



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδίαση και πειραματική επιβεβαίωση κινητήρα μονίμων  
μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ευφροσύνη Θεοδώρου

**Επιβλέπων :** Αντώνιος Κλαδάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2011





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Σχεδίαση και βελτιστοποίηση κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευφροσύνη Θεοδώρου

**Επιβλέπων :** Αντώνιος Κλαδάς  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18<sup>η</sup> Ιουλίου 2011.

.....  
Αντώνιος Κλαδάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Στέφανος Μανιάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Σταύρος Παπαθανασίου  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....

Ευφροσύνη Θεοδώρου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ευφροσύνη Θεοδώρου, 2011.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved®.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά την εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά, τον Καθηγητή μου κ. Αντώνη Κλαδά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την παρούσα εργασία, για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία για την περάτωσή της. Ιδιαίτέρως ευχαριστώ επίσης τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Λάσκαρη που πρόθυμα με στήριξε σε κάθε βήμα της εκπόνησης της σχεδίασης.

Ευχαριστώ επίσης, το σύνολο του προσωπικού του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος για τη συνεργασία του στα πλαίσια εκπόνησης της εργασίας, και ιδιαιτέρως τον Τεχνικό κ. Παναγιώτη Ζάννη για τη βοήθεια κατά την εκτέλεση του πειράματος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την πολύτιμη στήριξή τους.

## **Περίληψη**

Η παρούσα εργασία επιχειρεί τη σχεδίαση ηλεκτρικού κινητήρα για εφαρμογή σε σύστημα ηλεκτρικής κίνησης οχήματος, χρησιμοποιώντας ως κύριο κριτήριο βελτιστοποίησης τη μείωση των απωλειών. Το όχημα για το οποίο σχεδιάζεται και κατασκευάζεται ο κινητήρας προορίζεται να συμμετάσχει στον ευρωπαϊκό διαγωνισμό πρότυπων μονοθέσιων οχημάτων οικονομικής μετακίνησης. Η εργασία σε ένα πρώτο βήμα προσδιορίζει τις προδιαγραφές των κύριων λειτουργικών χαρακτηριστικών του κινητήρα και σε ένα δεύτερο βήμα αναπτύσσει τη μελέτη σχεδίασης και διαμόρφωσης όλων των συνιστωσών του. Συγκεκριμένα, ο κινητήρας χαρακτηρίζεται από χαμηλής ισχύ ( $\sim 0.6 \text{ kW}$ ), χαμηλή ταχύτητα περιστροφής ( $\sim 400 \text{ Σαλ}$ ), και ταυτόχρονα πολύ υψηλή απόδοση ( $> 90\%$ ), με δυνατότητα παροχής υψηλής ροπής εκκινήσεως.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική διερεύνηση των δυνατοτήτων, των περιορισμών και των επιλογών που υπάρχουν αναφορικά με τη χρήση ηλεκτρικών κινητήρων σε οχήματα. Μετά από μία σύντομη παρουσίαση του ηλεκτροκίνητου οχήματος ως εφαρμογή, ακολουθεί η συγκριτική παρουσίαση εναλλακτικών τύπων κινητήρων και τεκμηριώνεται η επιλογή της σχεδίασης κινητήρα μονίμων μαγνητών.

Εξειδικεύεται η μεθοδολογία σχεδίασης του ηλεκτροκινητήρα που υιοθετήθηκε. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία της οποίας οι διάφορες επί μέρους δράσεις περιλαμβάνουν την επιλογή των κατάλληλων υλικών κατασκευής, τις θεωρητικές σχέσεις της προκαταρκτικής σχεδίασης των διαστάσεων και τα υπολογιστικά εργαλεία λεπτομερούς πεδιακής ανάλυσης, όπως τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν. Ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση και σύγκριση των διάφορων τύπων κινητήρων μονίμων μαγνητών, αναφορικά με τη διάταξη, τη μαγνήτιση και την τοποθέτηση των μαγνητών. Δίνεται έμφαση στην τοπολογία εξωτερικού δρομέα και στη χρήση συγκεντρωμένου τυλίγματος κλασματικού βήματος και εξηγούνται οι λόγοι επιλογής τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εφαρμογή της προαναφερόμενης μεθοδολογίας ενώ αναπτύσσεται και η πλήρως παραμετροποιημένη σχεδίαση της μηχανής, για να ακολουθήσει η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της, μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας των βασικών παραμέτρων. Αναλύονται επίσης τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά του κινητήρα μονίμων μαγνητών και η οριστική σχεδίαση του δοκιμίου προς κατασκευή. Τελικά, ακολουθεί η πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών επίδοσης και απόδοσης καθώς και η σύγκρισή τους με αυτά του υφιστάμενου κινητήρα, που είχε αναπτυχθεί παλαιότερα για την ίδια εφαρμογή.

Στις προσομοιώσεις που έγιναν χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων FEMM και αριθμητικής ολοκλήρωσης διαφορικών εξισώσεων MATLAB.

**Λέξεις κλειδιά:** Ηλεκτρικά οχήματα, σχεδίαση ηλεκτρικού κινητήρα, κινητήρες μονίμων μαγνητών, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, παραμετροποιημένη σχεδίαση, συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος, βελτιστοποίηση γεωμετρίας, δρομέας τροχού.

## **Abstract**

The present thesis undertakes the design procedure of an electric motor, with the dominant optimization criterion of loss minimization. The electric motor is intended for an electric vehicle application in the frame of participation in the European contest of prototype vehicles presenting low fuel consumption (Shell EcoMarathon). Initially, the main motor performance and efficiency specifications are prescribed. Subsequently, the design study is performed in order to enable all motor components to meet the specified technical standards. In particular, the motor presents low nominal power ( $\sim 1$  kW), low rotational speed ( $\sim 300$  rpm), a very high efficiency ( $> 90\%$ ), and the capability of providing a high torque output during start.

In a first step, a bibliographical research of the possibilities, the restrictions and the choices available regarding electric motors in vehicles was performed. Following a short presentation of the application of electric vehicles, a comparison has been outlined between the potential types of electric motors suitable for such applications. The selection has been directed towards the permanent magnet synchronous motor (PMSM).

The design procedure which has been adopted in the present study is described, mainly focusing on permanent magnet machines. It is a complex procedure which involves the selection of appropriate materials, the initial design of the motor dimensions by means of corresponding theoretical equations and the utilization of computation tools for detailed field analysis such as finite elements methods. Furthermore, a comparative analysis of different types of permanent magnet motors is undertaken in terms of magnetization and placement of permanent magnets. The use of external rotor design as well as non-overlapping concentrated fractional-pitch windings has been selected for the specific motor.

The implementation of the aforementioned techniques in the design of the specific electric motor was performed. Additionally, the fully parametric design has been developed as well as the optimization procedure of the machine dimensions. The simulated performance and efficiency characteristics are presented along with the final design of the motor to be constructed. The paper includes the experimental validation of the motor as well as the comparison to an existing motor, designed a few years ago for the same application, with comparative conclusions being drawn.

The software tools used for simulation were the finite elements software, FEMM and the numerical integration software of differential equations, MATLAB.

**Key Words:** Electric vehicles, electric motor design, permanent magnet motors, finite elements method, non-overlapping concentrated fractional-pitch winding, parameter design, geometry optimization, in-wheel motor.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	6
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>13</b>
1.1 Σκοπός της εργασίας .....	13
1.2 Δομή της εργασίας.....	14
1.3 Επιστημονική συνεισφορά της εργασίας.....	15
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ .....</b>	<b>17</b>
2.1 Παρουσίαση του ηλεκτρικού οχήματος.....	17
2.2 Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος.....	18
2.3 Συγκριτική παρουσίαση κινητήρων για ηλεκτρικά οχήματα.....	22
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ .....</b>	<b>25</b>
3.1 Κατασκευαστικά υλικά ηλεκτρικών μηχανών.....	25
3.2 Θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης .....	28
3.2.1 Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης .....	28
3.2.2 Βήματα της προκαταρκτικής σχεδίασης .....	32
3.3 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.....	34
3.3.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα .....	34
3.3.2 Οριακές συνθήκες.....	36
3.3.3 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	36
3.3.4 Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων <i>femm</i> .....	37
3.4 Κινητήρες μονίμων μαγνητών .....	38
3.4.1 Μόνιμοι Μαγνήτες.....	38
3.4.2 Σημείο λειτουργίας και γραμμή διακένου .....	41
3.4.3 Επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.....	45
3.4.4 Διάταξη μονίμων μαγνητών .....	46

3.4.5 Μαγνήτιση μονίμων μαγνητών .....	48
3.5 Ηλεκτρικές μηχανές μονίμων μαγνητών εναλλασσομένου ρεύματος .....	50
3.5.1 Διαμόρφωση μηχανών .....	50
3.5.2 Διαμορφώσεις δρομέα .....	53
3.5.2.1 Σύγχρονος κινητήρας μονίμων επιφανειακών μαγνητών.....	54
3.5.2.2 Σύγχρονος κινητήρας μονίμων επιφανειακά εσωτερικών μαγνητών .....	54
3.5.2.3 Σύγχρονος κινητήρας μονίμων εσωτερικών μαγνητών .....	54
3.5.2.4 Σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών εκκίνησης από το δίκτυο .....	55
3.5.3 Τοπολογία εξωτερικού δρομέα.....	57
3.5.4 Κινητήρες μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένο τύλιγμα.....	58
3.5.5 Είδη κινητήρων μονίμων μαγνητών.....	62
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ 670 WATT ....</b>	<b>65</b>
4.1 Προδιαγραφές κινητήρα.....	65
4.2 Προκαταρκτική Σχεδίαση .....	66
4.2.1 Διαστασιολόγηση διακένου.....	67
4.2.2 Μελέτη στάτη .....	69
4.2.3 Μελέτη δρομέα.....	71
4.3 Επιλογή τύπου τυλίγματος, αριθμού πόλων και αριθμού αυλακών .....	73
4.4 Παραμετροποιημένη Σχεδίαση .....	76
4.5 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων ροπής και μαγνητικής επαγωγής για τη βελτιστοποίηση γεωμετρίας μαγνήτη και αύλακας στάτη .....	80
4.6 Τελική διαμόρφωση .....	84
4.7 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία .....	85
4.7.1 Ανάλυση ευαισθησία πλέγματος.....	85
4.7.2 Πεδιακή μεγέθη .....	88
4.8 Επίδοση .....	90
4.8.1 Ροπή ευθυγράμμισης .....	94

4.9 Απόδοση.....	95
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ .....</b>	<b>101</b>
5.1 Διαδικασία κατασκευής .....	101
5.2 Επίδοση στο διαγωνισμό Shell EcoMarathon.....	102
5.3 Πειραματική Επιβεβαίωση .....	103
5.4 Σύγκριση με υφιστάμενο κινητήρα .....	107
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>113</b>
6.1 Συμπεράσματα.....	113
6.2 Πρωτότυπη συνεισφορά της εργασίας .....	114
6.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.....	115
Βιβλιογραφία .....	116



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση και κατασκευή ενός ηλεκτρικού κινητήρα υψηλής απόδοσης για ηλεκτρικό όχημα, που πρόκειται να τροφοδοτηθεί μέσω αντιστροφέα από μπαταρία λιθίου. Ο κινητήρας αποτελεί της βασική συνιστώσα του συστήματος κίνησης ενός πειραματικού μονοθέσιου ηλεκτρικού οχήματος, το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της συμμετοχής στον πανευρωπαϊκό διαγωνισμό οικονομίας καυσίμου Shell EcoMarathon. Η κατασκευή του νέου κινητήρα συνδυάζεται με την τρίτη συμμετοχή της ομάδας 'Προμηθέας' στο διαγωνισμό Shell EcoMarathon, που έλαβε χώρα στο Lausitz της Γερμανίας, το Μάιο 2011.

Με βάση τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς που υπαγορεύονται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή, προέκυψαν οι προδιαγραφές του εν λόγω κινητήρα. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση και κατασκευή ενός βελτιωμένου κινητήρα, με βάση και τις εμπειρίες που έχουν αποκτηθεί κατά την ανάπτυξη του προηγούμενου κινητήρα. Κατά τη διαδικασία αυτή επιχειρήθηκαν καινοτομίες, αναπτύχθηκαν νέες μέθοδοι σχεδίασης και εξήχθησαν συμπεράσματα που μπορούν να χρησιμεύσουν γενικότερα στη σχεδίαση και βελτιστοποίηση ενός ηλεκτρικού κινητήρα, και ιδιαίτερα ενός κινητήρα μονίμων επιφανειακών μαγνητών εξωτερικού δρομέα. Για την επίτευξη των παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν παραμετροποιημένες μέθοδοι σχεδίασης γεωμετρίας, αριθμητικές μέθοδοι πεδιακής ανάλυσης και μεθοδολογίες ανάλυσης ευαισθησίας με σκοπό τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του κινητήρα. Επιπλέον από τη σύγκριση των δύο κινητήρων, τόσο σε σχεδιαστικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο, εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα.

Η επιτυχία της ομάδας HMMY του ΕΜΠ στο διαγωνισμό Shell EcoMarathon οφείλεται στη βελτίωση ολόκληρου του συστήματος κίνησης και στην εμπειρία που είχε αποκομισθεί από προηγούμενες συμμετοχές. Σε κάθε περίπτωση, μέσω της επίτευξης του συνολικού

στόχου, επιβεβαιώνεται και η επιτυχής σχεδίαση και υλοποίηση των επιμέρους υποσυστημάτων.

## **1.2 Δομή της εργασίας**

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει, αρχικά, την επιλογή του συγκεκριμένου τύπου κινητήρα για το πειραματικό ηλεκτρικό όχημα, στη συνέχεια αναπτύσσει τη διαδικασία σχεδίασης και μελέτης αυτού και εξάγει τα συμπεράσματα μετά από πειραματική επιβεβαίωση.

Πιο συγκεκριμένα, στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται τα ηλεκτρικά οχήματα και περιγράφονται οι καταλληλότεροι τύποι κινητήρων για αυτά. Εξετάζοντας τα συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους άλλους τύπους, επιλέγονται οι κινητήρες μονίμων μαγνητών.

Στο **Κεφάλαιο 3**, παρουσιάζεται η βιβλιογραφική διερεύνηση των κινητήρων μονίμων μαγνητών. Συγκρίνονται τα υλικά κατασκευής, η τοποθέτηση και η γεωμετρία των μονίμων μαγνητών, ενώ εξετάζονται και οι ειδικοί τύποι κινητήρων μονίμων μαγνητών. Επιπλέον, αναλύονται και οι θεμελιώδεις αρχές λειτουργίας αυτών.

