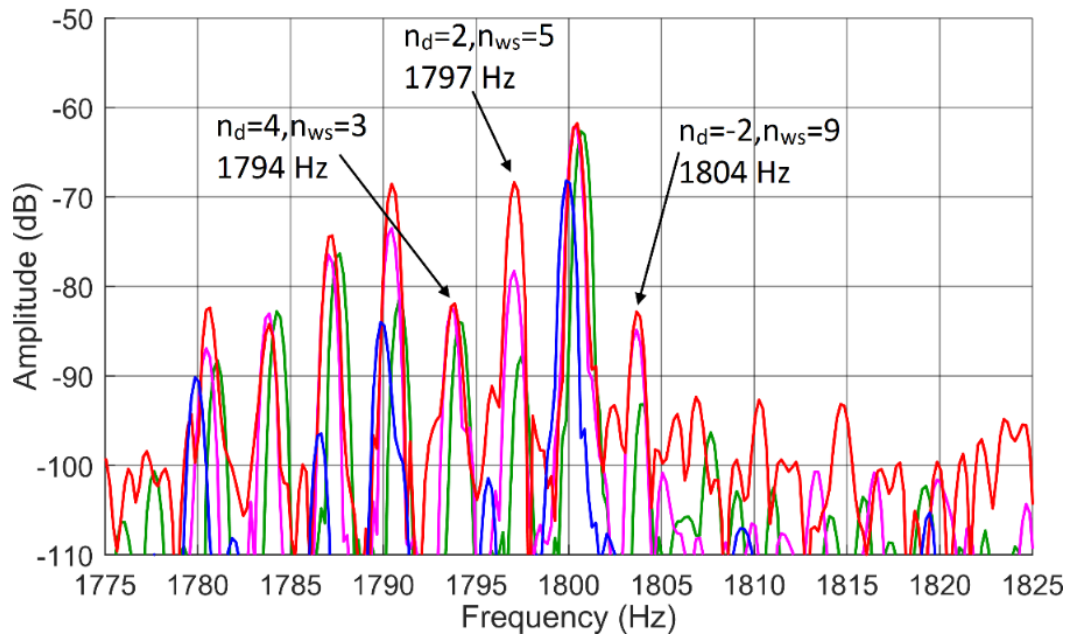
**Σχήμα 5.4.1.6** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας

Από την εξίσωση 5.3.1.1 για  $n_d = 4$  και  $n_{ws} = 3$  προκύπτει η συχνότητα ενδιαφέροντος 1794 Hz, για  $n_d = 2$  και  $n_{ws} = 5$  προκύπτει η 1797 Hz, ενώ για  $n_d = -2$  και  $n_{ws} = 9$  προκύπτει η 1804 Hz.

Στον πίνακα 5.3.1.1 φαίνεται πως στη συχνότητα 1794 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 27 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με δυναμική εκκεντρότητα 10%, και περίπου ίδια μεγέθη για τις περιπτώσεις με DE 10%, DE 20% και DE 30%, το οποίο δείχνει πως τα πλάτη για την συχνότητα αυτή επηρεάζονται σημαντικά λόγω των σφαλμάτων, αλλά όχι απαραίτητα από τη σοβαρότητα αυτών.

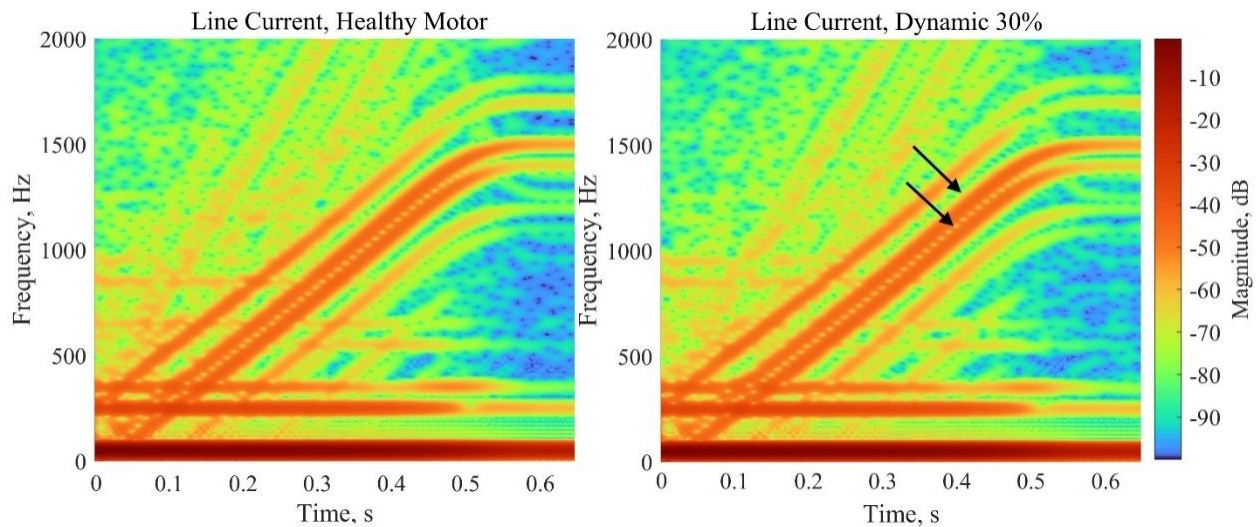
Στη συχνότητα 1797 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 31 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με δυναμική εκκεντρότητα 10% ενώ έπειτα υπάρχει μία γραμμική αύξηση κατά περίπου 10 dB μεταξύ των σφαλμάτων, το οποίο δείχνει πως τα μεγέθη για την συχνότητα αυτή επηρεάζονται σημαντικά λόγω των σφαλμάτων και τη σοβαρότητα αυτών.

Στη συχνότητα 1804 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 19 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με δυναμική εκκεντρότητα 10%, ενώ έπειτα υπάρχει μία αύξηση κατά περίπου 8 dB μεταξύ των σφαλμάτων με DE 10% και DE 20%, και αύξηση κατά περίπου 2 dB μεταξύ των σφαλμάτων με DE 20% και DE 30%. Οι συχνότητες αυτές βρίσκονται δίπλα στην αρμονική 1800 Hz και φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 5.4.1.7.



**Σχήμα 5.4.1.7** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας

Όσον αφορά την STFT ανάλυση του μεταβατικού (transient) ρεύματος φάσης Α καθώς και του ρεύματος γραμμής Α-Γ, οι αρμονικές δυναμικής εκκεντρότητας δεν μπορούν να διακριθούν, καθώς φαίνεται να έχουν χαμηλό πλάτος κατά τη διάρκεια αυτή. Επιπλέον, ακόμη και αν είχαν υψηλότερα πλάτη, θα ήταν πολύ δύσκολο να εντοπιστούν καθώς οι τροχιές τους είναι πολύ κοντά σε αυτές των PSH (3-4Hz διαφορά).



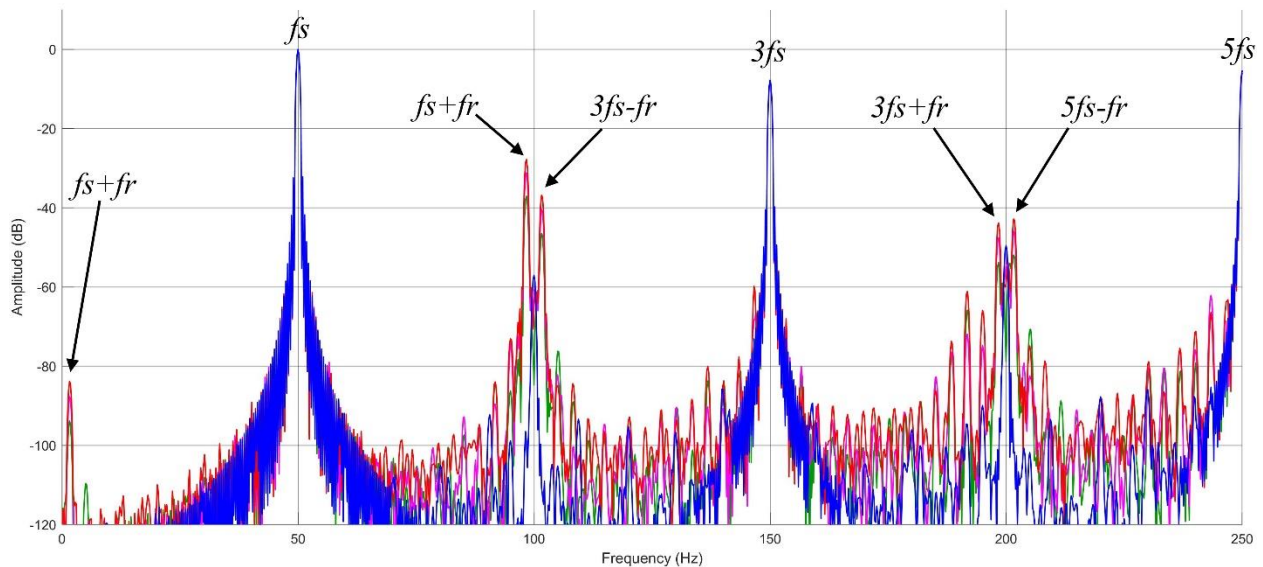
**Σχήμα 5.4.1.8** STFT ανάλυση του μεταβατικού (transient) ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με την περίπτωση δυναμικής εκκεντρότητας 30%.

## 5.4.2 Μέθοδος Stray Flux Analysis

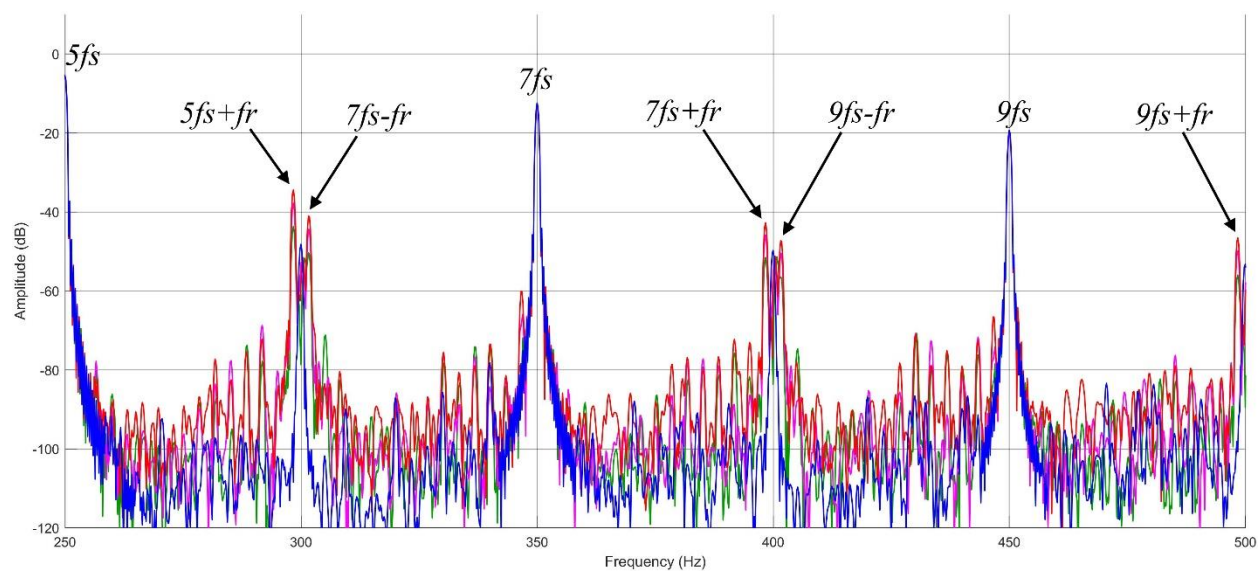
Στη περίπτωση της δυναμικής εκκεντρότητας γίνεται αμέσως σαφές πως η μέθοδος αυτή έχει εξαιρετική διαγνωστική ικανότητα. Παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στα πλάτη, ειδικά ανάμεσα στην υγιή μηχανή και τις εσφαλμένες, αλλά και ανάμεσα στα σφάλματα, όπου υπάρχει μια σταθερή διαφορά περίπου 10 dB ανάμεσα στα σφάλματα με 10% και 30% DE, ενώ τα πλάτη για την περίπτωση με 20% είναι πάντα ανάμεσα τους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.4.2.1 και το σχήμα 5.4.2.1 α, β.

Frequency (Hz)	Healthy (dB)	DE 10% (dB)	DE 20% (dB)	DE 30% (dB)
$fs - fr$	-130.3	-93.82	-87.65	-83.83
$fs + fr$	-96.47	-37.08	-31.21	-27.8
$3fs - fr$	-110.83	-46.47	-40.43	-36.85
$3fs + fr$	-93.07	-53.8	-47.61	-43.82
$5fs - fr$	-101.64	-51.91	-45.96	-42.83
$5fs + fr$	-96.1	-43.65	-37.76	-34.41
$7fs - fr$	-100.6	-50.33	-44.35	-41
$7fs + fr$	-105.35	-51.54	-45.8	-42.73
$9fs - fr$	-96.08	-56.41	-50.44	-47.27
$9fs + fr$	-100.74	-55.95	-49.8	-46.52

**Πίνακας 5.4.2.1** Πλάτη συχνοτήτων της επαγόμενης τάσης στον αισθητήρα μαγνητικής ροής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας



(α)



(β)

**Σχήμα 5.4.2.1** Φάσμα συχνοτήτων της επαγόμενης τάσης στον αισθητήρα μαγνητικής ροής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας

## 5.5 Μεικτή Εκκεντρότητα

Οι επαγωγικές μηχανές προς εξέταση μοντελοποιήθηκαν με σφάλματα μεικτής εκκεντρότητας 5%, 10% και 15% και συγκρίθηκαν με την υγιή. Οι τιμές των μεγεθών που φαίνονται στους παρακάτω πίνακες προκύπτουν μετά από κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Ansys.

Υγιής Μηχανή													
V <sub>A</sub> (rms)	I <sub>A</sub> (rms)	Cosφ A	V <sub>B</sub> (rms)	I <sub>B</sub> (rms)	Cosφ B	V <sub>C</sub> (rms)	I <sub>C</sub> (rms)	Cosφ C	T <sub>E</sub> (Nm)	n (rpm)	P <sub>E</sub> (W)	P <sub>M</sub> (W)	η (%)
230	37.9659	0.9510	229.98	37.965	0.9510	229.98	37.968	0.95111	74.797	2899.8	24914.9	21998.1	86.65

Μεικτή Εκκεντρότητα 5%													
V <sub>A</sub> (rms)	I <sub>A</sub> (rms)	Cosφ A	V <sub>B</sub> (rms)	I <sub>B</sub> (rms)	Cosφ B	V <sub>C</sub> (rms)	I <sub>C</sub> (rms)	Cosφ C	T <sub>E</sub> (Nm)	n (rpm)	P <sub>E</sub> (W)	P <sub>M</sub> (W)	η (%)
230	37.59463	0.95055	229.986	37.652	0.9507	229.98	37.578	0.95064	74.091	2900.9	24668.2	22006.1	86.79

Μεικτή Εκκεντρότητα 10%													
V <sub>A</sub> (rms)	I <sub>A</sub> (rms)	Cosφ A	V <sub>B</sub> (rms)	I <sub>B</sub> (rms)	Cosφ B	V <sub>C</sub> (rms)	I <sub>C</sub> (rms)	Cosφ C	T <sub>E</sub> (Nm)	n (rpm)	P <sub>E</sub> (W)	P <sub>M</sub> (W)	η (%)
230	37.70494	0.95058	229.986	37.696	0.9505	229.98	37.663	0.95050	74.220	2900.6	24718.3	22004.2	86.73

Μεικτή Εκκεντρότητα 15%													
V <sub>A</sub> (rms)	I <sub>A</sub> (rms)	Cosφ A	V <sub>B</sub> (rms)	I <sub>B</sub> (rms)	Cosφ B	V <sub>C</sub> (rms)	I <sub>C</sub> (rms)	Cosφ C	T <sub>E</sub> (Nm)	n (rpm)	P <sub>E</sub> (W)	P <sub>M</sub> (W)	η (%)
230	37.64429	0.95044	229.986	37.637	0.9505	229.98	37.647	0.95050	74.104	2900.8	24686.6	22005.2	86.7

### 5.5.1 Μέθοδος MCSA

Στη περίπτωση των σφαλμάτων μεικτής εκκεντρότητας, πολλές αρμονικές εγγέονται στο ρεύμα του στάτη και τα πλάτη των αρμονικών αυτών αυξάνονται αναλόγως. Η ανάλυση του φάσματος ρεύματος του στάτη για τη διάγνωση της μεικτής εκκεντρότητας χρησιμοποιώντας αρμονικές συνιστώσες γύρω από τη θεμελιώδη συχνότητα και υπάρχουσες αρμονικές που ονομάζονται principal slot harmonics (PSH), είναι απαραίτητες για τη διάγνωση σφάλματος εκκεντρότητας. Γενικά, η εξίσωση 5.3.1 χρησιμοποιείται για



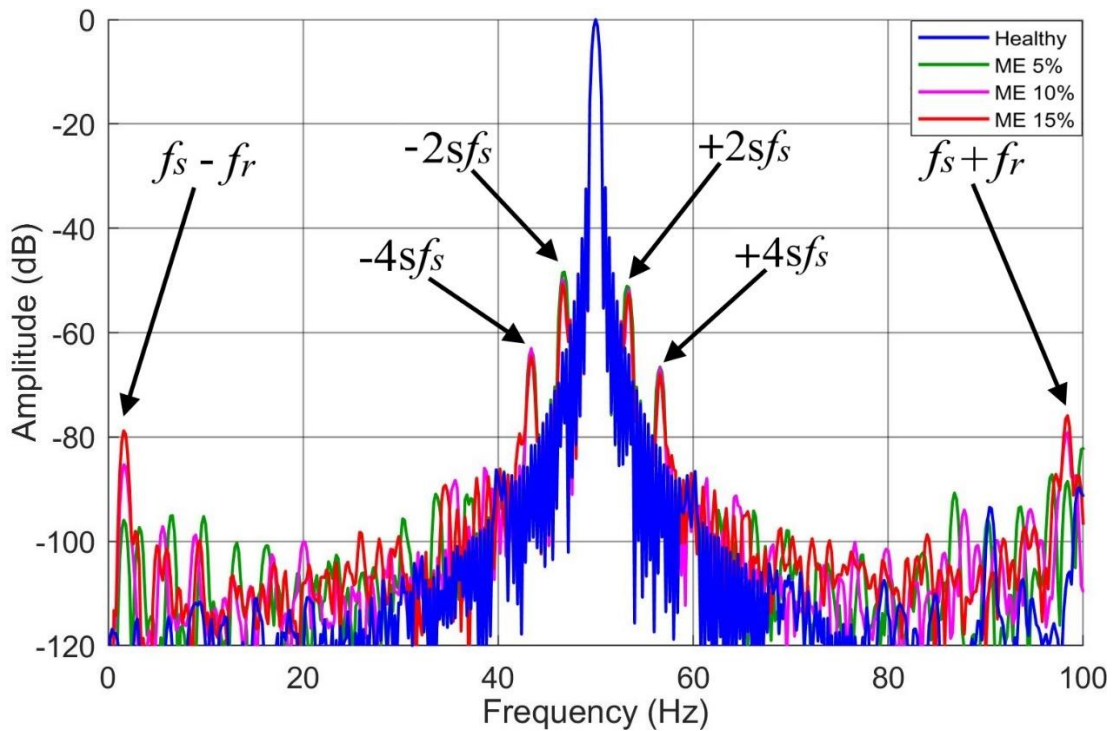
εύρεση συχνοτήτων και αρμονικών που συνδέονται με στατικές και δυναμικές εκκεντρότητες. Η εξίσωση εύρεσης των συχνοτήτων που συνδέονται με την μικτή εκκεντρότητα είναι:

$$f_r = \left(\frac{1-s}{p}\right) f_s \quad (5.5.1)$$

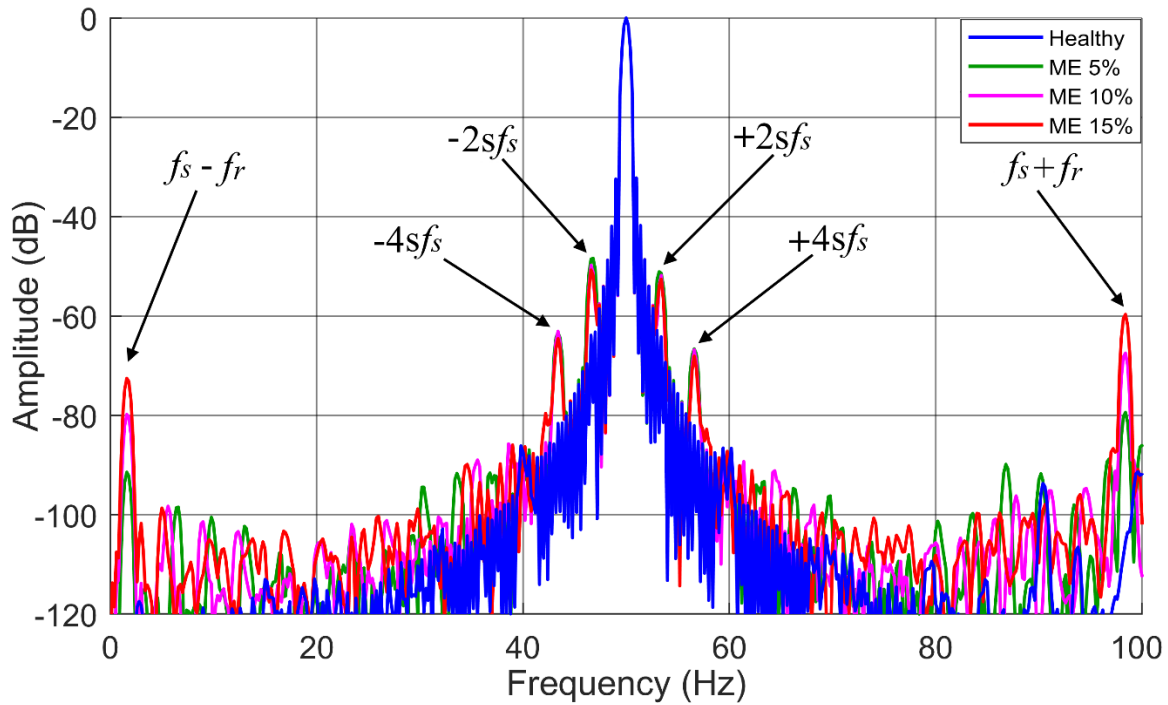
$$f_{eccen} = f_s \pm K f_r \quad (5.5.2)$$

Όπου  $K = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  Οι αρμονικές αυτές που βρίσκονται γύρω από την θεμελιώδη συχνότητα των 50 Hz οφείλονται στην μεικτή εκκεντρότητα. Οι σημαντικότερες συχνότητες σύμφωνα με την θεωρία προκύπτουν για  $K = 1$  από την εξίσωση 5.5.2 και για την περίπτωση που μελετάται είναι οι  $f_{eccen1} = 1.67 \text{ Hz}$  και  $f_{eccen2} = 98.3 \text{ Hz}$ .

Εξετάζοντας τα φάσματα του ρεύματος φάσης Α και γραμμής Α-Γ, και οι δύο παραπάνω συχνότητες είναι ορατές, με τα πλάτη και για τις δύο να είναι μεγαλύτερα στο φάσμα του ρεύματος γραμμής Α-Γ. Όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα 5.5.1.1, 5.5.1.2, τα πλάτη στις συχνότητες αυτές, αυξάνονται γραμμικά λόγω των σφαλμάτων και της σοβαρότητας αυτών, ειδικότερα στο φάσμα του ρεύματος γραμμής Α-Γ. Τέλος γύρω από την θεμελιώδη συχνότητα 50 Hz και συγκεκριμένα στα 43.4, 46.6, 53.4 και 56.6 Hz εμφανίζονται πλάτη και για τις τρεις σοβαρότατες σφαλμάτων που προκύπτουν από τον τύπο  $f_{eccen} = f_s \pm k s f_s$  (για  $k=2, k=4$ ), τα οποία όμως δεν χειροτερεύουν ανάλογα με αυτές.



**Σχήμα 5.5.1.1** Φάσμα ρεύματος φάσης Α της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις μεικτής εκκεντρότητας



**Σχήμα 5.5.1.2** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις μεικτής εκκεντρότητας

Αναλύοντας τον FFT του ρεύματος γραμμής Α-Γ της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις μεικτής εκκεντρότητας 5%, 10% και 15%, παρατηρούνται διάφορες συχνότητες που προκύπτουν λόγω των σφαλμάτων και φαίνονται στον πίνακα 5.5.1.1. Οι περισσότερες από τις συχνότητες που επηρεάζονται στο φάσμα του ρεύματος γραμμής Α-Γ της μεικτής εκκεντρότητας κληρονομούνται από τις περιπτώσεις της στατικής και δυναμικής εκκεντρότητας στον κινητήρα.

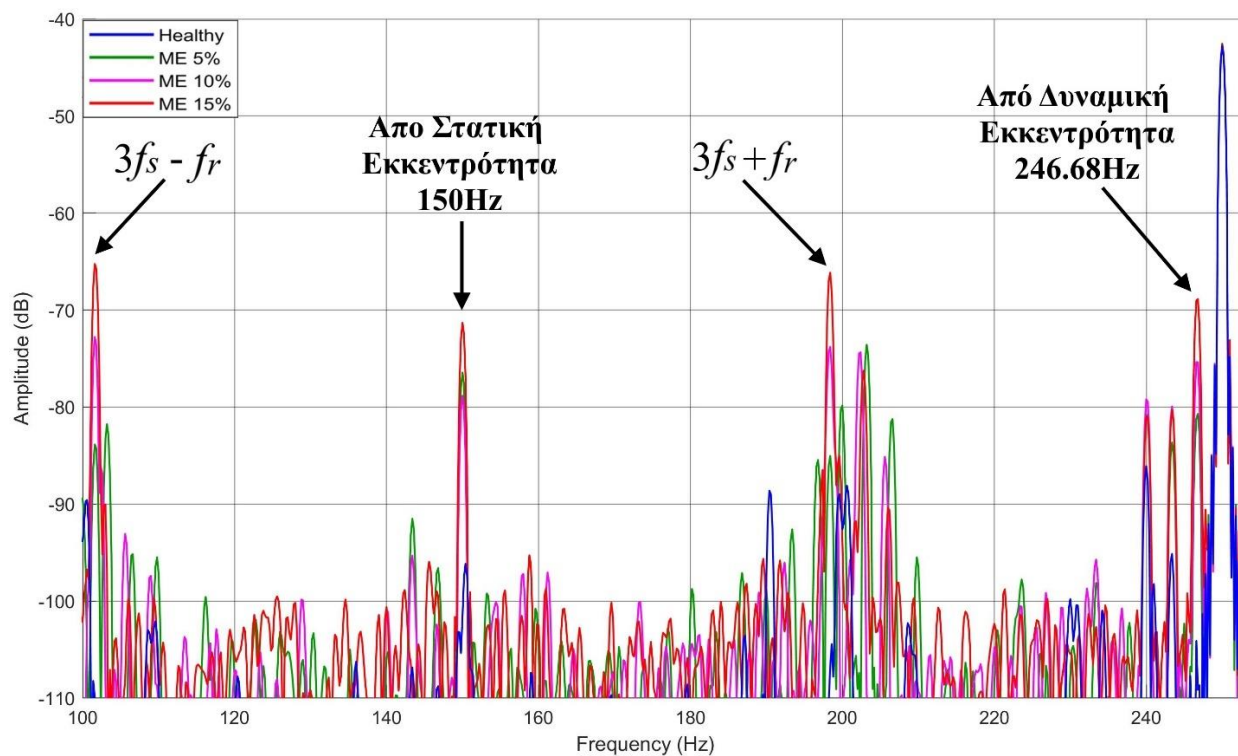
Επίσης, αναγράφονται διάφορες τιμές για τα  $n_d$  και  $n_{ws}$  που αντιστοιχούν σε κάποιες συχνότητες οι οποίες μπορεί να προκύψουν σε σφάλματα δυναμικής εκκεντρότητας από την εξίσωση 5.3.1, όμως κατά την ανάλυση των περιπτώσεων δυναμικής εκκεντρότητας 10%, 20% και 30%, δεν εμφανίστηκαν. Αυτό συμβαίνει διότι η εξίσωση 5.3.1 δίνει τις δυνατές συχνότητες ενδιαφέροντος για την συγκεκριμένη μηχανή και για τα σφάλματα, κατά προσέγγιση για διάφορες σοβαρότητες σφαλμάτων. Στις περιπτώσεις της μεικτής εκκεντρότητας του προβλήματος που μελετάται, ο παράγοντας της δυναμικής εκκεντρότητας δεν είναι 10%, 20% και 30%, αλλά 5%, 10% και 15%, με αποτέλεσμα να προσδεθούν αυτές οι νέες συχνότητες στο φάσμα.



		Frequency (Hz)	Healthy (dB)	Mixed Eccentricity		
				5% (dB)	10% (dB)	15% (dB)
fs-fr		1.67	-124.1	-91.43	-79.8	-72.53
fs+fr		98.3	-103.5	-79.38	-67.46	-59.67
3fs-fr		101.6	-107.9	-85.46	-72.41	-65.16
Από στατική εκκεντρότητα		150	-102	-70.59	-74.67	-74
3fs+fr		198.4	-105.44	-86.92	-75.86	-66.35
Από δυναμική εκκεντρότητα		246.68	-106.427	-80.52	-75.21	-69.9
Από στατική εκκεντρότητα		623.5	-115.9	-82.09	-82.16	-82.74
Από στατική εκκεντρότητα		626.75	-103.1	-77.1	-76.35	-75.38
Από στατική εκκεντρότητα		823.53	-104.17	-83.958	-82.24	-91.56
Από στατική εκκεντρότητα		826.73	-117.22	-80.68	-81.34	-81.74
Από στατική εκκεντρότητα		1300.3	-94.165	-70.84	-71.62	-80.43
Από δυναμική εκκεντρότητα		1397	-100.21	-70.85	-73.65	-71.38
Από δυναμική εκκεντρότητα		1404	-97.7	-74.55	-88.08	-82.9
$n_d = 1$	$n_{ws} = -1$	1448.68	-110.3	-81.9	-70	-62.86
$n_d = -1$	$n_{ws} = 1$	1452.28	-107.2	-85.26	-74.32	-68.17
Από δυναμική εκκεντρότητα		1497	-90.72	-64.18	-67.9	-76.7
Από δυναμική εκκεντρότητα		1504	-94.26	-64.72	-67.17	-68
Από στατική εκκεντρότητα		1600	-96.95	-67.57	-67.47	-75.76
$n_d = 1$	$n_{ws} = 3$	1648.7	-107.43	-85.8	-72.4	-66.4
Από δυναμική εκκεντρότητα		1697	-101.47	-72.72	-71.7	-70.2
Από δυναμική εκκεντρότητα		1704	-101.42	-73.56	-75.92	-77.39
$n_d = 1$	$n_{ws} = 5$	1748.66	-101.6	-94.37	-84.47	-75.27
$n_d = -1$	$n_{ws} = 7$	1752.28	-114.9	-99.5	-88.97	-81.26
Από δυναμική εκκεντρότητα		1794	-110.9	-84.46	-86.11	-82.47
Από δυναμική εκκεντρότητα		1797	-119	-81.38	-81	-80.9
Από στατική εκκεντρότητα		1800	-68.453	-61.28	-61.26	-61
Από δυναμική εκκεντρότητα		1804	-112.63	-87.67	-89.35	-89.77
Από στατική εκκεντρότητα		1900	-94.66	-85.23	-87.25	-86.5