Στο **Κεφάλαιο 4**, παρουσιάζονται οι προδιαγραφές του κινητήρα, στις οποίες βασίζεται η σχεδίαση. Έπειτα από την προκαταρκτική σχεδίαση, ακολουθεί η μελέτη του κινητήρα με τη βοήθεια προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Σε συνδυασμό με την πεδιακή ανάλυση αναπτύσσονται εργαλεία παραμετροποιημένης σχεδίασης του κινητήρα και ανάλυσης ευαισθησίας ως προς τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, με σκοπό την εύρεση της βελτιστοποιημένης τοπολογίας. Εξηγείται, επιπλέον, η επιλογή του τύπου τυλίγματος που υιοθετήθηκε, το οποίο είναι συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος και αποτελεί καινοτομία για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Παρουσιάζονται, τέλος, τα αποτελέσματα του κινητήρα από πλευράς απόδοσης και επίδοσης.

Στο **Κεφάλαιο 5**, καταγράφονται οι λεπτομερείς κατασκευαστικές προδιαγραφές του κινητήρα και παρουσιάζονται οι βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν εν όψει της κατασκευής του. Ακολουθεί στη συνέχεια αναφορά στην επίδοση του ηλεκτρικού οχήματος στο διαγωνισμό και αξιολογείται από τα αποτελέσματα η καταλληλότητα του επιλεγμένου τύπου κινητήρα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Στο Κεφάλαιο 5 περιλαμβάνεται και η πειραματική επιβεβαίωση ορισμένων χαρακτηριστικών του κινητήρα, ενώ στο τέλος συγκρίνονται ο προηγούμενος με το νέο κινητήρα, τόσο από πλευράς επίδοσης όσο και απόδοσης.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6**, συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία της σχεδίασης, της μελέτης, της κατασκευής και της πειραματικής επιβεβαίωσης του κινητήρα, ενώ αναφέρονται και τα σημεία καινοτομίας της εργασίας. Το Κεφάλαιο 6 ολοκληρώνεται με μια σειρά προτάσεων για περαιτέρω διερεύνηση του κινητήρα ως προς την επέκταση της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης που προτάθηκε και την πειραματική επιβεβαίωση της λειτουργίας του ως κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς συλλέκτη.

### **1.3 Επιστημονική συνεισφορά της εργασίας**

Η εργασία επιχειρεί την πλήρη μελέτη και πρόταση κατασκευής ενός κινητήρα μονίμων μαγνητών, κεντρικό χαρακτηριστικό του οποίου είναι η υψηλή απόδοση λειτουργίας, της τάξης του 90%. Η προτεινόμενη διαμόρφωση ξεχωρίζει λόγω της τοπολογίας του εξωτερικού δρομέα, χάριν της οποίας αποφεύγεται το κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης και οι απώλειες τις οποίες αυτό συνεπάγεται. Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το τύλιγμα του στάτη του κινητήρα, το οποίο είναι συγκεντρωμένο, διπλής στρώσης, κλασματικού βήματος και υπερέχει σε αρκετά σημεία έναντι του κατανεμημένου τυλίγματος, μονής στρώσης, πλήρους βήματος της προηγούμενης μηχανής. Σε ό,τι αφορά το στάτη της μηχανής επιλέχθηκε ορθογωνικό σχήμα δοντιού, χωρίς πεπλατυσμένα άκρα, για μεγαλύτερη ευκολία περιέλιξης. Η σχεδίαση και κατασκευή ενός τέτοιου κινητήρα αποτέλεσε κίνητρο για την ανάπτυξη επί μέρους τεχνικών ώστε να διευκολύνεται η βελτιστοποίηση της απόδοσης, καθώς παίζει σημαντικό ρόλο στις εφαρμογές των κινητήρων ηλεκτρικών οχημάτων.

Πιο συγκεκριμένα, κατά την παραπάνω εργασία, αναπτύχθηκαν οι ακόλουθες ιδιαίτερες τεχνικές:

- Η παραμετροποιημένη σχεδίαση της μηχανής χρησιμοποιώντας λογισμικό Matlab, μέσω σχέσεων που λαμβάνουν υπόψη την κατεύθυνση και την ποσότητα της μαγνητικής ροής που διέρχεται μέσα από το σώμα του στάτη και του δρομέα. Οι εν λόγω σχέσεις χρησιμοποιούν, επίσης, τις γεωμετρικές διαστάσεις του μαγνήτη (πάχος και μήκος τόξου) καθώς και τις διαστάσεις του δοντιού του στάτη. Με την παραμετροποιημένη σχεδίαση εξασφαλίζεται ότι κάθε φορά που θα αλλάζουν ορισμένες δοθείσες διαστάσεις στο πρόγραμμα σχεδίασης γεωμετρίας, ο κινητήρας θα σχεδιάζεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, τηρώντας όλες τις απαραίτητες σχεδιαστικές προδιαγραφές.

## *Κεφάλαιο 1- Εισαγωγή*

- Πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας της ροπής και της μαγνητικής επαγωγής, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του στάτη αλλά και του μαγνήτη. Κατά τη διαδικασία αυτή επιχειρείται και η ελαχιστοποίηση της ροπής ευθυγράμμισης (cogging torque), ενώ η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυξάνεται λόγω της αυτοματοποιημένης σχεδίασης.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

### 2.1 Παρουσίαση του ηλεκτρικού οχήματος

Περιβαλλοντικοί και οικονομικοί λόγοι αποτελούν κίνητρο για την ανάπτυξη και διάδοση ενός διαφορετικού τύπου αυτοκινήτου από τα ευρέως διαδεδομένα που χρησιμοποιούν κινητήρες εσωτερικής καύσης. Οι εκπομπές αέριων ρύπων από τα βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα οχήματα ευθύνονται κατά ένα μεγάλο μέρος για την ρύπανση της ατμόσφαιρας και το φαινόμενο του θερμοκηπίου που οδηγεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι η εξάρτηση από το πετρέλαιο η οποία έχει σημαντικές οικονομικές και πολιτικές συνέπειες, αυξανόμενες καθώς τα αποθέματα πετρελαίου εξαντλούνται.

Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο προσφέρει έναν εναλλακτικό και περιβαλλοντικά φιλικό τρόπο μετακίνησης. Η υψηλή απόδοση του ηλεκτρικού συστήματος κίνησης, και η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προσφέρουν λύσεις στον περιβαλλοντικό και οικονομικό προβληματισμό του αναφέρθηκε.

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα κυκλοφόρησαν στο δρόμο ήδη από τα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα, ακόμα και πριν από την χρήση οχημάτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης[3]. Εντούτοις, ορισμένοι περιορισμοί στη χρήση και δυσκολίες στην παραγωγή τους, σε συνδυασμό με τη ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη των κινητήρων εσωτερικής καύσης οδήγησαν στην εξαφάνισή τους από το προσκήνιο στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Το ενδιαφέρον για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο επανεμφανίσθηκε στη δεκαετία του '60, όταν διαπιστώθηκαν οι συνέπειες της ευρείας διάδοσης των αυτοκινήτων εσωτερικής καύσης. Αν και η ηλεκτρική κίνηση έχει χρησιμοποιηθεί έκτοτε εκτενώς στα μέσα μαζικής μεταφοράς, η εξέλιξη δεν ήταν η ίδια για τα οχήματα ιδιωτικής χρήσης.

Ως βασικός τεχνολογικός παράγοντας που αποτελεί διαχρονικά εμπόδιο στη διάδοση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι η μικρή εμβέλεια κίνησης και η δυσκολία αποθήκευσης αρκετής ενέργειας σε συσσωρευτές αποδεκτού κόστους. Οι εξελίξεις των τελευταίων ετών στην τεχνολογία των συσσωρευτών είναι σημαντικές και η έρευνα συνεχίζεται ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα των μέσων αποθήκευσης ενέργειας, με ταυτόχρονη μείωση του

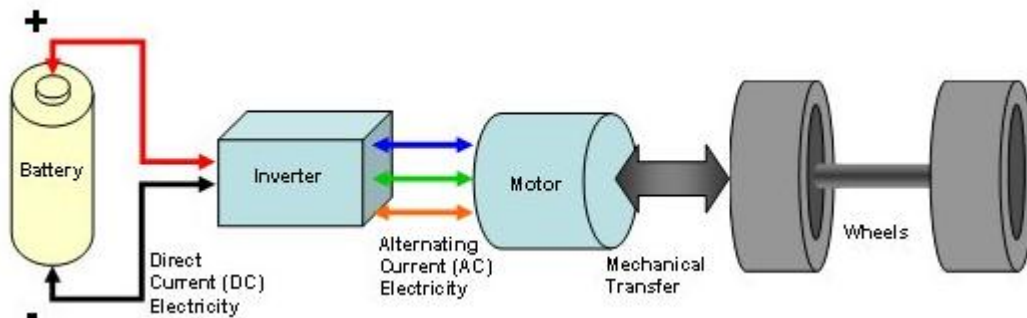
βάρους και του κόστους τους. Συνεπώς, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση της παραγωγής και κυκλοφορίας ηλεκτρικών αυτοκινήτων.[1],[2]

## 2.2 Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος

Οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται τα ηλεκτρικά οχήματα είναι δύο: τα πλήρως ηλεκτρικά και τα υβριδικά οχήματα.

### Ηλεκτρικό όχημα (EV)

Τα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι ότι η πρόωση παρέχεται αποκλειστικά από έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες και ότι η πηγή ενέργειας είναι φορητή, χημικής ή ηλεκτρομηχανικής φύσης.[3]



Σχήμα 2. 1 Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος

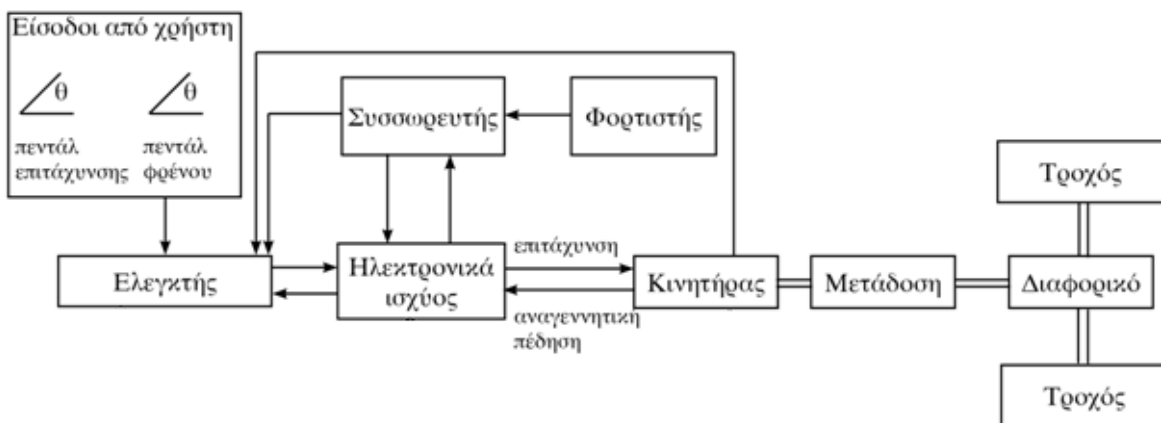
Το Σχήμα 2.1 απεικονίζει το σύστημα κίνησης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου το οποίο τροφοδοτείται από φορητή πηγή ενέργειας. Ο ηλεκτρικός και μηχανικός εξοπλισμός που μετατρέπει την ενέργεια της πηγής σε κινητική ενέργεια στον τροχό ονομάζεται σύστημα πρόωσης.

Τα υποσυστήματα του συστήματος κίνησης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι ο κινητήρας, ο ελεγκτής και το σύστημα οδήγησης (μετατροπέας), η πηγή ενέργειας και η μετάδοση. Η αναλυτική δομή και η αλληλεπίδραση των συνιστωσών ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 2.2.

Η παραδοσιακή πηγή ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, με βασικό τύπο αυτό των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος που προτιμήθηκε λόγω του χαμηλού κόστους και της ανεπτυγμένης τεχνολογίας. Η ανάγκη για βελτιωμένα χαρακτηριστικά οδήγησε στην ανάπτυξη εναλλακτικών ειδών συσσωρευτών , με

υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας και δυνατότητα παροχής μεγαλύτερης ισχύος, όπως επίσης με μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης - εκφόρτισης. Αναφέρονται ως παράδειγμα, οι συσσωρευτές νικελίου - καδμίου (NiCd), νικελίου μετάλλου - υδριδίου (NiMH) , ιόντων λιθίου (LiION) , λιθίου - ιόντων πολυμερών και οι εξελιγμένοι συσσωρευτές μολύβδου - οξέως.