Πίνακας 5.5.1.1 Πλάτη συχνοτήτων του ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής  
σε σχέση με τις περιπτώσεις μεικτής εκκεντρότητας

Οι συχνότητες 101,67 Hz και 198,3 Hz προκύπτουν από την εξίσωση της μικτής εκκεντρότητας εάν η θεμελιώδης συχνότητα  $f_s$  αντικατασταθεί με την 3η αρμονική των 150 Hz, η οποία κληρονομείται από τη στατική εκκεντρότητα που εμπεριέχεται στην μικτή. Και οι δύο αυτές συχνότητες δεν υπήρχαν στο φάσμα της υγιούς μηχανής. Στη συχνότητα 101.6 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 22 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με μικτή εκκεντρότητα 5%, ενώ έπειτα υπάρχει μία αύξηση κατά περίπου 13 dB μεταξύ των σφαλμάτων με ME 5% και ME 10%, και αύξηση κατά περίπου 7 dB μεταξύ των σφαλμάτων με ME 10% και ME 15%, το οποίο δείχνει πως τα μεγέθη για την συχνότητα αυτή επηρεάζονται σημαντικά λόγω των σφαλμάτων και τη σοβαρότητα αυτών. Η συχνότητα 150Hz προκύπτει από την στατική εκκεντρότητα όπου τα μεγέθη επηρεάζονταν γραμμικά ανάλογα με την σοβαρότητα του σφάλματος, σε αντίθεση με την περίπτωση της μικτής εκκεντρότητας όπου το πλάτος με ME 5% είναι μεγαλύτερο από τις περιπτώσεις με ME 10% και ME 15%. Στη συχνότητα 198.4 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 18 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με μικτή εκκεντρότητα 5%, ενώ έπειτα υπάρχει μία γραμμική αύξηση κατά περίπου 10 dB μεταξύ των σφαλμάτων, το οποίο δείχνει πως τα μεγέθη για την συχνότητα αυτή επηρεάζονται σημαντικά λόγω των σφαλμάτων και τη σοβαρότητα αυτών. Η συχνότητα 246.8 Hz προκύπτει από την δυναμική εκκεντρότητα όπου τα πλάτη μεταξύ των σφαλμάτων παρουσίαζαν γραμμική αύξηση κατά περίπου 10 dB, ενώ εδώ κατά περίπου 5 dB, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5.1.3.



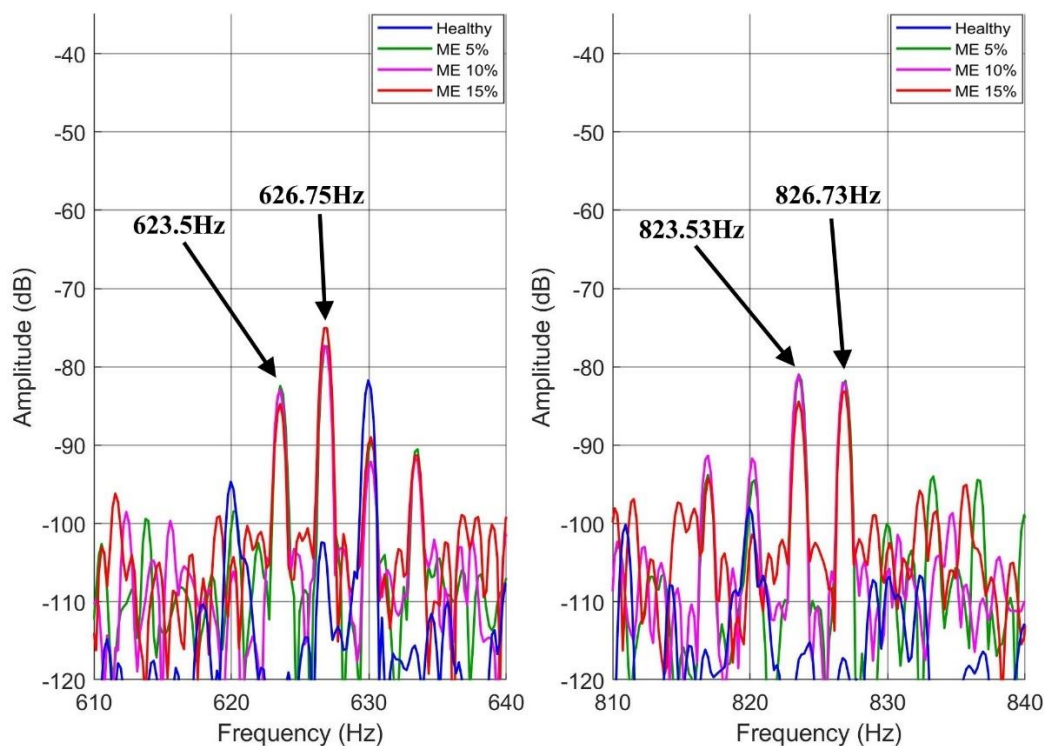
**Σχήμα 5.5.1.3** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις μεικτής εκκεντρότητας

Στη συχνότητα 623.5 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 34 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με μικτή εκκεντρότητα 5%, ενώ έπειτα τα πλάτη είναι περίπου ίδια και για τα τρία σφάλματα το οποίο δείχνει πως τα μεγέθη για την συχνότητα αυτή επηρεάζονται σημαντικά λόγω των σφαλμάτων αλλά όχι με τη σοβαρότητα αυτών.

Στη συχνότητα 626.75 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 26 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με μικτή εκκεντρότητα 5%, ενώ έπειτα υπάρχει μία πολύ μικρή γραμμική αύξηση κατά περίπου 1 dB μεταξύ των σφαλμάτων.

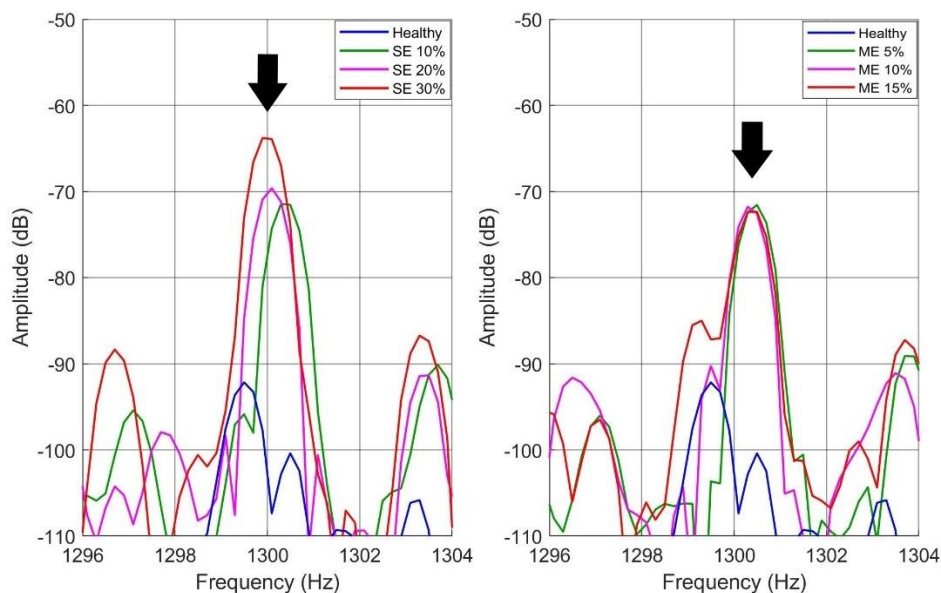
Στη συχνότητα 823.53 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 20 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με μικτή εκκεντρότητα 5%, έπειτα μία αύξηση κατά περίπου 2 dB μεταξύ των σφαλμάτων με ME 5% και ME 10%, και τέλος μείωση κατά περίπου 10 dB μεταξύ των σφαλμάτων με ME 10% και ME 15%. Αυτό είναι ενδιαφέρον διότι στην περίπτωση της στατικής εκκεντρότητας συνέβαινε το ακριβώς αντίθετο, δηλαδή η χειρότερη περίπτωση είχε το μεγαλύτερο πλάτος.

Στη συχνότητα 826.73 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 36 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με μικτή εκκεντρότητα 5%, ενώ έπειτα τα πλάτη είναι περίπου ίδια και για τα τρία σφάλματα όπως στην περίπτωση της στατικής εκκεντρότητας το οποίο δείχνει πως τα μεγέθη για την συχνότητα αυτή επηρεάζονται σημαντικά λόγω των σφαλμάτων αλλά όχι με τη σοβαρότητα αυτών, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5.1.4.



**Σχήμα 5.5.1.4** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις μεικτής εκκεντρότητας

Στο σχήμα 5.5.1.5 φαίνεται η διαφορά των μεγεθών στη συχνότητα 1300 Hz μεταξύ των περιπτώσεων στατικής και μεικτής εκκεντρότητας. Είναι λογικό να επηρεάζονται τα πλάτη στη συγκεκριμένη αρμονική στην μεικτή εκκεντρότητα λόγω της στατικής εκκεντρότητας που εμπεριέχεται, όμως δεν υπάρχει πλέον γραμμική αύξηση ανάμεσα στα σφάλματα διότι έχει προστεθεί ο παράγοντας της δυναμικής εκκεντρότητας.