Οι συσσωρευτές απαιτούν φόρτιση ώστε να ανακτήσουν το επίπεδο ενέργειας που είχαν πριν αυτή εξαντληθεί λόγω παροχής ισχύος στο φορτίο τους. Το γεγονός αυτό προσδίδει περιορισμένη αυτονομία κίνησης στο όχημα μεταξύ φορτίσεων, οι οποίες έχουν διάρκεια λίγων ωρών. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα αναπτύσσονται εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως οι κυψέλες καυσίμου, οι οποίες είναι ένα ανοικτό θερμοδυναμικό σύστημα του οποίου τα αντιδρώντα εισάγονται εξωτερικά, σε αντίθεση με τους συσσωρευτές. Έχουν ήδη αναπτυχθεί και κατασκευαστεί οχήματα που τροφοδοτούνται από κυψέλη καυσίμου και αναμένεται να επεκταθεί η χρήση τους στο μέλλον.[2]



Σχήμα 2. 2 Συστατικά μέρη συστήματος κίνησης

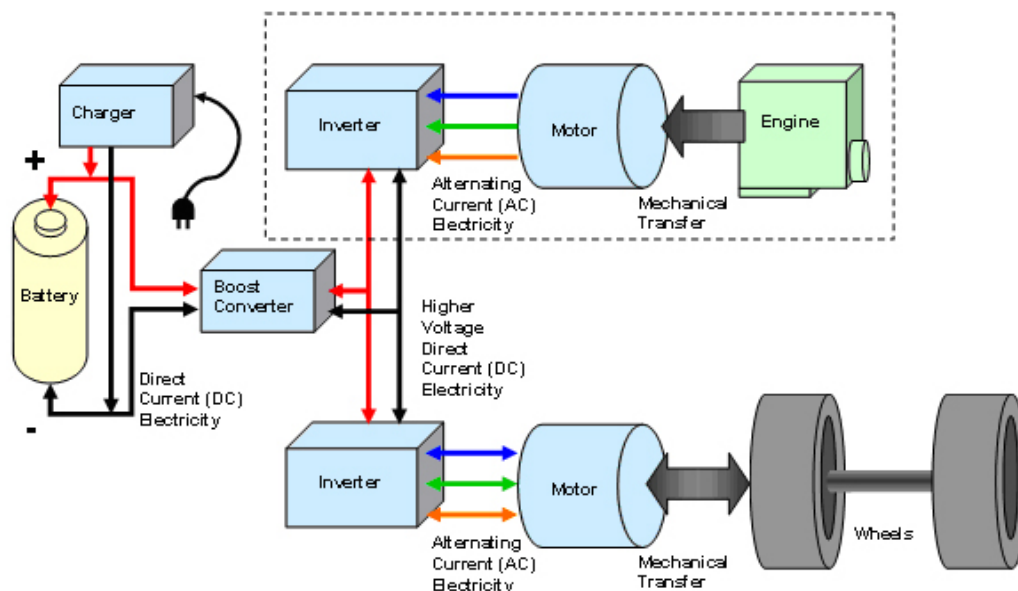
Ο κινητήρας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι σημαντικό υποσύστημα του συστήματος κίνησης και απαιτείται να πληρεί προδιαγραφές μεγέθους, βάρους, κόστους, ακουστικού θορύβου, θερμοκρασιακής και μηχανικής αντοχής. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως σε ηλεκτρικά οχήματα είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC), ασύγχρονοι κινητήρες και κινητήρες μονίμων μαγνητών. Σε κάθε περίπτωση η σχεδίαση είναι μια σύνθετη διαδικασία λόγω της αλληλεξάρτησης παραμέτρων οι οποίες καθορίζουν την επίδοση, την απόδοση και το κόστος του κινητήρα και κατά συνέπεια του οχήματος.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας οδηγείται από μια μονάδα ηλεκτρονικών ισχύος ελεγχόμενων από μικροεπεξεργαστή ή ψηφιακό επεξεργαστή σήματος. Ο ρόλος αυτής της μονάδας είναι η

μετατροπή της συνεχούς τάσης της πηγής ενέργειας σε μεταβαλλόμενη τάση επιθυμητής συχνότητας αναλόγως του σημείου λειτουργίας του οχήματος. Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος είναι μια σημαντική παράμετρος στην εξέλιξη συστημάτων κίνησης υψηλής επίδοσης. Τα ηλεκτρονικά ισχύος και το κύκλωμα ελέγχου τείνουν να γίνονται ταχύτερα, αποδοτικότερα και μικρότερα σε μέγεθος. Η ψηφιακή επεξεργασία σήματος επιτρέπει την εφαρμογή σύνθετων αλγορίθμων ελέγχου με μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα.

### Υβριδικό όχημα

Σε αντίθεση με το ηλεκτρικό αυτοκίνητο, το υβριδικό ηλεκτρικό διαθέτει τουλάχιστον μια πηγή ενέργειας ή ένα μετατροπέα που μπορεί να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3 . Ανάλογα με τη λειτουργική κατάσταση, η πρόωση παρέχεται από δύο ή περισσότερα είδη πηγών ενέργειας, μετατροπέων ή κινητήρων. Το ηλεκτρικό υβριδικό αυτοκίνητο αποτελεί ουσιαστικά ένα συμβιβασμό ανάμεσα στα οφέλη του ηλεκτρικού αυτοκινήτου και στην αυξημένη εμβέλεια κίνησης που παρέχει το σύστημα κίνησης με κινητήρα εσωτερικής καύσης, ενώ θεωρείται ως βραχυχρόνια λύση μέχρι να λυθούν τα τεχνικοοικονομικά ζητήματα που δεν επιτρέπουν την μαζική παραγωγή και κυκλοφορία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.



Σχήμα 2. 3 Σύστημα κίνησης υβριδικού οχήματος

Τα σύγχρονα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν τεχνολογίες που αυξάνουν την απόδοση, όπως είναι η αναγεννητική πέδηση, μέσω της οποίας η κινητική ενέργεια του

οχήματος μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια για το συσσωρευτή. Μερικά υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν τον κινητήρα εσωτερικής καύσης που διαθέτουν ως γεννήτρια, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρισμού είτε για την επαναφόρτιση των συσσωρευτών, είτε για την απευθείας τροφοδοσία του ηλεκτρικού κινητήρα. Επίσης, ανάλογα με το αν η σύνδεση των κινητηρίων υποσυστημάτων μεταξύ τους είναι σε σειρά, παράλληλα, ή συνδυασμό των δύο, τα υβριδικά οχήματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες. Στη σύνδεση σε σειρά, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κίνηση μιας ηλεκτρικής γεννήτριας και τη φόρτιση του συσσωρευτή. Ο ηλεκτρικός κινητήρας που τροφοδοτείται από το συσσωρευτή αυτό αποτελεί το μόνο κινητήρα που δίνει κίνηση στο σύστημα μετάδοσης. Στην παράλληλη σύνδεση υπάρχουν δύο είδη κινητήρων που παρέχουν πρόωση, ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης και ένας ηλεκτρικός κινητήρας. Αυτή η σύνδεση παρουσιάζεται στο *Σχήμα 2.3*. Η ισχύς των δύο κινητήρων συνδυάζεται κατάλληλα ώστε να ικανοποιηθεί η απαίτηση ισχύος του οχήματος με μικρή κατανάλωση καυσίμου.



Εικόνα 1 Το ηλεκτρικό όχημα 'Πυρφόρος' της ομάδας 'Προμηθέας'

### 2.3 Συγκριτική παρουσίαση κινητήρων για ηλεκτρικά οχήματα

Οι γενικές προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιούνται από τους κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα είναι υψηλή ροπή σε μικρές ταχύτητες, ευρεία περιοχή ταχυτήτων λειτουργίας υπό σταθερή ισχύ, υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλή απόδοση, μικρό βάρος, χαμηλό κόστος, αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής με την ελάχιστη δυνατή ανάγκη για συντήρηση. Αφού πληρούνται αυτές οι προϋποθέσεις, επιλέγεται ο τύπος κινητήρα που είναι καταλληλότερος για την εκάστοτε εφαρμογή.

Ένας τύπος κινητήρα που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ηλεκτροκίνητα οχήματα είναι ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος. Η τεχνολογική ωριμότητα και ο απλός έλεγχός τους υπερσχύουν σε κάποιες εφαρμογές έναντι της απαίτησης για συντήρηση και αντικατάσταση των ψηκτρών. Ωστόσο η αξιοπιστία των κινητήρων στα ηλεκτρικά οχήματα καθώς και η ανάγκη για εξάλειψη της ανάγκης για συντήρηση είναι πρωτεύουσας σημασίας. Τεχνολογικές εξελίξεις έχουν θέσει τους κινητήρες χωρίς σύστημα συλλέκτη και ψήκτρους στο προσκήνιο, επειδή έχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.

Ο κινητήρας επαγωγής είναι ένας τύπος κινητήρα με ευρεία εφαρμογή στα ηλεκτροκίνητα οχήματα, με κύριες αιτίες το μικρό κόστος, τον εύκολο έλεγχο και την υψηλή αξιοπιστία. Για την οδήγησή τους χρησιμοποιείται διάταξη αντιστροφέα με δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας για έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής.

Μια ακόμα εναλλακτική λύση που αναπτύσσεται όλο και περισσότερο είναι ο σύγχρονος κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα. Με την αντικατάσταση του τυλίγματος πεδίου από μόνιμους μαγνήτες επιτυγχάνεται μείωση των απωλειών χαλκού και η έλλειψη ψηκτρών αυξάνει την αξιοπιστία. Οι κινητήρες αυτοί τροφοδοτούνται από ημιτονοειδή τάση, έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής, χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα ισχύος και υψηλή απόδοση.

Ένας άλλος τύπος μηχανής είναι οι σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης οι οποίοι δε διαθέτουν ούτε τύλιγμα διέγερσης ούτε μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, αλλά εκμεταλλεύονται αποκλειστικά τη ροπή εκτυπότητας. Αυτός ο τύπος μηχανής έχει το πλεονέκτημα της απλότητας κατασκευής και του μικρού κόστους, δεν έχει όμως την ικανότητα παροχής μεγάλης ισχύος εξόδου.

Επιπρόσθετα από τα παραπάνω είδη μηχανής, υπάρχει ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς συλλέκτη και ψήκτρες (Brushless DC). Οι κινητήρες αυτοί παρουσιάζουν επίσης υψηλό βαθμό απόδοσης και μεγάλη πυκνότητα ισχύος, ενώ δύνανται να παρέχουν υψηλές τιμές ροπής λόγω της ορθογώνιας μορφής της μαγνητικής ροής και του ρεύματος. Ένα μειονέκτημά τους είναι ότι απαιτείται ακριβής γνώση της θέσης του δρομέα για την οδήγησή τους, η οποία επιτυγχάνεται με αισθητήρες ή με τεχνικές υπολογισμού της θέσης του δρομέα από μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών. [2],[3]

Για την αξιολόγηση της καταλληλότητας των βασικών κατηγοριών κινητήρων που παρουσιάστηκαν παραπάνω χρησιμοποιείται ένα σύστημα βαθμολόγησης [2]. Αξιολογούνται έξι βασικά χαρακτηριστικά των κινητήρων και η κλίμακα εκτείνεται από το ένα ως το πέντε. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, οι κινητήρες επαγωγής προσφέρονται για χρήση σε τέτοιου είδους οχήματα. Οι κινητήρες μονίμων μαγνητών επίσης ενδείκνυνται για τέτοιες εφαρμογές, καθώς εμφανίζουν υψηλή απόδοση και αποκτούν μεγαλύτερη οικονομοτεχνική βιωσιμότητα καθώς το κόστος των μονίμων μαγνητών μειώνεται. Μια σημαντική ανακάλυψη που επέφερε τη μείωση του κόστους των μονίμων μαγνητών είναι αυτή του κράματος Νεοδυμίου – Σιδήρου- Βορίου το 1982, η οποία έδωσε στην αγορά φθηνότερους μαγνήτες ενώ παράλληλα οι μαγνήτες Νεοδυμίου είναι μέχρι σήμερα οι πιο ισχυροί που κυκλοφορούν .

	Κινητήρας DC	Κινητήρας επαγωγής	Κινητήρας μονίμων μαγνητών	Κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης
Πυκνότητα Ισχύος	2.5	3.5	5	3.5
Απόδοση	2.5	3.5	5	3.5
Έλεγχος	5	4	4	3
Αξιοπιστία	3	5	4	5
Τεχνολογική ωριμότητα	5	5	4	4
Κόστος	4	5	3	4

Πίνακας 2. 1 Αξιολόγηση κινητήρων ηλεκτρικών οχημάτων





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

#### 3.1 Κατασκευαστικά υλικά ηλεκτρικών μηχανών

##### *Σιδηρομαγνητικά υλικά*

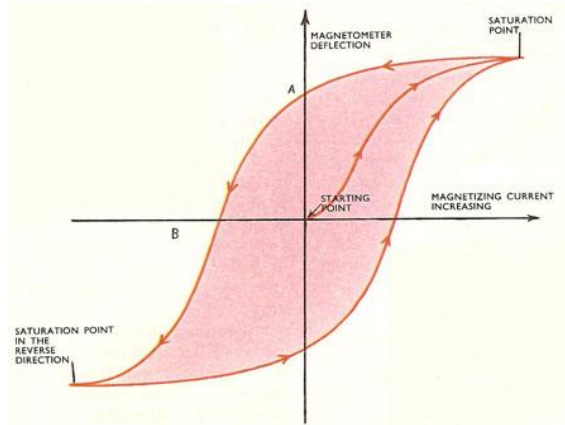
Ο πυρήνας του στάτη ή του δρομέα κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικό υλικό, ώστε να μεταφέρεται η μαγνητική ροή στα κατάλληλα σημεία της μηχανής. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν ιδιότητες οι οποίες είναι χρήσιμες αλλά και προβληματικές. Για το λόγο αυτό, οι κατασκευαστές ηλεκτρικών μηχανών πρέπει να μελετήσουν τις ιδιότητες και τα προβλήματα που παρουσιάζονται και να επιλέξουν τον κατάλληλο τύπο υλικού. Γενικά, η μεταβλητότητα της μαγνητικής ροής στον πυρήνα, σε συνδυασμό με το κόστος των επιμέρους υλικών καθορίζουν την επιλογή χρήσης λαμαρίνας ή συμπαγούς σιδήρου.