**Σχήμα 5.5.1.5** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις μεικτής εκκεντρότητας

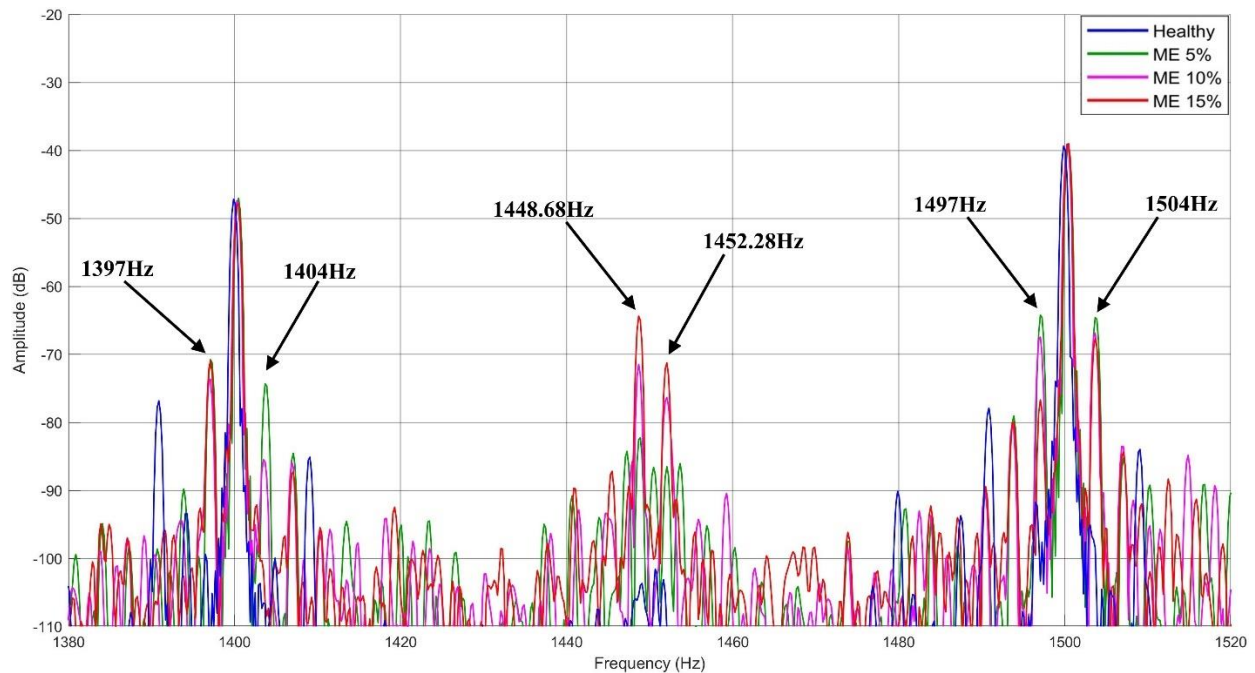
Στη συχνότητα 1397 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 30 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με μεικτή εκκεντρότητα 5%, ενώ έπειτα τα πλάτη είναι περίπου ίδια και για τα τρία σφάλματα. Αυτό είναι ενδιαφέρον διότι στην περίπτωση της δυναμικής εκκεντρότητας τα πλάτη αυξάνονταν μαζί με τα σφάλματα.

Στη συχνότητα 1404 Hz, αντίθετα με την περίπτωση της δυναμικής εκκεντρότητας όπου τα πλάτη αυξάνονταν μαζί με τα σφάλματα, εδώ το μεγαλύτερο πλάτος είναι αυτό της περίπτωσης με μεικτή εκκεντρότητα 5%.

Οι συχνότητες 1448.68 Hz και 1452.28 Hz είναι ένα ζευγάρι συχνοτήτων που προκύπτει από την εξίσωση 5.3.1 για περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας με  $n_d = 1$ ,  $n_{ws} = -1$  και  $n_d = -1$ ,  $n_{ws} = 1$  αντίστοιχα, οι οποίες όμως δεν εμφανίστηκαν στις περιπτώσεις με δυναμική εκκεντρότητα 10%, 20% και 30%. Υπάρχουν όμως στο φάσμα της μεικτής εκκεντρότητας όπου επηρεάζονται σημαντικά λόγω των σφαλμάτων και παρουσιάζουν σχεδόν γραμμική συμπεριφορά ανάλογα της σοβαρότητας αυτών.

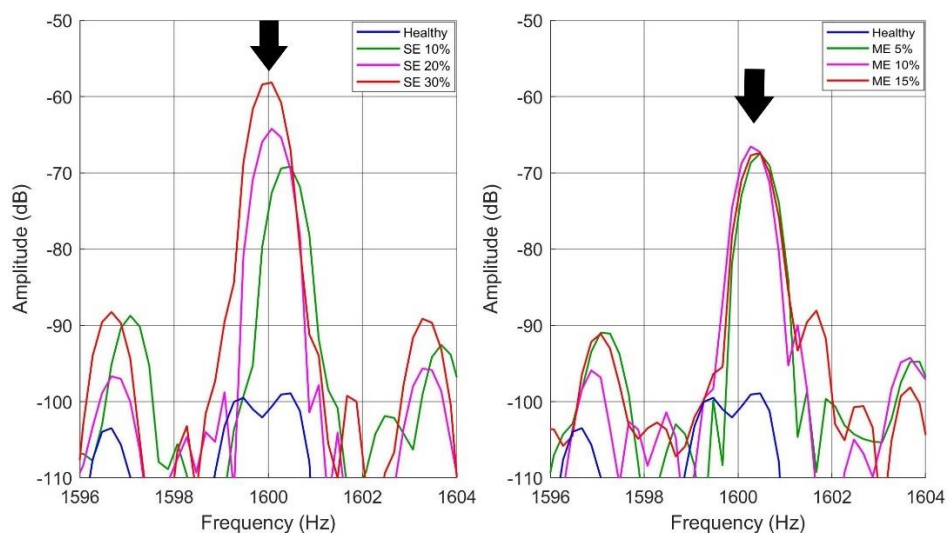
Στις συχνότητες 1497 Hz και 1504 Hz, αντίθετα με τις περιπτώσεις της δυναμικής εκκεντρότητας όπου τα πλάτη αυξάνονταν μαζί με τα σφάλματα, εδώ μειώνονται.

Στο σχήμα 5.5.1.6 φαίνονται τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν.



**Σχήμα 5.5.1.6** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις μεικτής εκκεντρότητας

Στο σχήμα 5.5.1.7 φαίνεται η διαφορά των μεγεθών στη συχνότητα 1600 Hz μεταξύ των περιπτώσεων στατικής και μεικτής εκκεντρότητας. Είναι λογικό να επηρεάζονται τα πλάτη στη συγκεκριμένη αρμονική στην μική εκκεντρότητα λόγω της στατικής εκκεντρότητας που εμπεριέχεται, όμως πλέον δεν αυξάνονται ανάλογα με την σοβαρότητα των σφαλμάτων διότι έχει ενταχθεί ο παράγοντας της δυναμικής εκκεντρότητας.



**Σχήμα 5.5.1.7** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις μεικτής εκκεντρότητας

Η συχνότητα 1648.68 Hz προκύπτει από την εξίσωση 5.3.1 για περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας με  $n_d = 1$ ,  $n_{ws} = 3$  η οποία όμως δεν εμφανίζεται στις περιπτώσεις με δυναμική εκκεντρότητα 10%, 20% και 30%. Υπάρχει όμως στο φάσμα της μεικτής εκκεντρότητας όπου επηρεάζεται σημαντικά λόγω των σφαλμάτων και της σοβαρότητας αυτών. Αξίζει να σημειωθεί πως το ζευγάρι της, δηλαδή η συχνότητα που προκύπτει από τον τύπο 1 με  $n_d = -1$ ,  $n_{ws} = 5$  δεν εμφανίζεται σαν κορυφή και για αυτό δεν συμπεριλαμβάνεται στον πίνακα 3.

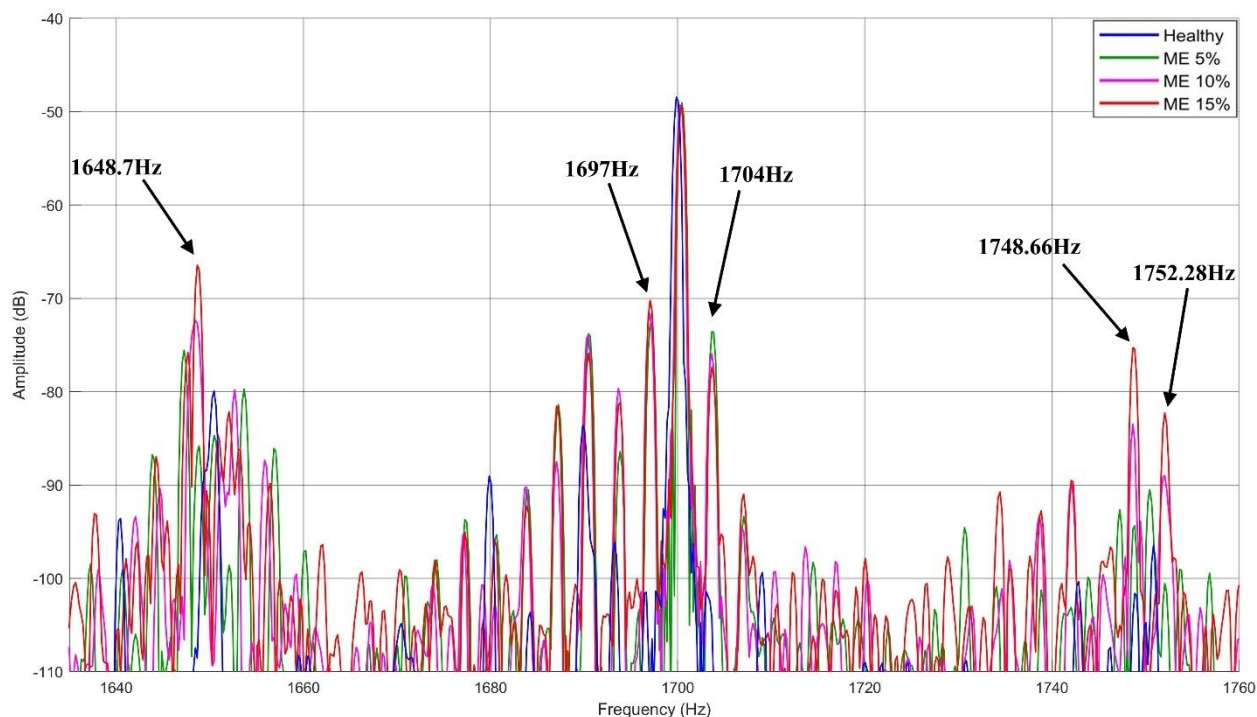
Στη συχνότητα 1697 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 30 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με μεικτή εκκεντρότητα 5%, ενώ έπειτα τα πλάτη είναι περίπου ίδια και για τα τρία σφάλματα. Αυτό είναι ενδιαφέρον διότι στην περίπτωση της δυναμικής εκκεντρότητας τα πλάτη αυξάνονταν μαζί με τα σφάλματα.