Οι επιθυμητές μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του πυρήνα είναι οι ακόλουθες:

- Υψηλή μαγνητική επιδεκτικότητα και διαπερατότητα με σκοπό τη χαμηλή μαγνητική αντίδραση του μαγνητικού κυκλώματος.
- Υψηλή μαγνητική επαγωγή κορεσμού, ώστε να διέρχεται περισσότερη μαγνητική ροή ανά μονάδα όγκου και να ελαχιστοποιείται ο όγκος και το βάρος της μηχανής.
- Μικρό εμβαδό βρόχου υστέρησης και μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Με αυτόν τον τρόπο είναι μειωμένες οι ειδικές απώλειες και άρα επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση και μικρή θερμοκρασιακή αύξηση κατά τη λειτουργία. Επίσης, μειώνονται οι απαιτήσεις απαγωγής θερμότητας και η μέθοδος ψύξης γίνεται απλούστερη και λιγότερο δαπανηρή. Συνεπώς, η επιλογή υλικών χαμηλών απωλειών μειώνει το λειτουργικό κόστος της ηλεκτρικής μηχανής.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά κατηγοριοποιούνται σε μαλακά και σκληρά. Στα μαλακά μαγνητικά υλικά η κανονική καμπύλη μαγνήτισης εμφανίζει μεγάλη κλίση, ενώ ο βρόχος υστέρησης έχει μικρό εμβαδόν. Εξαιτίας αυτού, οι απώλειες υστέρησης είναι μειωμένες. Επιπλέον, τα υλικά αυτά εμφανίζουν μικρή τιμή παραμένουστος μαγνητισμού και πολύ μεγάλη σχετική διαπερατότητα. Μερικά παραδείγματα μαλακών σιδηρομαγνητικών υλικών είναι ο μαλακός σίδηρος, ο πυριτιούχος χάλυβας, τα κράματα σιδήρου-νικελίου τύπου Perm alloy, και άλλα. Χρησιμοποιούνται σε διατάξεις όπως μετασχηματιστές ισχύος, ηλεκτρικές γεννήτριες και κινητήρες, που υπόκεινται στην επίδραση χρονικά εναλλασσόμενων μαγνητικών πεδίων. Από την άλλη, στην περίπτωση των σκληρών σιδηρομαγνητικών υλικών, η κανονική καμπύλη μαγνήτισης δεν εμφανίζει τόσο μεγάλη κλίση όσο των μαλακών υλικών, ενώ το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης είναι μεγάλο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλες απώλειες υστέρησης. Επιπλέον, εμφανίζουν μεγάλη τιμή παραμένουστος μαγνητισμού και χαμηλή σχετική διαπερατότητα. Ο βρόχος υστέρησης φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

Στα σκληρά μαγνητικά υλικά η κανονική καμπύλη μαγνήτισης δεν ανεβαίνει απότομα ενώ το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης είναι μεγάλο, είναι επομένως προφανές ότι οι απώλειες υστέρησης στα υλικά αυτά είναι επίσης μεγάλες. Εμφανίζουν μεγάλο παραμένουστος μαγνητισμό και χαμηλή σχετική διαπερατότητα. Ένα τυπικό σκληρό μαγνητικό υλικό είναι το κράμα Alnico. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα για την κατασκευή μονίμων μαγνητών, στους οποίους επιδιώκεται να έχουν μεγάλες τιμές τόσο για την παραμένουστος μαγνήτιση  $B_r$  όσο και για το πεδίο επαναφοράς  $H_c$ , ώστε να μην είναι εύκολη η απομαγνήτισή τους. Περισσότερα για του μόνιμους μαγνήτες θα αναφερθούν στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.



Σχήμα 3. 1 Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού

Σε ό,τι αφορά το συμπαγή σίδηρο, η προσθήκη μικρής ποσότητας πυριτίου βελτιώνει πολλές από τις ιδιότητές του. Συγκεκριμένα, η ηλεκτρική του αντίσταση αυξάνεται, η μαγνητική αντίσταση μειώνεται αισθητά και βελτιώνεται η σταθερότητα των μαγνητικών χαρακτηριστικών στο χρόνο. Η αύξηση της περιεκτικότητας πυριτίου περιορίζεται από το γεγονός ότι ο σίδηρος γίνεται εύθραυστος και υποβαθμίζεται η αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις. Επιπλέον, σημειώνεται μικρή μείωση στην επαγωγή κόρου. Η παρασκευή κράματος σιδήρου-πυριτίου απαιτεί θερμικές και μηχανικές διεργασίες, με συνέπεια το βελτιωμένο υλικό να έχει αυξημένο κόστος.

Η λαμαρίνα (ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού) χρησιμοποιείται όταν υπάρχει εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί δινορρεύματα. Η χρήση της περιορίζει τα επαγόμενα δινορρεύματα διότι μειώνεται η αγώγιμη διαδρομή του ρεύματος. Για αυτό το σκοπό η μία ή και οι δύο επιφάνειες του ελάσματος είναι καλυμμένες με μονωτικό υλικό και ο προσανατολισμός τους είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Η μονωτική επίστρωση προστατεύει επίσης το σίδηρο από την οξείδωση.

Σε ό,τι αφορά τα ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού, υπάρχουν αυτά με κατευθυνόμενους κόκκους ή χωρίς. Τα ελάσματα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους είναι ιστροπικά και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις ηλεκτρικές μηχανές. Τυπικές τιμές ειδικών απωλειών σε μαγνητική επαγωγή 1.5 T και συχνότητα πεδίου 50 Hz, είναι 3 W/Kg και 4 W/Kg για ελάσματα πάχους 0.35 mm και 0.5 mm αντίστοιχα. Αντιθέτως, τα ελάσματα με κατευθυνόμενους κόκκους παρουσιάζουν μία κατεύθυνση στην οποία οι μαγνητικές ιδιότητες είναι βελτιωμένες και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών και όταν απαντώνται υψηλές συχνότητες. Τυπικές τιμές απωλειών σε αυτή την περίπτωση είναι 1 W/Kg σε 1.5 T, 50 Hz, για έλασμα πάχους 0.35 mm.

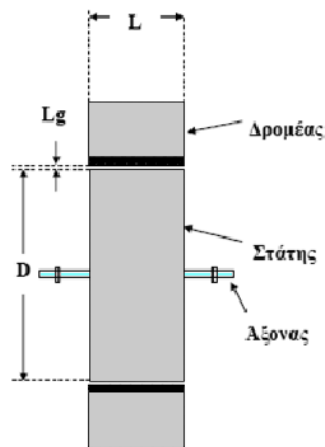
Για ειδικές εφαρμογές και υψηλές συχνότητες υπάρχουν και ελάσματα από κράμα Σιδήρου - Κοβαλτίου με την ονομασία "Permendur". Αυτά παρουσιάζουν υψηλή μαγνητική επιτρεπτότητα και πολύ υψηλό σημείο κορεσμού. Χρησιμοποιούνται επίσης κράματα Σιδήρου - Νικελίου, "permalloy", τα οποία εμφανίζουν πολύ υψηλή επιτρεπτότητα και μικρή τιμή πεδίου επαναφοράς, ενώ η μαγνητική επαγωγή κορεσμού τους είναι πολύ χαμηλή [8].

### 3.2 Θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης

Στο πλαίσιο της προκαταρκτικής σχεδίασης λαμβάνονται υπόψη τα βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης και πραγματοποιούνται τα ακόλουθα βήματα:[15]

- Προσδιορισμός της επιφάνειας του διακένου ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική ροπή σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας.
- Προσδιορισμός των διαμορφώσεων του δρομέα και του στάτη, που επιτρέπουν τη δημιουργία κατάλληλου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο.
- Έλεγχος των μαγνητικών και ηλεκτρικών ειδικών φορτίσεων.
- Εύρεση απωλειών σιδήρου και χαλκού και απαιτήσεων σε ψύξη.

Τα παραπάνω βήματα γίνονται με βάση ορισμένες τυπικές τιμές βασικών μαγνητικών, ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών. Παρακάτω παρουσιάζονται αυτά τα μεγέθη και οι βασικές σχέσεις υπολογισμού τους στην περίπτωση του τριφασικού κινητήρα, ενώ στο Σχήμα 3.2 σημειώνονται οι βασικές διαστάσεις της γεωμετρίας ενός κινητήρα τροχού.



Σχήμα 3. 2 Διαστάσεις διακένου μηχανής εξωτερικού δρομέα

#### 3.2.1 Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης

##### Ειδική μαγνητική φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση,  $\bar{B}$ , συνδέει τον αριθμό πόλων P με τη μαγνητική ροή ανά πόλο  $\Phi$  και είναι:

$$\bar{B} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (3.1)$$

$D$  Διάμετρος διακένου

$L$  Αξονικό μήκος ενεργού μέρους μηχανής

Το μέγεθος αυτό λαμβάνει συνήθως τιμές από 0.5 T ως 0.6 T και το άνω όριο τίθεται από το φαινόμενο του κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού στα δόντια του στάτη. Η υψηλή μαγνητική φόρτιση σημαίνει αυξημένη δυνατότητα παραγωγής ροπής και ισχύος. Το αντίτιμο είναι αυξημένες απώλειες πυρήνα, ειδικά όταν τα δόντια του στάτη βρίσκονται σε κορεσμό.

### **Ειδική ηλεκτρική φόρτιση**

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση,  $ac$ , προσδιορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας του διακένου, σύμφωνα με τη Σχέση 3.2 :

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_s \cdot I}{\pi \cdot D} \quad (3.2)$$

Τυπικές τιμές ηλεκτρικής φόρτισης σύγχρονων μηχανών είναι από 15000 AE/m ως 45000 AE/m. Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση καθορίζει από κοινού με την ειδική μαγνητική φόρτιση την ικανότητα παραγωγής ροπής μιας δεδομένης μηχανής. Η ηλεκτρική φόρτιση συνδέεται με τις απώλειες χαλκού της μηχανής.

Τα δύο παραπάνω μεγέθη συνδέονται με τη λεγόμενη σχέση εξόδου της ηλεκτρικής μηχανής, η οποία δίνει μια εκτίμηση της ροπής ή της ισχύος εξόδου. Για την εύρεση αυτής της σχέσης λαμβάνεται υπ' όψιν ότι:

- Η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης,  $e$ , δίνεται από τη σχέση:

$$e = 4.44 \cdot k_w \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi \quad (3.3)$$

$k_w$  συντελεστής τυλίγματος

$f$  ηλεκτρική συχνότητα,

$N_s$  συνολικός αριθμός ελιγμάτων ανά φάση και

$\Phi$  θεμελιώδης μαγνητική ροή ανά πόλο.

- Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται από τη σχέση:

$$S = 3 \cdot e \cdot I \quad (3.4)$$

$I$  το φασικό ρεύμα

- Η ηλεκτρική συχνότητα  $f$  συνδέεται με τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής,  $n$ , με τη σχέση:

$$n = \frac{2 \cdot f}{P} \quad (3.5)$$

Ο συνδυασμός των παραπάνω σχέσεων δίνει την εξίσωση εξόδου της ηλεκτρικής σύγχρονης μηχανής:

$$S = 1.11 \cdot k_w \cdot \pi^2 \cdot \bar{B} \cdot ac \cdot D^2 \cdot L \cdot n \quad (3.6)$$

Όπως φαίνεται από τη Σχέση 3.6, η ισχύς εξόδου της μηχανής είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου του διακένου και ανάλογη του αξονικού μήκους του ενεργού μέρους του πυρήνα. Έτσι λοιπόν, κατά τη σχεδίαση ενός κινητήρα ή μιας γεννήτριας πρέπει να προσδιοριστεί ο πιο συμφέρων συνδυασμός ειδικής ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης, διαστάσεων διακένου και ταχύτητας περιστροφής ώστε να ληφθεί η επιθυμητή ισχύς στην έξοδο χωρίς να θυσιαστούν άλλα χαρακτηριστικά της μηχανής, όπως για παράδειγμα η απόδοση, το κόστος κατασκευής και το συνολικό βάρος.

Το μέγεθος μιας μηχανής και η τιμή της ονομαστικής της ισχύος είναι παράγοντες καθοριστικής σημασίας για την απόδοση. Μια εκτίμηση παρέχεται με τον υπολογισμό της μεταβολής της ισχύος εξόδου και των απωλειών όταν οι διαστάσεις μιας μηχανής μεγεθύνονται κατά τον ίδιο λόγο, έστω  $x$ . Όπως αποδεικνύεται, για δεδομένη θερμοκρασιακή αύξηση η ισχύς εξόδου αυξάνεται με συντελεστή  $x^{3.5}$  ενώ οι απώλειες

αυξάνονται με συντελεστή  $x^2$  [8]. Αμελώντας τις μηχανικές απώλειες, η απόδοση,  $n$ , υπολογίζεται ως εξής:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \propto \frac{x^{3.5}}{x^{3.5} + K \cdot x^2} \propto \frac{1}{1 + \frac{K}{x^{1.5}}} \quad (3.7)$$

Η Σχέση 3.7 δείχνει ότι η απόδοση αυξάνει με αύξηση στις γραμμικές διαστάσεις. Αυτό δικαιολογεί εν μέρει γιατί κινητήρες με ισχύ μικρότερη του ενός kW έχουν απόδοση της τάξης του 60%, ενώ γεννήτριες μεγάλης ισχύος έχουν απόδοση πάνω από 97%.

### **Οριακή τάση διακένου**

Αποτελεί βασικό μέγεθος της μηχανικής αντοχής της μηχανής και δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή των 10 tn/cm<sup>2</sup>. Το μέγεθος αυτό ορίζεται ως η φυγόκεντρος δύναμη του δρομέα ανά μονάδα επιφανείας.

Η φυγόκεντρος δύναμη δίνεται από τη Σχέση 3.8:

$$F = m \cdot \omega_{rm} \cdot R \quad (3.8)$$

Όπου  $m$  η μάζα του δρομέα,  $\omega_{rm}$  η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του και  $R$  η ακτίνα του. Έτσι:

$$\text{οριακή τάση διακένου} = \frac{m \cdot \omega_{rm}}{2 \cdot \pi \cdot L} \quad (3.9)$$

### **Πυκνότητα ρεύματος του τυλίγματος**

Αποτελεί βασικό ηλεκτρικό μέγεθος της μηχανής και σχετίζεται με τη θερμική της ισορροπία καθώς προσδιορίζει το μέγεθος των ωμικών απωλειών στο τύλιγμα της μηχανής. Στη συνήθη περίπτωση οι θερμικές απώλειες ισχύος στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας είναι κατά πρώτο λόγο απώλειες χαλκού και κατά δεύτερο λόγο απώλειες σιδήρου. Οι θερμικές απώλειες προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας της μηχανής η οποία, μπορεί να επιφέρει καταστροφή των υλικών που την αποτελούν αν

ξεπεραστούν τα όρια θερμικής αντοχής τους. Επίσης, μπορεί να προκληθεί υποβιβασμός της μονωτικής ικανότητας των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται.

Ένα εμπειρικό όριο πυκνότητας ρεύματος είναι τα  $4 \text{ A/mm}^2$ , πάνω από το οποίο υπάρχει ανάγκη για εξαναγκασμένη ψύξη ώστε να αυξηθεί η ικανότητα παροχής ισχύος της ηλεκτρικής μηχανής. Η εξαναγκασμένη ψύξη υλοποιείται με τεχνητό αερισμό ή και με κλειστό σύστημα κυκλοφορίας ψυκτικού υγρού σε περίπτωση μηχανών μεγάλης ισχύος.