Στη συχνότητα 1704 Hz, υπάρχει μία αύξηση περίπου 28 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με μεικτή εκκεντρότητα 5%, ενώ έπειτα παρουσιάζεται γραμμική μείωση κατά 2 dB μεταξύ των σφαλμάτων, δηλαδή το μεγαλύτερο πλάτος εμφανίζεται στην περίπτωση με μεικτή εκκεντρότητα 5%.

Οι συχνότητες 1748.66 Hz και 1752.28 Hz είναι ένα ζευγάρι συχνοτήτων που προκύπτει από τον τύπο 1 για περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας με  $n_d = 1$ ,  $n_{ws} = 5$  και  $n_d = -1$ ,  $n_{ws} = 7$  αντίστοιχα, οι οποίες όμως δεν εμφανίστηκαν στις περιπτώσεις με δυναμική εκκεντρότητα 10%, 20% και 30%. Υπάρχουν όμως στο φάσμα της μεικτής εκκεντρότητας όπου επηρεάζονται λόγω των σφαλμάτων και παρουσιάζουν σχεδόν γραμμική συμπεριφορά ανάλογα της σοβαρότητας αυτών.

Στο σχήμα 5.5.1.8 φαίνονται τα παραπάνω αποτελέσματα.



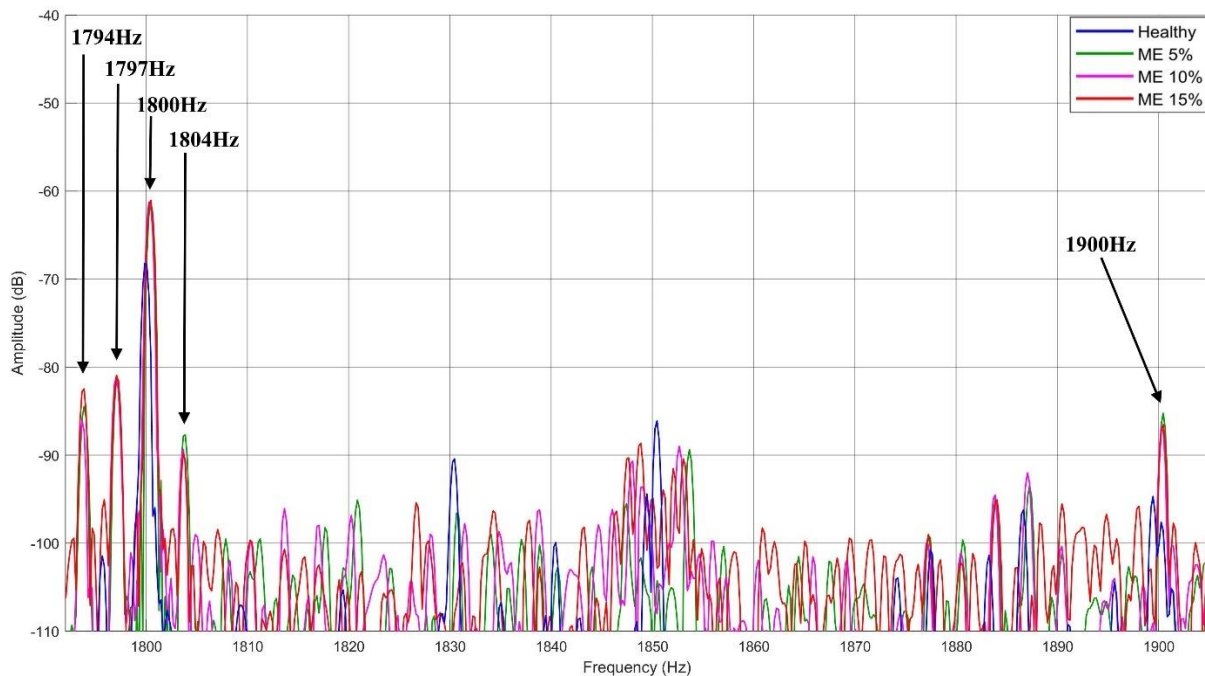


**Σχήμα 5.5.1.8** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις μεικτής εκκεντρότητας

Στη συχνότητα 1794 Hz, η μόνη διαφορά που παρατηρείται σε σχέση με τις περιπτώσεις δυναμικής εκκεντρότητας είναι ότι το πλάτος για μικτή εκκεντρότητα 10% είναι κατά 4 dB μικρότερο από αυτό του μοντέλου με δυναμική εκκεντρότητα 20%.

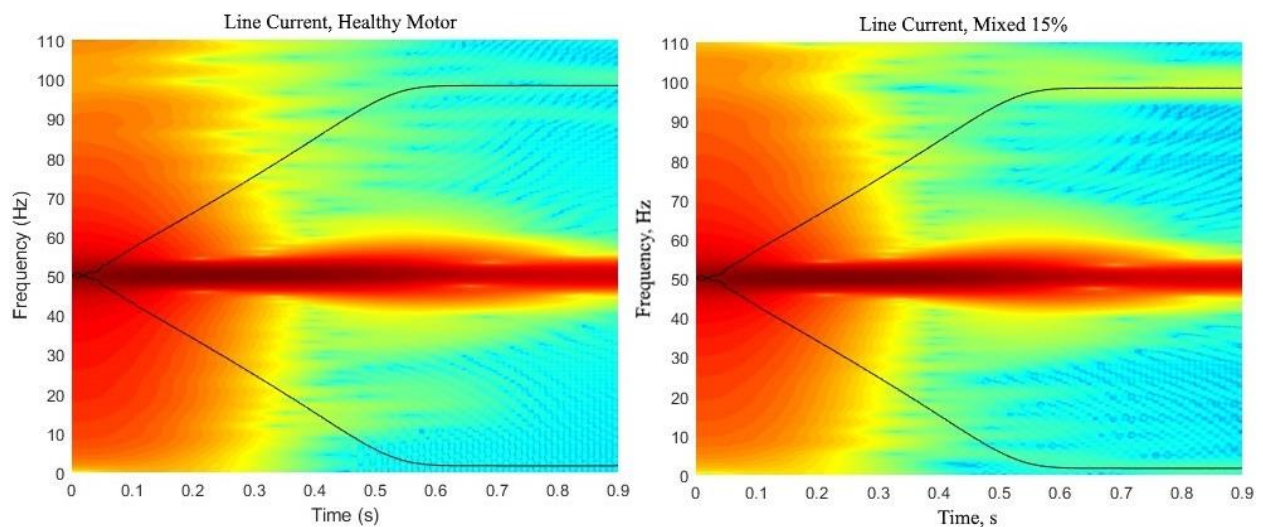
Στη συχνότητα 1797 Hz υπάρχει μία αύξηση περίπου 38 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με μεικτή εκκεντρότητα 5%, ενώ έπειτα τα πλάτη είναι περίπου ίδια και για τα τρία σφάλματα. Αυτό είναι ενδιαφέρον διότι στην περίπτωση της δυναμικής εκκεντρότητας τα πλάτη αυξάνονταν γραμμικά με την σοβαρότητα των σφαλμάτων. Στη συχνότητα 1804 Hz, υπάρχει μία αύξηση περίπου 25 dB από το υγιές μοντέλο στο μοντέλο με μεικτή εκκεντρότητα 5%, ενώ έπειτα τα πλάτη είναι περίπου ίδια και για τα τρία σφάλματα με υψηλότερο αυτό του μοντέλου με μεικτή εκκεντρότητα 5%. Αυτό είναι επίσης ενδιαφέρον διότι στην περίπτωση της δυναμικής εκκεντρότητας τα πλάτη αυξάνονταν με την σοβαρότητα των σφαλμάτων.

Στη συχνότητα 1800 Hz παρατηρείται μια πολύ μικρή διαφορά σε σχέση με τις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας το οποίο σημαίνει πως τα πλάτη δεν επηρεάζονται με την σοβαρότητα των σφαλμάτων αλλά απλά με την ύπαρξη αυτών. Στη συχνότητα 1900 Hz, όπου στις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας τα πλάτη αυξάνονται γραμμικά, εδώ παραμένουν σχεδόν ίδια. Αυτό σημαίνει πως τα πλάτη επηρεάζονται σημαντικά με την σοβαρότητα των σφαλμάτων και όχι μόνο με την ύπαρξη αυτών. Στο σχήμα 5.5.1.9 φαίνονται τα παραπάνω αποτελέσματα.



**Σχήμα 5.5.1.9** Φάσμα ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις μικτής εκκεντρότητας

Παρατηρώντας την STFT ανάλυση του transient ρεύματος γραμμής Α-Γ της υγιούς μηχανής σε σχέση με την περίπτωση μικτής εκκεντρότητας 15% του σχήματος 5.3.1.10, φαίνεται πως τα πλάτη των αρμονικών είναι αρκετά μικρά και δεν είναι εμφανή στις παρακάτω εικόνες. Οι συχνότητες 1.67Hz και 98.3Hz ξεχωρίζουν στις εσφαλμένες περιπτώσεις όταν η μηχανή φτάσει στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της μετά τα 0.6s.



**Σχήμα 5.4.1.8** STFT ανάλυση του μεταβατικού (transient) ρεύματος γραμμής της υγιούς μηχανής σε σχέση με την περίπτωση μικτής εκκεντρότητας 15%.