### 3.2.2 Βήματα της προκαταρκτικής σχεδίασης

#### Προσδιορισμός της επιφάνειας διακένου

Ο προσδιορισμός της ελάχιστης επιφάνειας του διακένου γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν την μέγιστη επιθυμητή ροπή διακένου. Θεωρείται ότι για την παραγωγή της μέγιστης ροπής η ηλεκτρική γωνία των πεδίων στάτη και δρομέα είναι 90 ηλεκτρικές μοίρες. Αρχικά υπολογίζεται η εφαπτομενική πίεση διακένου ως εξής:

$$P_t = \frac{\int_C \overline{B_n} \cdot \overline{B_t} dl}{\pi \cdot D \cdot \mu_0} \quad (3.10)$$

, όπου  $B_n$  και  $B_t$  η ακτινική και εφαπτομενική μαγνητική επαγωγή διακένου αντίστοιχα και το ολοκλήρωμα εκτείνεται κατά μήκος του μέσου του διακένου.

Αφού υπολογιστεί η εφαπτομενική πίεση, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση για την εύρεση του γινομένου  $D^2L$ :

$$T_{el,max} = \frac{\pi \cdot P_t \cdot D^2 \cdot L}{2} \quad (3.11)$$

#### Αναλογία διαστάσεων $D$ και $L$

Η διαστασιολόγηση του διακένου της ηλεκτρικής μηχανής εμπλέκει θέματα επίδοσης, απόδοσης και μηχανικής αντοχής. Όσο αφορά την επίδοση, η Σχέση 3.6 υποδεικνύει ότι είναι προτιμητέες δισκοειδείς μηχανές καθώς η ισχύς της μηχανής αυξάνεται με το τετράγωνο της διαμέτρου του διακένου. Από την άλλη, η απόδοση της μηχανής δεν αυξάνεται κατ' ανάγκη όταν η αναλογία  $D/L$  είναι αυξημένη. Ο λόγος είναι ότι σε περίπτωση μεγάλης διαμέτρου διακένου σε σχέση με το μήκος της μηχανής, αυξάνεται το



ποσοστό του τυλίγματος που βρίσκεται έξω από την ενεργή περιοχή του πυρήνα και κατά συνέπεια οι θερμικές απώλειες. Επίσης, μια μηχανή με πολύ μακρύ διάκενο έχει μεγάλη μάζα πυρήνα και αναμένεται να εμφανίζει αυξημένες απώλειες πυρήνα , επομένως δεν επιτυγχάνει τη βέλτιστη απόδοση.

Η μηχανική αντοχή του δρομέα και η διαστασιολόγηση του διακένου εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Σε μικρές ταχύτητες περιστροφής προτιμάται μεγάλος λόγος D/L. Σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής , η οριακή τάση διακένου περιορίζει το δρομέα σε μικρή ακτίνα και πλέον η επιθυμητή ισχύς λαμβάνεται με αύξηση του αξονικού μήκους της μηχανής. Και σε αυτή την περίπτωση, όμως, υπάρχει μηχανικό όριο στην μείωση του λόγου D/L , το οποίο συνίσταται στην ακαμψία του σώματος του δρομέα και τη διατήρηση του διακένου.

Στη βιβλιογραφία προσδιορίζονται ορισμένες αναλογίες που πρέπει να έχει μια μηχανή ώστε να χαρακτηρίζεται από υψηλή επίδοση, απόδοση ή ένα ισορροπημένο συνδυασμό των δύο [8]. Συνήθως γίνεται λόγος για το λόγο του αξονικού μήκους της μηχανής, L και του μήκους ενός πόλου, τ. Το μήκος πόλου δίνεται από τη σχέση :

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{P} \quad (3.12)$$

Στον Πίνακα 3.1 παρατίθενται οι περιοχές τιμών του λόγου L/τ , η κάθε μια από τις οποίες παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά.

L/τ	Χαρακτηριστικό ηλεκτρικής μηχανής
1.0	Ισορροπημένη σχεδίαση
1.0 - 1.5	Υψηλός συντελεστής ισχύος
1.5	Υψηλή απόδοση
1.5 - 2.0	Ελάχιστο κόστος

Πίνακας 3. 1 Περιοχές τιμών λόγου L/τ

Ωστόσο, σε διπολικές μηχανές και σε κινητήρες ισχύος μικρότερης του ενός kW μπορεί να παρατηρηθούν τιμές του λόγου L/τ μέχρι και 0.6. Ο λόγος είναι ότι σε αυτές τις μηχανές , οι μεγάλες τιμές L/τ δίνουν μικρή διάμετρο με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αρκετός χώρος για τις αύλακες του στάτη.

### **Πάχος διακένου**

Αν και αναφέρεται τελευταίο, το πάχος του διακένου είναι πρωτεύουσας σημασίας για την επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών λειτουργίας μιας ηλεκτρικής μηχανής. Γενική αρχή είναι ότι το διάκενο πρέπει να έχει το μικρότερο δυνατό πάχος, το οποίο καθορίζεται από την ακρίβεια κατασκευής και την δυνατότητα μηχανικής στήριξης δρομέα και στάτη.

### **3.3 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία**

Η προκαταρκτική σχεδίαση ενός κινητήρα παρέχει μια βασική άποψη της απαιτούμενης διαμόρφωσης του σχεδιαζόμενου κινητήρα. Συμπληρωματικά, η πεδιακή ανάλυση μπορεί να δώσει λεπτομερή ανάλυση του μαγνητικού πεδίου και να οδηγήσει στην επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών του κινητήρα που αναμένονται από την προκαταρκτική σχεδίαση ή στη διαπίστωση της ανάγκης για βελτίωσή τους. Η πεδιακή ανάλυση παρέχει την κατανομή του μαγνητικού πεδίου και μέσω αυτής, με κατάλληλη επεξεργασία μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια μεγέθη όπως ροπή και δύναμη, απώλειες, πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος, όπως επίσης να εντοπιστούν περιοχές πυρήνα που βρίσκονται σε κορεσμό.

#### **3.3.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα**

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι αμετάβλητο στο χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση, η ένταση του μαγνητικού πεδίου ( $H$ ) και η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου ( $B$ ) ικανοποιούν :

$$\begin{aligned}\nabla \times H &= J \\ \text{και} \\ \nabla \cdot B &= 0\end{aligned}\tag{3.13}$$

Ικανοποιείται επίσης η θεμελιώδης σχέση μεταξύ  $B$  και  $H$  για κάθε υλικό:

$$B = \mu \cdot H\tag{3.14}$$

Αν το υλικό είναι μη γραμμικό, όπως για παράδειγμα κορεσμένος σίδηρος ή μαγνήτες alnico, τότε η επιτρεπτότητα,  $\mu$ , είναι στην πραγματικότητα μία συνάρτηση του B:

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (3.15)$$

Η εύρεση του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου μπορεί να επιτευχθεί υπολογίζοντας το διανυσματικό δυναμικό. Η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου γράφεται σε συνάρτηση του διανυσματικού δυναμικού, A, ως εξής:

$$B = \nabla \times A \quad (3.16)$$

Αυτός ο ορισμός του B ικανοποιεί πάντα τη Σχέση 3.15. Τότε, η Σχέση 3.16 γράφεται ως εξής:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (3.17)$$

Για ένα γραμμικό ιστροπικό μέσο (και υποθέτοντας ότι  $\nabla \cdot A = 0$ ), η εξίσωση αυτή καταλήγει:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \quad (3.18)$$

Στη γενική περίπτωση, το διανυσματικό δυναμικό είναι ένα διάνυσμα τριών συνιστωσών. Σε δύο διαστάσεις όμως, οι δύο από αυτές τις τρεις συνιστώσες είναι μηδέν, και μεταβάλλεται μόνο η κατακόρυφη συνιστώσα.

Το πλεονέκτημα της χρήσης του διανυσματικού δυναμικού είναι ότι όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο μαγνητοστατικό πεδίο συνδυάζονται σε μία εξίσωση. Εάν είναι γνωστό το A, τα B και H προκύπτουν από διαφορίση του A.

Στην περίπτωση ύπαρξης μαγνητικού πεδίου αρμονικά μεταβαλλόμενου, μπορούν να επαχθούν δινορρεύματα σε υλικά με μη μηδενική αγωγιμότητα και τότε θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλες εξισώσεις του Maxwell αναφορικά με την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου.

### 3.3.2 Οριακές συνθήκες

Για την επίλυση ενός μαγνητοστατικού ή ηλεκτροστατικού προβλήματος θα πρέπει να ορισθούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος, οι οποίες μπορεί να είναι ανάμεσα στις εξής:

- Dirichlet. Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, η τιμή του δυναμικού  $A$  δηλώνεται πάνω στο όριο, π.χ.  $A=0$ . Δηλώνοντας σε ένα μαγνητικό πρόβλημα  $A=0$  κατά μήκος ενός ορίου της γεωμετρίας, αποτρέπεται η μαγνητική ροή από το να διαπεράσει το όριο αυτό.
- Neumann. Αυτή η οριακή συνθήκη ορίζει την κάθετη παράγωγο του δυναμικού κατά μήκος του ορίου και συνήθως χρησιμοποιείται στα μαγνητικά προβλήματα στην περίπτωση διεπιφάνειας με υλικό πολύ μεγάλης επιτρεπτότητας.
- Robin. Η οριακή συνθήκη Robin είναι ένα είδος συνδυασμού μεταξύ των Dirichlet και Neumann, καθορίζοντας μια σχέση μεταξύ της τιμής του  $A$  και της παραγώγου του. Ένα παράδειγμα τέτοιας οριακής συνθήκης είναι:

$$\frac{\partial A}{\partial n} + cA = 0 \quad (3.19)$$

Αυτή η οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται συνήθως για να επιτρέψουν σε ένα περιορισμένο χωρικά πρόβλημα να μιμηθεί τη συμπεριφορά μιας άπειρης χωρικά περιοχής.

- Περιοδική. Μια περιοδική οριακή συνθήκη συνδέει μαζί δύο όρια. Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, οι οριακές τιμές σε αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων ισούνται.
- Αντιπεριοδική. Μια αντιπεριοδική οριακή συνθήκη συνδέει επίσης δύο όρια μεταξύ τους, αλλά σε αυτή την περίπτωση τα αντίστοιχα σημεία έχουν μεγέθη ίσου μέτρου αλλά αντίθετου πρόσημου.

### 3.3.3 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Αν και οι συνθήκες ενός μαγνητικού προβλήματος μπορούν να εκφραστούν υπό τη μορφή μιας διαφορικής εξίσωσης, με ορισμένες οριακές συνθήκες, ωστόσο είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί μια αναλυτική λύση, παρά μόνο για προβλήματα πολύ απλής γεωμετρίας. Αυτή τη

δυσκολία έρχεται να ξεπεράσει η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, χωρίζοντας το πρόβλημα σε ένα μεγάλο αριθμό περιοχών και αντίστοιχων υποπροβλημάτων που όμως αναφέρονται σε απλή γεωμετρία και είναι εύκολη η επίλυσή τους. Αν η αρχική περιοχή τεμαχιστεί σε αρκετό αριθμό τέτοιων υποπεριοχών, το υπολογιζόμενο δυναμικό προσεγγίζει αρκετά καλά την ακριβή του τιμή.

Το πλεονέκτημα της διαίρεσης της περιοχής του προβλήματος σε ένα μεγάλο αριθμό μικρών στοιχείων είναι ότι το πρόβλημα μετασχηματίζεται από ένα μικρό αλλά δύσκολο στην επίλυση πρόβλημα, σε ένα μεγάλο αλλά σχετικά εύκολο στην επίλυση. Το πρόβλημα αυτό παίρνει τη μορφή ενός προβλήματος γραμμικής άλγεβρας με πολλές χιλιάδες αγνώστων συνήθως, και υπάρχουν αλγόριθμοι που επιτρέπουν την επίλυσή του σε σύντομο χρόνο.

### **3.3.4 Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων *fem***

Το ελεύθερο λογισμικό *fem* ανήκει στην κατηγορία προγραμμάτων επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων και επιλύει δισδιάστατα και μαγνητοστατικά προβλήματα, όπως επίσης προβλήματα όπου τα μαγνητικά μεγέθη μεταβάλλονται με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Ειδικότερα, το πρόγραμμα αυτό διακρίτοποιεί την περιοχή του προβλήματος χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία. Σε κάθε στοιχείο, η λύση προσεγγίζεται με γραμμική παρεμβολή των τιμών του δυναμικού στις κορυφές του τριγώνου. Το πρόβλημα γραμμικής άλγεβρας σχηματίζεται με ελαχιστοποίηση του μέτρου του σφάλματος ανάμεσα στην πραγματική διαφορική εξίσωση και την προσεγγιστική διαφορική εξίσωση. Η διαδικασία επίλυσης ενός μαγνητικού προβλήματος από το *fem* έχει τα παρακάτω στάδια:

1. Σχεδίαση της γεωμετρίας, ορισμός των οριακών συνθηκών και των υλικών.
2. Πλεγματοποίηση του προβλήματος με επιθυμητό αριθμό τριγωνικών στοιχείων.
3. Επίλυση του προβλήματος γραμμικής άλγεβρας και εύρεσης του διανυσματικού δυναμικού.
4. Απεικόνιση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.[17]

## 3.4 Κινητήρες μονίμων μαγνητών

### 3.4.1 Μόνιμοι Μαγνήτες

Τα υλικά με τη δυνατότητα διατήρησης της μαγνήτισης εισήχθησαν στην έρευνα των ηλεκτρικών μηχανών περί το 1950. Έκτοτε έχει υπάρξει σημαντική πρόοδος στη μελέτη και χρήση αυτών των υλικών. Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής στους μαγνήτες μπορεί να θεωρηθεί ως αποτέλεσμα δύο συνιστωσών. Η μία συνιστώσα είναι εγγενής και εξαρτάται από τη μόνιμη ευθυγράμμιση των κρυσταλλικών τομέων σε εφαρμοσμένο μαγνητικό πεδίο κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης. Η εγγενής αυτή συνιστώσα,  $B_i$ , φτάνει στον κορεσμό για κάποιες τιμές της επιβαλλόμενης έντασης του μαγνητικού πεδίου και δεν αυξάνεται περαιτέρω με την αύξηση της επιβαλλόμενης έντασης. Η άλλη συνιστώσα της πυκνότητας της μαγνητικής ροής του μόνιμου μαγνήτη,  $B_h$ , οφείλεται στην ένταση του μαγνητικού πεδίου του μαγνήτη όταν το υλικό δε βρίσκεται υπό την επίδραση εξωτερικού εφαρμοσμένου μαγνητικού πεδίου. Επομένως, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής του μαγνητικού υλικού δίνεται από τη σχέση:

$$B_m = B_h + B_i \quad (3.20)$$

Η συνιστώσα της διέγερσης  $B_h$  είναι ευθέως ανάλογη της έντασης του μαγνητικού πεδίου,  $H$ , και δίνεται από τη σχέση:

$$B_h = \mu_0 \cdot H \quad (3.21)$$

Σε όλα τα μαγνητικά υλικά η παραπάνω συνιστώσα είναι πολύ μικρή σε σχέση με την εγγενή πυκνότητα μαγνητικής ροής. Συνδυάζοντας τις Σχέσεις 3.20 και 3.21 προκύπτει η εξίσωση:

$$B_m = B_i + \mu_0 \cdot H \quad (3.22)$$

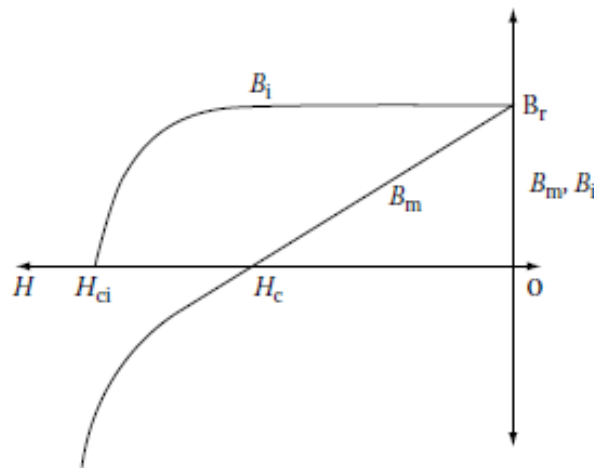
Για έναν τυπικό κεραμικό μαγνήτη η εγγενής συνιστώσα και η πυκνότητα ροής μαγνήτη φαίνονται στο Σχήμα 3.3. Στην περιοχή αυτή η πυκνότητα μαγνητικής ροής δίνεται από την ευθεία με εξίσωση:

$$B_m = B_r + \mu_0 \cdot \mu_{rm} \cdot H \quad (3.23)$$

, όπου  $\mu_{rm}$  είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μαγνήτη. Φαίνεται ότι για  $H=0$ , η εγγενής πυκνότητα μαγνητικής ροής και η πυκνότητα κανονικής επαγωγής περνούν από το σημείο που είναι γνωστό ως παραμένουσα μαγνήτιση,  $B_m$ . Η εγγενής πυκνότητα ροής στο δεύτερο τεταρτημόριο μπορεί να εξαχθεί από τη χαρακτηριστική απομαγνήτισης:

$$B_i = B_m - \mu_0 \cdot H = B_r + \mu_0 \cdot H \cdot (\mu_{rm} - 1) \quad (3.24)$$

Να σημειωθεί ότι για σκληρό μαγνήτη με ευθεία καμπύλη απομαγνήτισης, η εγγενής πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι σταθερή, δηλαδή παραμένει 'μόνιμα μαγνητισμένος' και χαρακτηρίζεται ως μαγνήτης υψηλού βαθμού. Αν η καμπύλη απομαγνήτισης δε δίνεται από την εξίσωση της ευθείας στην περιοχή αυτή, τότε η εγγενής πυκνότητα ροής δεν είναι σταθερή, πράγμα το οποίο υποδηλώνει ότι η 'μονιμότητα της μαγνήτισης' δεν είναι εξίσου καλή με αυτή των μαγνητών υψηλού βαθμού και άρα οι μαγνήτες αυτοί ονομάζονται μόνιμοι μαγνήτες χαμηλού βαθμού. Επιπλέον, η δύναμη απομαγνήτισης που απαιτείται για το μηδενισμό της εγγενούς πυκνότητας του μαγνήτη είναι η εγγενής  $H_{ci}$ , και αυτή της κανονικής πυκνότητας είναι η  $H_c$  (πεδίο επαναφοράς).

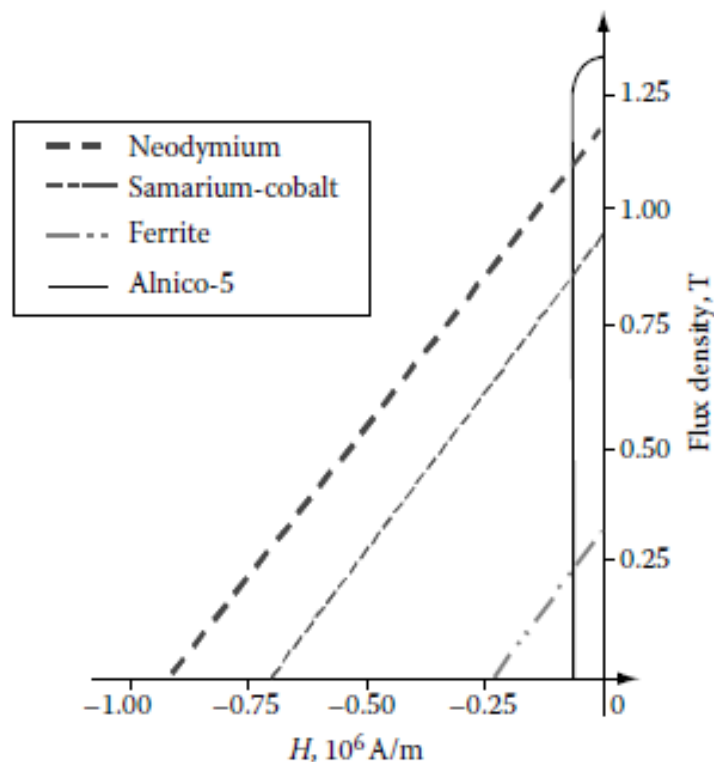


Σχήμα 3. 3 Πυκνότητα μαγνητικής ροής για τυπικό κεραμικό μαγνήτη

Η καμπύλη απομαγνήτισης είναι αυτή που χρησιμοποιείται για την ανάλυση και το σχεδιασμό των μηχανών, καθώς περιλαμβάνει την επίδραση της έντασης του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, η οποία εμφανίζεται σε κάθε περίπτωση λόγω της διέγερσης του τυλίγματος τυμπάνου.

Τα υλικά τα οποία διατηρούν τη μαγνήτιση είναι γνωστά ως σκληρά μαγνητικά υλικά. Αυτό το χαρακτηριστικό συναντάται στο κοβάλτιο, το σίδηρο και στο νικέλιο, τα λεγόμενα φερρομαγνητικά υλικά. Άλλα υλικά όπως το Alnico-5, οι φερρίτες (κεραμικά), σαμάριο- κοβάλτιο και το νεοδύμιο χρησιμοποιούνται επίσης σε ηλεκτρικές μηχανές. Τα πλέον συνηθισμένα υλικά είναι το σαμάριο-κοβάλτιο και οι μαγνήτες τύπου νεοδυμίου.

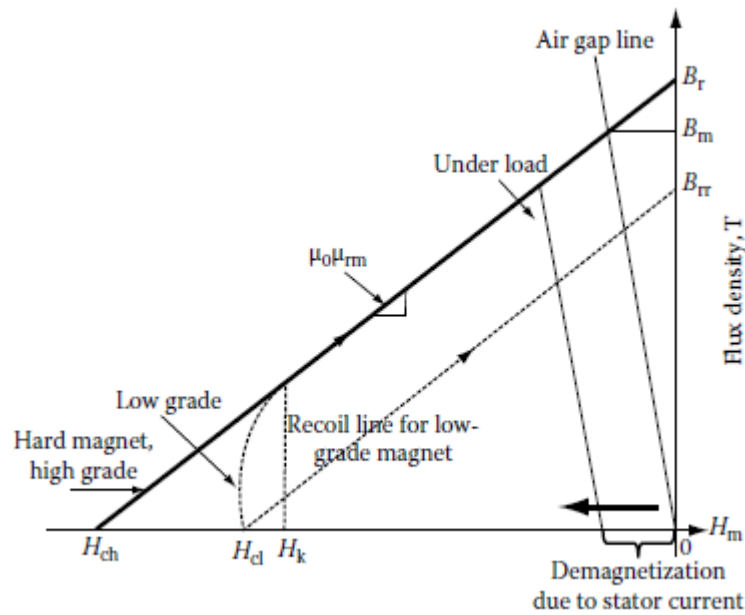
Παρακάτω φαίνεται η χαρακτηριστική απομαγνήτισης των υλικών που προαναφέρθηκαν:



Σχήμα 3. 4 Χαρακτηριστικές B-H για διάφορους μόνιμους μαγνήτες

Στο Σχήμα 3.4 τα σημεία του άξονα της μαγνητικής επαγωγής στα οποία τέμνει η κάθε χαρακτηριστική τον άξονα είναι η τιμή της παραμένουσας μαγνήτισης, η οποία εμφανίζεται για μηδενικό πεδίο διέγερσης. Παρατηρείται ότι το νεοδύμιο, το σαμάριο-κοβάλτιο και ο φερρίτης έχουν γραμμικές χαρακτηριστικές, με το νεοδύμιο να εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή για την παραμένουσα μαγνήτιση και για το πεδίο απομαγνήτισης. Από την άλλη, το υλικό Alnico-5 έχει τη μεγαλύτερη τιμή της παραμένουσας μαγνήτισης, αλλά μη γραμμική χαρακτηριστική.





Σχήμα 3. 5 Σημείο λειτουργίας μονίμων μαγνητών (υψηλού και χαμηλού βαθμού)

Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται η χαρακτηριστική απομαγνήτισης για σκληρό μόνιμο μαγνήτη, υψηλού βαθμού. Οι μαγνήτες χαμηλού βαθμού παρουσιάζουν καμπύλη, η οποία φαίνεται με τη διακεκομμένη γραμμή για χαμηλές τιμές της μαγνήτισης και είναι γνωστή ως γόνατο. Στο σημείο αυτό η μαγνήτιση μειώνεται κατακόρυφα και μηδενίζεται για τιμή επιβαλλόμενου πεδίου ίση με  $H_{cl}$ . Η ένταση του μαγνητικού πεδίου για το σημείο του γονάτου συμβολίζεται με  $H_k$ . Αν, στη συνέχεια, η εξωτερική διέγερση κατά του μαγνήτη αφαιρεθεί τότε επαναποκτά μαγνήτιση, η οποία έχει χαρακτηριστική παράλληλη με την αρχική B-H. Έτσι φτάνει σε νέα τιμή παραμένουσας μαγνήτισης  $B_{rr}$ , χαμηλότερη από την αρχική και ο μαγνήτης χάνει μόνιμα το ποσό  $(B_r - B_{rr})$  στην παραμένουσα μαγνήτιση.

### 3.4.2 Σημείο λειτουργίας και γραμμή διακένου

Για την εύρεση του σημείου λειτουργίας στην καμπύλη απομαγνήτισης θα πρέπει να θεωρηθεί η διαδρομή της μαγνητικής ροής στη μηχανή. Η μαγνητική ροή έχει κατεύθυνση από το βόρειο πόλο του μαγνήτη του δρομέα προς το στάτη, μέσω του διακένου και στη συνέχεια από το στάτη στο νότιο πόλο του μαγνήτη του δρομέα, πάλι μέσω του διακένου. Η διαδρομή, δηλαδή, περιλαμβάνει δύο φορές το μήκος του μαγνήτη καθώς και δύο φορές το μήκος του διακένου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.6. Η μαγνητεγερτική δύναμη από τους μαγνήτες ισούται με αυτήν που δέχεται το διάκενο, αν θεωρηθούν οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις δρομέα και στάτη αμελητέες. Τότε:

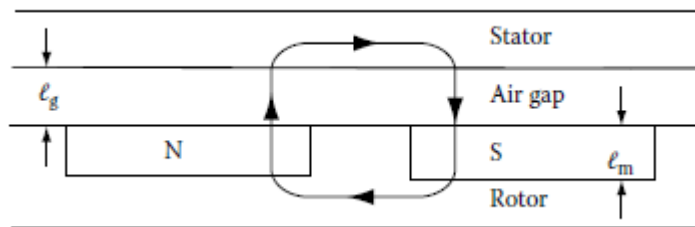
$$H_m \cdot l_m + H_g \cdot l_g = 0 \quad (3.25)$$

$H_m, l_m$  ένταση μαγνητικού πεδίου και μήκος, αντίστοιχα, για το μαγνήτη

$H_g, l_g$  ένταση μαγνητικού πεδίου και μήκος, αντίστοιχα, για το διάκενο

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής που αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας της καμπύλης απομαγνήτισης μπορεί να γραφεί ως ευθεία μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$B_m = B_r + \mu_0 \cdot \mu_{rm} \cdot H_m \quad (3.26)$$



Σχήμα 3. 6 Απλή απεικόνιση στάτη και δρομέα μηχανής

Η μαγνητική ροή στο διάκενο ως προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο μπορεί να γραφεί:

$$B_g = \mu_0 \cdot H_g \quad (3.27)$$

Χρησιμοποιώντας τις Σχέσεις 3.26 και 3.27, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{aligned} B_m &= B_r + \mu_0 \cdot \mu_{rm} \cdot H_m = B_r - \mu_0 \cdot \mu_{rm} \cdot \frac{H_g \cdot l_g}{l_m} \\ &= B_r - \mu_{rm} \cdot \frac{l_g}{l_m} \cdot \mu_0 \cdot H_g = B_r - \mu_{rm} \cdot \frac{l_g}{l_m} \cdot B_g \end{aligned} \quad (3.28)$$

Στη συνέχεια, αγνοώντας τη ροή σκέδασης, ισχύει:

$$B_g = B_m \quad (3.29)$$

Τέλος, αντικαθιστώντας τη Σχέση 3.28 στην 3.29 εξάγεται η Σχέση 3.30:

$$B_m = \frac{B_r}{\left(1 + \frac{\mu_{rm} \cdot l_g}{l_m}\right)} \quad (3.30)$$

Είναι φανερό από τη Σχέση 3.30 ότι η μαγνητική ροή που αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας είναι πάντοτε μικρότερη από την παραμένουσα μαγνήτιση και αυτό οφείλεται στη συνθήκη διέγερσης του διακένου. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι συνθήκες διέγερσης του σιδήρου καθώς και οι ροές σκέδασης έχουν αγνοηθεί κατά το συλλογισμό αυτό. Η εξίσωση που προκύπτει χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση. Αν θεωρηθεί η μαγνητική ροή του διακένου ίση με την παραμένουσα μαγνητική ροή του μαγνήτη, ο παρονομαστής του κλάσματος θα πρέπει να ισούται με τη μονάδα, πράγμα το οποίο συνεπάγεται πάχος μαγνήτη πολύ μεγαλύτερο του γινομένου του μήκους διακένου με τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μαγνήτη. Εκτιμώντας σχετική μαγνητική διαπερατότητα περίπου ίση με τη μονάδα για μαγνήτη υψηλού βαθμού, το πάχος του μαγνήτη θα πρέπει να υπερβαίνει κατά πολύ το μήκος του διακένου. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα μεγάλο μέγεθος μαγνήτη, πράγμα το οποίο δεν μπορεί να υλοποιηθεί για πρακτική μηχανή γιατί συνεπάγεται μεγάλο κόστος και μη συμπαγή δρομέα, άρα και μηχανή συνολικά, όχι συμπαγή. Πέραν αυτού, μία επιπλέον παράμετρος που καθιστά αδύνατο κάτι τέτοιο είναι η ροή σκέδασης μεταξύ των μαγνητών μέσω του διακένου, η οποία θα αυξάνεται όσο μικρότερο είναι το μήκος του διακένου σε σχέση με το μήκος του μαγνήτη. Έτσι προκύπτει τελικά ότι ο λόγος του πάχους του μαγνήτη προς το μήκος του διακένου θα πρέπει να περιορίζεται στις τιμές από το 1 έως το 20. Όσο πιο μικρός είναι αυτός ο λόγος, τόσο ο όγκος και το κόστος του μαγνήτη θα είναι χαμηλότερα, με αποτέλεσμα χαμηλότερη ισχύ εξόδου αλλά και πυκνότητα ισχύος. Όσο μεγαλύτερος ο λόγος, τόσο πιο έντονα τα φαινόμενα που αναπτύχθηκαν πριν. Αυξανόμενου του λόγου, δεν αυξάνεται αντίστοιχα και το όφελος σε σχέση με τη ισχύ εξόδου, αλλά υπάρχει κάποια τιμή αυτού του λόγου πέραν της οποίας παράγοντες όπως η ροή σκέδασης αλλά και ο αυξανόμενος όγκος και το βάρος της μηχανής οδηγούν σε χαμηλή πυκνότητα ισχύος.