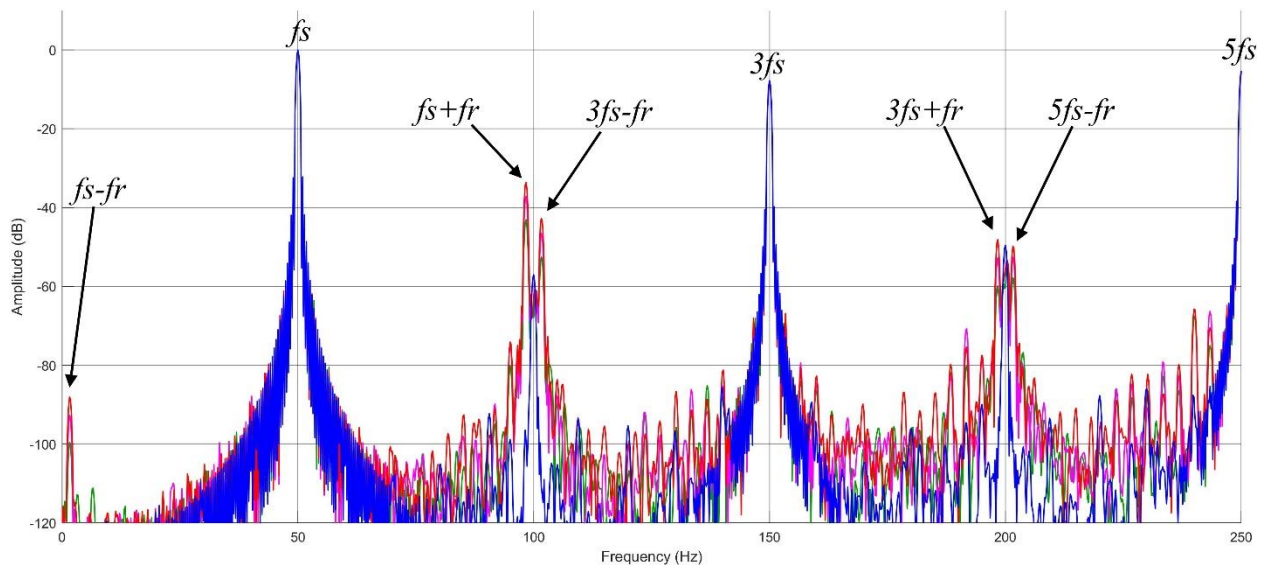


### 5.5.2 Μέθοδος Stray Flux Analysis

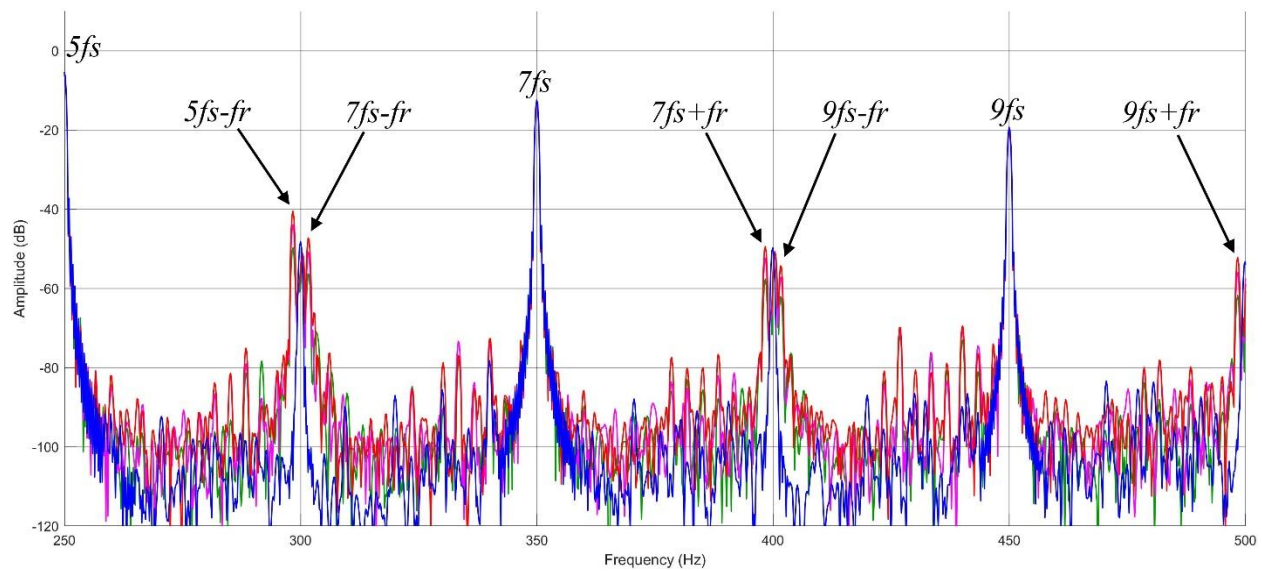
Στην περίπτωση της μικτής εκκεντρότητας συμβαίνει αυτό που θα περίμενε κανείς, κοιτώντας τα φάσματα των δύο προηγούμενων σφαλμάτων, δηλαδή ίδια συμπεριφορά με την δυναμική εκκεντρότητα αφού η στατική δεν την επηρεάζει σχεδόν καθόλου. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο φάσμα της μικτής εκκεντρότητας παρατηρούνται μικρότερα πλάτη από ότι στην περίπτωση της δυναμικής. Αυτό συμβαίνει γιατί ο παράγοντας της δυναμικής εκκεντρότητας στην μικτή είναι ο μισός.

Frequency (Hz)	Healthy (dB)	ME 5% (dB)	ME 10% (dB)	ME 15% (dB)
$fs - fr$	-130.3	-99.55	-92.7	-88.07
$fs + fr$	-96.47	-43.07	-37.18	-33.63
$3fs - fr$	-110.83	-52.5	-46.54	-42.72
$3fs + fr$	-93.07	-59.87	-52.74	-48.14
$5fs - fr$	-101.64	-57.8	-52.6	-49.8
$5fs + fr$	-96.1	-49.67	-43.93	-40.5
$7fs - fr$	-100.6	-59.3	-50.77	-47.26
$7fs + fr$	-105.35	-57.64	-52.42	-49.4
$9fs - fr$	-96.08	-62.05	-57.18	-54.33
$9fs + fr$	-100.74	-61.73	-55.97	-52.18

Πίνακας 5.5.2.1 Πλάτη συχνοτήτων της επαγόμενης τάσης στον αισθητήρα μαγνητικής ροής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις στατικής εκκεντρότητας



(α)



(β)

**Σχήμα 5.5.2.1** Φάσμα συχνοτήτων της επαγόμενης τάσης στον αισθητήρα μαγνητικής ροής της υγιούς μηχανής σε σχέση με τις περιπτώσεις μικτής εκκεντρότητας



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

#### **6.1 Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε σκοπό την μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών στοιχείων μίας ασύγχρονης μηχανής ισχύος 22kW όταν αυτή λειτουργεί υπό φορτίο και σφάλματα στατικής, δυναμικής και μεικτής εκκεντρότητας. Σκοπός ήταν η ανάλυση των αποτελεσμάτων που επηρεάζονται λόγω των σφαλμάτων, σε σχέση με την υγιή επαγωγική μηχανή, ώστε να φανεί αν μπορεί να γίνει πρόληψη αυτών πριν γίνουν καταστροφικά για την μηχανή. Επειδή δεν υπήρχε πρόσβαση σε πραγματική επαγωγική μηχανή, η εργασία στηρίχθηκε σε αποτελέσματα από προσομοιώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και αναλυτικούς τύπους. Λόγω αυτού λαμβάνονται υπόψιν τα παρακάτω:

- Ο κινητήρας προσομοιώθηκε σε περιβάλλον 2 διαστάσεων και έτσι δε λαμβάνεται υπόψιν η όποια κλίση των μπαρών του δρομέα καθώς και τυχόν πληροφορίες όπως οι δακτύλιοι βραχυκύκλωσης και οι κεφαλές των τυλιγμάτων.
- Οι προσομοιωμένοι κινητήρες έχουν τέλεια γεωμετρική συμμετρία ενώ οι πραγματικοί, όχι.
- Οι τάσεις τροφοδοσίας είναι καθαρά ημιτονοειδείς στις προσομοιώσεις ενώ στην πραγματικότητα αυτό δεν ισχύει, διότι οι τάσεις του δικτύου έχουν αρμονικές.
- Οι φασικές τάσεις του κινητήρα είναι απόλυτα συμμετρικές στην περίπτωση των προσομοιώσεων. Στην πραγματικότητα αυτό δε συμβαίνει, λόγω ασύμμετρων καλωδιώσεων και τυχόν μικρής κατασκευαστικής ασυμμετρίας μεταξύ των φάσεων.

#### **6.2 Κυριότερα Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων**

Αρχικά, μελετήθηκε το σφάλμα στατικής εκκεντρότητας σε επαγωγικούς κινητήρες με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Παρά την προηγούμενη γνώση η οποία υποστήριζε ότι σε επαγωγικούς PSH κινητήρες είναι αδύνατη η διάγνωση μέσω της μεθόδου MCSA στην περίπτωση όπου ο κινητήρας έχει μόνο στατική εκκεντρότητα, για τον συγκεκριμένο κινητήρα βρέθηκαν δύο αρμονικές που επηρεάζονται από τα σφάλματα και την σοβαρότητα τους. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος SFD-MCSA, με εξαιρετικά αποτελέσματα. Αντίθετα, η ανάλυση της μαγνητικής ροής εξωτερικά της μηχανής δεν κατάφερε να διαγνώσει το σφάλμα.

Παράλληλα, μελετήθηκε το σφάλμα δυναμικής εκκεντρότητας σε επαγωγικούς κινητήρες με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για την διάγνωση αυτού, χρησιμοποιήθηκε πάλι η μέθοδος MCSA. Στα ρεύματα γραμμής στις περιπτώσεις της δυναμικής εκκεντρότητας, οι δύο συχνότητες που επηρεάζονταν στα σφάλματα στατικής εκκεντρότητα, εδώ δεν εμφανίστηκαν. Αντίθετα, οι υπογραφές του σφάλματος παρατηρήθηκαν ακριβώς στις συχνότητες που προέκυψαν από την εξίσωση της μεθόδου MCSA για δυναμική εκκεντρότητα. Επιπλέον, η ανάλυση της μαγνητικής ροής εξωτερικά της μηχανής προσέφερε εξαιρετικά αποτελέσματα στην διάγνωση του σφάλματος.