Το σημείο λειτουργίας που λαμβάνεται από τη Σχέση 3.30 φαίνεται στο Σχήμα 3.5 και η ευθεία που συνδέει τη μαγνητική ροή του σημείου λειτουργίας,  $B_m$ , με την αρχή των αξόνων ονομάζεται καμπύλη διακένου ή καμπύλη φορτίου. Η κλίση αυτής της καμπύλης ισούται με την αρνητική τιμή ενός θεωρητικού συντελεστή διαπερατότητας,  $\mu_c$ , επί τη διαπερατότητα του αέρα. Αν η διέγερση του στάτη είναι τέτοια ώστε να προκληθεί

απομαγνήτιση, τότε η καμπύλη διακένου μετατοπίζεται προς τα αριστερά και παράλληλα με τη γραμμή φορτίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Η μαγνητική ροή του σημείου λειτουργίας μειώνεται περαιτέρω σε σχέση με την τιμή  $B_m$ . Ο συντελεστής διαπερατότητας προκύπτει για σημείο λειτουργίας που ορίζεται από τα  $B_m$  και  $H_m$  ως εξής:

$$B_m = B_r + \mu_0 \cdot \mu_{rm} \cdot H_m = -\mu_0 \cdot \mu_c \cdot H_m \quad (3.31)$$

Όπου  $H_m$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου που οφείλεται στο ρεύμα διέγερσης του στάτη της μηχανής. Τότε η διαπερατότητα προκύπτει σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\mu_c = -\frac{B_r}{\mu_0 \cdot H_m} - \mu_{rm} \quad (3.32)$$

Όμως, αν εκφραστεί η παραμένουσα μαγνήτιση  $B_r$  ως συνάρτηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο σημείο λειτουργίας, τότε προκύπτει:

$$B_r = -\mu_0 \cdot \mu_{re}(H_m) \cdot H_m \quad (3.33)$$

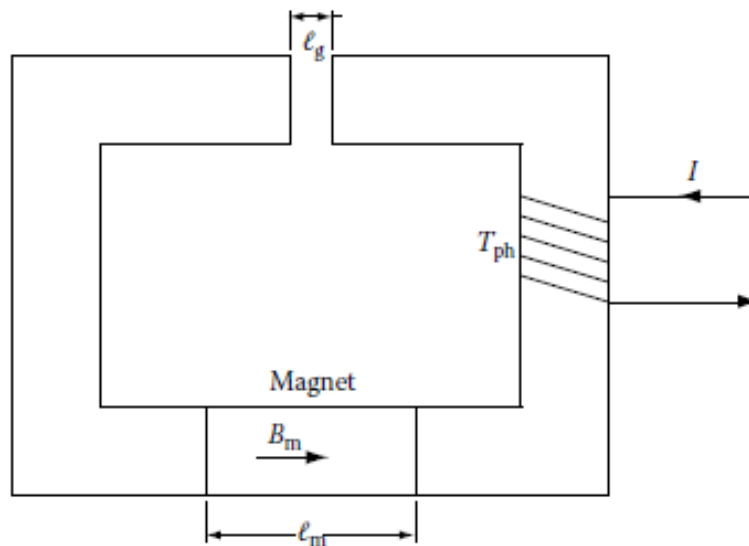
Όπου  $\mu_{re}(H_m)$  μπορεί να θεωρηθεί η εξωτερική διαπερατότητα, εξαρτώμενη από την ένταση  $H_m$ . Αντικαθιστώντας τη Σχέση 3.33 στην 3.32 προκύπτει η παρακάτω εξίσωση για το συντελεστή διαπερατότητας:

$$\mu_c = \mu_{re}(H_m) - \mu_{rm} \quad (3.34)$$

Συνεπώς, οι αλλαγές της παραμένουσας μαγνήτισης λόγω θερμοκρασίας καθώς και λόγω της επιβολής εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, παράγοντες οι οποίοι οφείλονται καθαρά σε εξωτερικές συνθήκες λειτουργίας, φαίνονται με σαφή τρόπο από τη Σχέση 3.34 της διαπερατότητας  $\mu_c$ . Η Σχέση 3.34 δείχνει ότι όταν υπάρχει η επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου η διαπερατότητα ελαττώνεται όσο ελαττώνεται και η εξωτερική μαγνητική διαπερατότητα για το συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. Στους σκληρούς μόνιμους μαγνήτες αυτή η εξωτερική διαπερατότητα είναι της τάξης του 1-10 για στην ονομαστική περιοχή λειτουργίας. Η τιμή αυτή είναι ενδεικτική της λειτουργούσας πυκνότητας ροής του μαγνήτη.

### 3.4.3 Επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου

Οι κινητήρες μονίμων μαγνητών αντιμετωπίζουν μαγνητικό πεδίο εξαιτίας της διέγερσης του τυλίγματος τυμπάνου του στάτη σε συνδυασμό με το μαγνητικό πεδίο των μαγνητών του δρομέα. Η αλληλεπίδραση αυτών των δύο πεδίων έχει αποτέλεσμα το οποίο εξαρτάται από το αν τα πεδία δρουν αθροιστικά ή όχι. Η εξωτερική διέγερση προορίζεται πάντα για τη μείωση της ροής στο διάκενο (flux weakening). Επομένως, η ροή που προκαλείται εξαιτίας της εξωτερικής διέγερσης έχει αντίθετη φορά από τη ροή λόγω των μονίμων μαγνητών. Δεν συνηθίζεται εν γένει η αθροιστική συνεισφορά των πεδίων, καθώς αυτό θα οδηγούσε σε κορεσμό τον πυρήνα του στάτη με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών σιδήρου. Επίσης, ο λόγος για τον οποίο δεν επιτρέπεται η αθροιστική συνεισφορά των μαγνητικών ροών είναι ότι κατά τη διαδικασία της σχεδίασης της μηχανής, η μαγνητική ροή από μόνη της τίθεται έτσι ώστε να αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας κοντά στο γόνατο της χαρακτηριστικής καμπύλης B-H (ή ισοδύναμα στην καμπύλη ροής-ρεύματος) του υλικού των φύλλων λαμαρίνας. Οποιαδήποτε περαιτέρω προσθήκη ροής λόγω εξωτερικής διέγερσης θα είχε σαν αποτέλεσμα τη μετατόπιση του σημείου λειτουργίας στον κορεσμό.



Σχήμα 3. 7 Απλοποιημένο μαγνητικό κύκλωμα

Ένα απλό παράδειγμα περιγράφεται με τη βοήθεια του Σχήματος 3.7. Αν υποθεθεί ότι δεν υπάρχει εξωτερικό ρεύμα ( $I=0$ ), τότε η μαγνητική ροή στο κύκλωμα θα έχει κατεύθυνση από τα αριστερά προς τα δεξιά, όπως ορίζει η μαγνήτιση του μαγνήτη. Αν το τύλιγμα

διεγερθεί με ρεύμα, τότε για τη φορά που φαίνεται στο Σχήμα 3.7 η ροή που προκαλείται από αυτό θα έχει την ίδια διεύθυνση με αυτή του μαγνήτη. Έτσι αυξάνεται η ποσότητα ροής στον πυρήνα, με αποτέλεσμα να φτάνει γρήγορα σε κορεσμό. Αν το ρεύμα έχει αντίθετη φορά από αυτή του σχήματος, τότε υπάρχει μείωση της μαγνητικής ροής διότι τα πεδία μαγνήτη και τυλίγματος έχουν αντίθετες φορές.

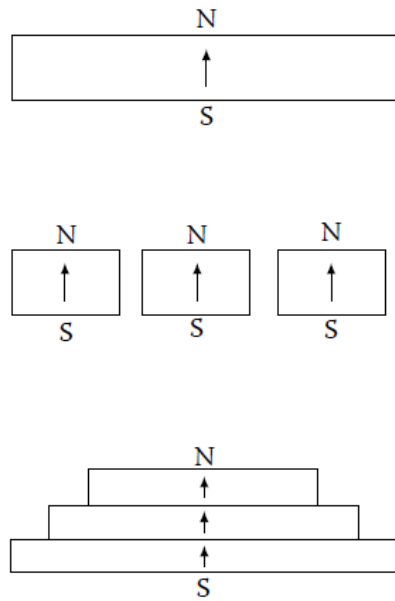
#### 3.4.4 Διάταξη μονίμων μαγνητών

Οι μαγνήτες κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη και σχήματα. Μπορούν να κατασκευαστούν και σε μορφή δακτυλίου, πράγμα το οποίο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευκολία στην τοποθέτηση πάνω στο δρομέα και μπορούν να έχουν οποιοδήποτε επιθυμητό προσανατολισμό. Το μειονέκτημα, όμως, που παρουσιάζουν είναι το μεγάλο τους κόστος σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη διαμόρφωση μαγνήτη.

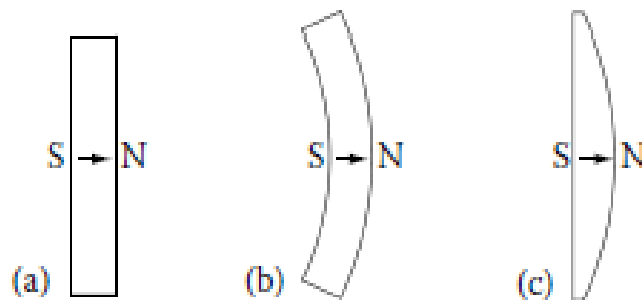
Ο κάθε πόλος του δρομέα μπορεί να αποτελείται και από τμήματα μαγνήτη αντί για ένα κομμάτι. Ο λόγος για τον οποίο αυτό συμβαίνει είναι ότι για μηχανές με περιορισμούς στη διαδικασία της κατεργασίας των μαγνητών, η μαγνήτιση μιας μονάδας ή ενός τμήματος ανά πόλο μπορεί να μην είναι εφικτή, ή αν εφικτή μπορεί να μην είναι η πλέον οικονομική. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ένας μαγνήτης ανά πόλο δεν κρίνεται κατάλληλος για μεγάλο εύρος λειτουργίας εξασθένησης πεδίου (flux weakening). Έχει διαπιστωθεί ότι η δυνατότητα για εξασθένηση πεδίου (flux weakening) ενισχύεται όσο υπάρχουν περισσότερα τμήματα μαγνήτη ανά πόλο.

Υπάρχει η δυνατότητα, επίσης, για τοποθέτηση των μαγνητών σε στοίβες, με ίσα ή και διαφορετικά μήκη ανάλογα με την επιθυμητή κατανομή της μαγνητικής ροής, όπως για παράδειγμα ημιτονική ή τραπεζοειδή κατανομή για σύγχρονη και ΣΡ χωρίς συλλέκτη (brushless dc) μηχανή αντίστοιχα. Τα τρία είδη μαγνητικών πόλων φαίνονται στο Σχήμα 3.8. Οι μαγνήτες που στοιβάζονται μπορεί να έχουν διαφορετικά μήκη και πάχη, αλλά πάντα την ίδια κατεύθυνση μαγνήτισης.

Η κάθε διαμόρφωση παρουσιάζει πλεονεκτήματα για συγκεκριμένες εφαρμογές. Ένα κομμάτι μαγνήτη ανά πόλο καθίσταται ιδανικό για μικρές μηχανές, όπως αυτή που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Μηχανές υψηλότερης ισχύος κατασκευάζονται με πολυτμηματικούς μαγνήτες ανά πόλο καθώς και διαμορφώσεις στοίβας. Σε κάθε περίπτωση, και οι δύο τύποι χρησιμοποιούνται ευρέως στην πράξη.

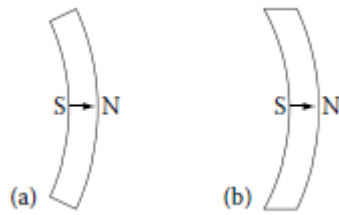


Σχήμα 3. 8 Υλοποίηση μαγνητικών πόλων με ένα ή περισσότερα τμήματα (segments)



Σχήμα 3. 9 Ορισμένοι τύποι μαγνητών: (a)ορθογωνικός (b) ακτινικός (c) δισκοειδής - breadloaf

Τα διάφορα σχήματα που μπορεί να έχουν οι μαγνήτες είναι το ορθογωνικό (a), το ακτινικό (b) και το δισκοειδές (c-breadloaf) και φαίνονται στο Σχήμα 3.9. Οι ακτινικοί και δισκοειδείς μαγνήτες είναι ιδανικοί για επιφανειακή τοποθέτηση στο δρομέα. Στην περίπτωση των ακτινικών μαγνητών το διάκενο είναι ομοιόμορφο, δεδομένου ότι δεν είναι μερικώς βυθισμένοι στο δρομέα ώστε να παρουσιάζει ομοιόμορφη μαγνητική ροή. Δε συμβαίνει το ίδιο στην περίπτωση του δισκοειδούς μαγνήτη, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται ανομοιομορφία και στη μαγνητική ροή του διακένου. Αυτό επιτρέπει ελευθερία στη διαμόρφωση της κατανομής της μαγνητικής ροής στο διάκενο, η οποία μπορεί να είναι πέρα από ορθογωνική και σταθερή για το μήκος τόξου του μαγνήτη.