Συγχρόνως, μελετήθηκε το σφάλμα μεικτής εκκεντρότητας σε επαγωγικούς κινητήρες με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και για τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκε και πάλι η διαγνωστική μέθοδος MCSA. Οι σημαντικότερες υπογραφές σφαλμάτων μεικτής εκκεντρότητας σύμφωνα με την επιλεγμένη μέθοδο ήταν δύο συχνότητες. Αυτές, δεν υπήρχαν στην υγιή μηχανή και εμφανίστηκαν ξεκάθαρα στα φάσματα φάσης και γραμμής των ρευμάτων των εσφαλμένων μηχανών, με γραμμική αύξηση του πλάτους ανάλογα με την σοβαρότητα αυτών. Επιπλέον, η ανάλυση της μαγνητικής ροής εξωτερικά της μηχανής, αν και ανέδειξε υπογραφές των σφαλμάτων, ουσιαστικά κατάφερε να διαγνώσει το σφάλμα της δυναμικής εκκεντρότητας που εμπεριέχεται σε αυτό της μεικτής.

Επίσης, σε όλα τα φάσματα του ρεύματος του στάτη, και για τις τρεις σφαλματικές εκκεντρότητες, εμφανίζονται συχνότητες γύρω από την θεμελιώδη των 50 Hz, οι οποίες προκύπτουν από τον τύπο  $f_{eccen} = f_s \pm ksf_s$ , με  $k = 2, k = 4$ . Γενικά, η μελέτη των φασμάτων του ρεύματος του στάτη ανέδειξε και διάφορες άλλες συχνότητες που επηρεάστηκαν ανάλογα με τα σφάλματα σε σχέση με την υγιή μηχανή, και παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Η ανάλυση της μεταβατικής (transient) περιόδου του ρεύματος, μέχρι η μηχανή δηλαδή να βρεθεί σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, δυστυχώς δεν ανέδειξε αποτελέσματα διάγνωσης των σφαλμάτων.

### **6.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα**

- Χρήση της μεθόδου του διανύσματος Park για την διάγνωση των σφαλμάτων εκκεντρότητας.
- Χρήση του φάσματος της ισχύος, όπου η εκκεντρότητα μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέτρηση της απόστασης μεταξύ των δύο κορυφών του φάσματος.
- Μελέτη της ικανότητας διάγνωσης των σφαλμάτων δυναμικής και μεικτής εκκεντρότητας μέσω του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας όπως έγινε στην στατική εκκεντρότητα.

- Μελέτη και ανάλυση του αρμονικού περιεχομένου του επαγωγικού κινητήρα για την αξιόπιστη διάκριση καταστάσεων που προκαλούν παρόμοιο αρμονικό περιεχόμενο, ώστε να αποφεύγονται ψευδής υπογραφές σφαλμάτων.
- Σχεδίαση και προσομοίωση του κινητήρα σε 3 διαστάσεις ώστε να λαμβάνεται υπόψη η όποια κλίση των μπαρών του δρομέα καθώς και οι δακτύλιοι βραχυκύκλωσης και οι κεφαλές των τυλιγμάτων.
- Πειραματική επαλήθευση των αποτελεσμάτων του δισδιάστατου ή τρισδιάστατου κινητήρα. Με κινητήρα ίδιων προδιαγραφών.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1]. S. Nandi, S. Ahmed, and H. Toliyat, "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three-phase induction motor with different rotor cages," *IEEE Trans. Ener. Conv.*, vol. 16, no. 3, pp. 253–260, Sep. 2001.
- [2]. K. N. Gyftakis and J. C. Kappatou, "A Novel and Effective Method of Static Eccentricity Diagnosis in Three-Phase PSH Induction Motors", *IEEE Trans. Ener. Conv.*, Vol. 28, No. 2, pp. 405-412, Jun. 2013.
- [3]. S. Nandi, R. M. Bharadwaj, and H. Toliyat, "Performance analysis of a three-phase induction motor under mixed eccentricity condition," *IEEE Trans. Ener. Conv.*, vol. 17, no. 3, pp. 392–399, Sep. 2002.
- [4]. S. Nandi, R.M. Bharadwaj, H. A Toliyat, "Mixed eccentricity in three phase induction machines: analysis, simulation and experiments", *Conference Record of the 37th Industry Applications Conference*, Volume: 3, pp. 1525-1532, 2002
- [5]. D.G. Dorrell, W.T. Thomson and S. Roach, "Analysis of air-gap flux, current, vibration signals as a function of the combination of static and dynamic air-gap eccentricity in 3-phase induction motors", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 33, No. 1, pp. 24-34, 1997
- [6]. J. Subramanian, S. Nandi and T. Ilamparithi, "Detection and severity estimation of static and dynamic eccentricity in induction motors using finite element analysis," *2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Guarda, Portugal, 2015, pp. 366-372
- [7]. Xiaodong Li and S. Nandi, "Analysis of a 3-phase induction machine with inclined static eccentricity," *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, 2005., San Antonio, TX, 2005, pp. 1606-1613
- [8]. Noura, Halem & Zouzou, Salah & Srairi, Kamel & Guedidi, S & Abood, FA. (2013). Detection of Static Eccentricity Fault in Saturated Induction Motors by Air-Gap Magnetic Flux Signature Analysis Using Finite Element Method. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*.
- [9]. S. Nandi, R. M. Bharadwaj, H. A. Toliyat and A. G. Parlos, "Performance analysis of a three-phase induction motor under mixed eccentricity condition," *1998 International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, 1998. Proceedings., Perth, WA, Australia, 1998, pp. 123-128 Vol.1
- [10]. G. M. Joksimović, J. Riger, T. M. Wolbank, N. Perić and M. Vašak, "Stator-Current Spectrum Signature of Healthy Cage Rotor Induction Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, pp. 4025-4033, Sept. 2013
- [11]. Rakesh Parekh, *AC Induction Motor Fundamentals*, Microchip Technology Inc. 2003



- [12]. David Meeker, Finite Element Method Magnetics User's manual, version 4.2, February 5, 2009
- [13]. David Meeker, Finite Element Method Magnetics OctaveFEMM, version 1.2, March 25, 2009
- [14]. Chiver, Olivian & Barz, Cristian & Neamt, Liviu & Erdei, Zoltan. (2010). Induction Motor Analysis by Finite Elements Method. Journal of Electrical and Electronics Engineering.
- [15]. Lee, Sang Bin, Stone, Greg C., Antonino-Daviu, Jose, Gyftakis, Konstantinos N., Strangas, Elias G., Maussion, Pascal, Platero, Carlos A., "Condition Monitoring of Industrial Electric Machines: State of the Art and Future Challenges," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 14, no. 4, pp. 158-167, Dec. 2020
- [16]. Άγγελος Α. Χριστοφή, "Σχεδίαση και Βελτιστοποίηση Δρομέα Ηλεκτρικής Μηχανής Επαγωγής Ισχύος 2 HP", Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2010, ΕΜΠ
- [17]. K. N. Gyftakis, "Detection of Early Inter-Turn Stator Faults in Induction Motors via Symmetrical Components - Current vs Stray Flux Analysis," *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, USA, 2020, pp. 796-801
- [18]. Oliveira, Filipe & Donsión, M.P. (2017). A finite element model of an induction motor considering rotor skew and harmonics. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 1. 119-122.
- [19]. K. N. Gyftakis, D. V. Spyropoulos and E. D. Mitronikas, "Advanced Detection of Rotor Electrical Faults in Induction Motors at Start-Up," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 2, pp. 1101-1109, June 2021
- [20]. Δημήτριος Θεμέλης, «Ηλεκτρικές Μηχανές, Κεφάλαιο 5, Τριφασικοί Ασύγχρονοι – Επαγωγικοί Κινητήρες, Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας». ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015
- [21]. S. Rasid, X. Lian, M. A. Mueller and K. N. Gyftakis, "Detection of Eccentricity Faults in air-cored C-GEN PM Machines for Wind Turbine," *2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Dallas, TX, USA, 2021, pp. 351-357.
- [22]. D. V. Spyropoulos, P. A. Panagiotou, I. Arvanitakis, E. D. Mitronikas and K. N. Gyftakis, "Extraction of Frequency Information for the Reliable Screening of Rotor Electrical Faults Via Torque Monitoring in Induction Motors," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 6, pp. 5949-5958, Nov.-Dec. 2021
- [23]. Szabo, Lorand. (2023). STUDY ON SQUIRREL CAGE FAULTS OF INDUCTION MACHINES BY MEANS OF ADVANCED FEM BASED SIMULATIONS.
- [24]. K. N. Gyftakis and J. Kappatou, "The Impact of the Rotor Slot Number on the Behaviour of the Induction Motor," *Advances in Power Electronics*, vol. 2013, pp. 1–9, 2013.
- [25]. J. S. Hsu, "Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 5, pp. 1016-1021, Sept.-Oct. 1995

- [26]. Διδακτορική Διατριβή Κωνσταντίνου Ν. Γυφτάκη “ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΑΥΤΩΝ”, Πάτρα 2015
- [27]. Rigoni, Mauricio & Sadowski, Nelson & Batistela, Nelson & Bastos, J.P.A. & Nau, Sebastião. (2012). Detection and analysis of rotor faults in induction motors by the measurement of the stray magnetic flux. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 11. 68-80.
- [28]. Kuczmam, Miklos & Gadó, Krisztián & Marcsa, Daniel & Horváth, Sándor & Vajda, Istvan & Belahcen, Anouar. (2018). Analysis of an Induction Machine by the Finite Element Method. *Recent Innovations in Mechatronics*.
- [29]. Negrea, M.D., "Electromagnetic flux monitoring for detecting faults in electrical machines," Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics, Helsinki, Finland, 2006. ISBN 951-22-8477-4
- [30]. S. B. Salem, M. Salah, W. Touti, K. Bacha and A. Chaari, "Stray Flux analysis for monitoring eccentricity faults in induction motors: Experimental study," 2017 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), Hammamet, Tunisia, 2017, pp. 292-297, doi: 10.1109/CADIAG.2017.8075673.
- [31]. I. Chernyavska and O. Vitek, "Analysis of air-gap eccentricity in inverter fed induction motor by means of motor current signature analysis and stray flux of motor," 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Tinos, Greece, 2017, pp. 72-76, doi: 10.1109/DEMPED.2017.8062336.
- [32]. O. Vitek, M. Janda, V. Hajek and P. Bauer, "Detection of eccentricity and bearings fault using stray flux monitoring," 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives, Bologna, Italy, 2011, pp. 456-461, doi: 10.1109/DEMPED.2011.6063663.
- [33]. J. Bonet-Jara, J. Pons-Llinares and K. N. Gyftakis, "Comprehensive Analysis of Principal Slot Harmonics as Reliable Indicators for Early Detection of Inter-Turn Faults in Induction Motors of Deep-Well Submersible Pumps," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, doi: 10.1109/TIE.2022.3231333.