Σχήμα 3. 10 (α)Ακτινική και (β)Παράλληλη μαγνήτιση

Οι ορθογωνικοί μαγνήτες τοποθετούνται, συνήθως, εσωτερικά του δρομέα. Μια πρόσφατη τάση είναι η τοποθέτηση πολλαπλών μαγνητών ανά πόλο ώστε να επιτευχθεί ευκολότερα μεγάλο εύρος λειτουργίας εξασθένισης πεδίου (flux weakening). Αυτή η διαμόρφωση δεν κρίνεται ιδανική για επιφανειακή τοποθέτηση στο δρομέα, διότι δεν μπορεί να διατηρηθεί σταθερό το επιθυμητό διάκενο. Υπάρχουν εν γένει διάφορες διαμορφώσεις που μπορούν να υλοποιηθούν ανάλογα με τη φαντασία του εκάστοτε σχεδιαστή. Παρόλα αυτά, οι περιοριστικοί παράγοντες που υπεισέρχονται σε σχέση με τα διάφορα σχήματα των μαγνητών ακολουθούν παρακάτω:

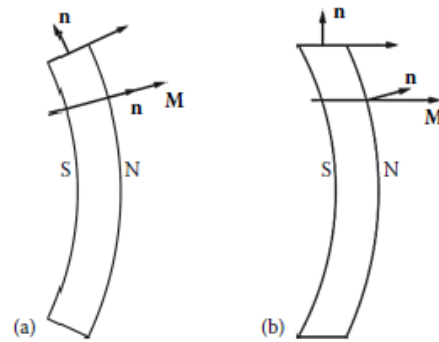
- Ελάχιστη ποσότητα υλικού ανά μαγνητικό πόλο
- Ευκολία στην κατεργασία και στην κατασκευή
- Κατανομή μαγνητικής ροής που είναι είτε ημιτονοειδής είτε τραπεζοειδής

Λόγω αυτών των περιορισμών υπάρχουν αρκετές διαμορφώσεις σχημάτων μαγνήτη που δεν έχουν εφαρμοστεί.[4]

### 3.4.5 Μαγνήτιση μονίμων μαγνητών

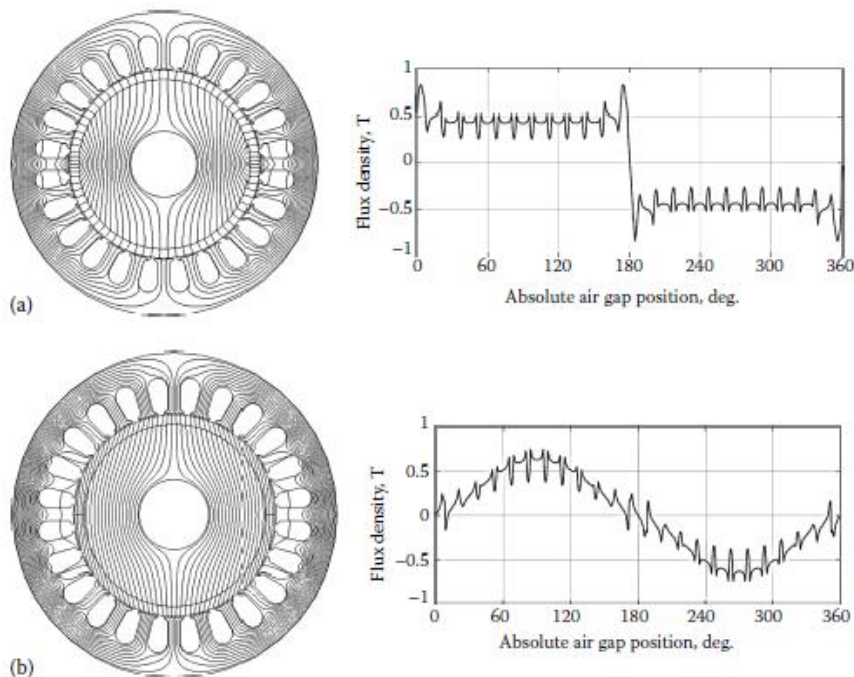
Οι μόνιμοι μαγνήτες μαγνητίζονται με ορισμένο προσανατολισμό ή διεύθυνση όπως είναι η ακτινική, η παράλληλη ή οποιαδήποτε άλλη. Η διεύθυνση της μαγνήτισης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της κατανομής της μαγνητικής ροής, ενώ επηρεάζει και έμμεσα την πυκνότητα της ισχύος για δεδομένη τοπολογία των μαγνητών. Η κατανομή της μαγνητικής ροής επηρεάζει, με τη σειρά της, την παραγωγή αρμονικών ροπής στη μηχανή και η παρουσία των αρμονικών ροπής υποβιβάζει την ποιότητα της ισχύος εξόδου, ιδιαίτερα στην περίπτωση των ηλεκτρονικών οδήγησης υψηλής απόδοσης. Οι πλέον συνηθισμένες διευθύνσεις μαγνήτισης είναι η ακτινική και η παράλληλη, οι οποίες θα αναπτυχθούν στη συνέχεια.





Σχήμα 3. 11 Μαγνήτιση μαγνητών (a) ακτινική μαγνήτιση (b) παράλληλη μαγνήτιση

Η ακτινική και η παράλληλη μαγνήτιση φαίνονται στο Σχήμα 3.11. Το διάνυσμα της επιφάνειας δείχνεται με  $\mathbf{n}$  και της μαγνήτισης με  $\mathbf{M}$ . Η ακτινική μαγνήτιση, όπως δηλώνει και το όνομα, έχει τη διεύθυνση της ακτίνας ενώ η παράλληλη έχει τη διεύθυνση των πλευρών του μαγνήτη. Η επίδραση και των δύο διευθύνσεων σε μια σύγχρονη μηχανή φαίνεται στα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.12 της μαγνητικής ροής σε σχέση με τη θέση του δρομέα, για μηχανή 2 πόλων και 24 αυλακών στάτη. Οι ακτινικά μαγνητισμένοι μαγνήτες παράγουν τραπεζοειδή μαγνητική ροή στο διάκενο, ενώ οι παράλληλα μαγνητισμένοι παράγουν ημιτονοειδή κατανομή στο διάκενο. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό εξετάζεται στη συνέχεια.



Σχήμα 3. 12 Μαγνητική ροή και επαγωγή ως προς τη θέση του δρομέα για (a) μηχανή με ακτινική μαγνήτιση (b) μηχανή με παράλληλη μαγνήτιση

Η μαγνητική ροή ξεκινάει από το μόνιμο μαγνήτη και εισέρχεται στο στάτη με τη διεύθυνση του διανύσματος της εκάστοτε επιφάνειας. Το διάνυσμα της μαγνητικής ροής σε ακτινικά μαγνητισμένους μαγνήτες έχει σαν αποτέλεσμα τη μέγιστη ποσότητα ροής να περνά επίσης στην ακτινική διεύθυνση. Επομένως, η μαγνητική ροή και επαγωγή στο διάκενο είναι μέγιστες και παραμένουν ομοιόμορφα σταθερές για το εύρος του μαγνήτη. Στην περίπτωση των παράλληλα μαγνητισμένων μαγνητών, η συνιστώσα της μαγνητικής ροής που βρίσκεται στη διεύθυνση του διανύσματος της επιφάνειας του στάτη είναι ανάλογη με το ημίτονο της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στον x-άξονα και τη μαγνήτιση στο συγκεκριμένο σημείο του μαγνήτη, με αποτέλεσμα την ημιτονοειδή κατανομή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο διάκενο. Υπάρχει επίσης εφαπτομενική συνιστώσα της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στην περίπτωση των παράλληλα μαγνητισμένων μαγνητών, ενώ αυτή η συνιστώσα είναι μηδενική για τους ακτινικά μαγνητισμένους μαγνήτες.

### **3.5 Ηλεκτρικές μηχανές μονίμων μαγνητών εναλλασσομένου ρεύματος**

Η διαθεσιμότητα των μονίμων μαγνητών με σημαντική ποσότητα πυκνότητας ενέργειας οδήγησε στην ανάπτυξη των dc μηχανών με διέγερση πεδίου το μόνιμο μαγνήτη περί τα 1950. Η εισαγωγή των μονίμων μαγνητών ως αντικαταστατών των ηλεκτρομαγνητικών πόλων με τυλίγματα που απαιτούν πηγή ηλεκτρικής ενέργειας είχε σαν αποτέλεσμα την κατασκευή συμπαγών dc μηχανών. Ομοίως και με τις σύγχρονες μηχανές, οι κλασσικοί ηλεκτρομαγνητικοί πόλοι αντικαθίστανται με τους μαγνητικούς πόλους, με αποτέλεσμα να μην είναι πλέον αναγκαία η ύπαρξη δακτυλίων και ψηκτρών.

#### **3.5.1 Διαμόρφωση μηχανών**

Η σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών μπορεί να κατηγοριοποιηθεί με βάση τη διεύθυνση της ροής του πεδίου ως εξής:

- Ακτινικό πεδίο: η διεύθυνση της ροής είναι η ακτινική
- Αξονικό πεδίο: η διεύθυνση της ροής είναι παράλληλη με τον άξονα του δρομέα

Η μηχανή με το ακτινικό πεδίο είναι πιο συνηθισμένη από αυτήν με το αξονικό πεδίο, η οποία όμως γνωρίζει σταδιακά ανάπτυξη σε κάποιες εφαρμογές, εξαιτίας της υψηλότερης

πυκνότητας ισχύος και της μεγαλύτερης δυνατότητας επιτάχυνσης σε σχέση με τον πιο διαδεδομένο τύπο. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι πλέον επιθυμητά σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή απόδοση.

Οι μαγνήτες, όπως αναφέρθηκε και πριν, μπορούν να τοποθετηθούν με ποικίλους τρόπους στο δρομέα. Οι σύγχρονες μηχανές υψηλής πυκνότητας ισχύος έχουν επιφανειακούς μαγνήτες με ακτινικό προσανατολισμό μαγνήτισης, ενώ οι εσωτερικοί μαγνήτες προτιμούνται για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας. Ανεξαρτήτως της τοποθέτησης των μαγνητών στο δρομέα, η βασική αρχή λειτουργίας παραμένει η ίδια. Ωστόσο, η τοποθέτηση των μαγνητών παίζει σημαντικό ρόλο στις αυτεπαγωγές ευθέως και κάθετου άξονα, πράγμα το οποίο θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

Ο άξονας των μαγνητών του δρομέα ονομάζεται ευθύς άξονας και η κύρια διαδρομή της ροής είναι μέσω των μαγνητών. Αν θεωρηθεί ότι η διαπερατότητα ενός μόνιμου μαγνήτη υψηλής πυκνότητας ροής είναι περίπου ίση με τη διαπερατότητα του αέρα, τότε μπορεί να θεωρηθεί και το μήκος του μαγνήτη ως προέκταση του διακένου κατά αυτό το μήκος. Η αυτεπαγωγή του στάτη όταν ο ευθύς άξονας ή οι μαγνήτες είναι ευθυγραμμισμένοι με το τύλιγμα του στάτη ονομάζεται αυτεπαγωγή ευθέως άξονα. Περιστρέφοντας τους μαγνήτες από τη θέση ευθυγράμμισης κατά 90°, η ροή του στάτη συναντάει την περιοχή ανάμεσα στους πόλους του δρομέα, η οποία περιέχει μόνο τη διαδρομή μέσω του σιδήρου και η αυτεπαγωγή αυτή είναι γνωστή ως αυτεπαγωγή κάθετου άξονα. Η αυτεπαγωγή μπορεί να προκύψει από τις διαστάσεις, το μήκος του διακένου και τον αριθμό των ελιγμάτων ως εξής:

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N \cdot \Phi}{I} = \frac{N \cdot F}{I \cdot \mathfrak{R}} = \frac{N \cdot N \cdot I}{\mathfrak{R}} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (3.35)$$

$N$  ο αριθμός των ελιγμάτων

$\Phi$  η μαγνητική ροή

$F$  η μαγνητεγερτική δύναμη, ΜΕΔ

$I$  το ρεύμα του πηνίου

$\mathfrak{R}$  η αντίδραση που δίνεται από τη σχέση:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A} \quad (3.36)$$

$l$  το μήκος της διαδρομής της ροής

$A$  το εμβαδόν της διατομής

$\mu_r$  η σχετική διαπερατότητα των φύλλων λαμαρίνας

Αν θεωρηθούν κυρίαρχες οι μαγνητικές αντιδράσεις μόνο του διακένου και των μαγνητών (αφού η σχετική διαπερατότητα του αέρα και ενός μόνιμου μαγνήτη υψηλού βαθμού είναι περίπου ίση με τη μονάδα) και αν αγνοηθούν οι αντιδράσεις του σιδήρου (αφού η σχετική του διαπερατότητα είναι ιδιαίτερα υψηλή, της τάξης του  $10^3$ , καθιστώντας αμελητέα την αντίδρασή του σε σχέση με αυτή του διακένου), ο λόγος των αντιδράσεων ευθέως και κάθετου άξονα προκύπτει με τον παρακάτω τρόπο:

$$\frac{\mathfrak{R}_d}{\mathfrak{R}_q} = \frac{l_g + l_m}{l_g} \quad (3.37)$$

$l_g$  το μήκος του διακένου

$l_m$  το πάχος του μαγνήτη

$\mathfrak{R}_d$  η αντίδραση ευθέως άξονα της διαδρομής της ροής

$\mathfrak{R}_q$  η αντίδραση κάθετου άξονα της διαδρομής της ροής

Από τη Σχέση 3.37 συμπεραίνεται ότι με πάχος μαγνήτη κατά πολύ μεγαλύτερο από το μήκος του διακένου, η αντίδραση ευθέως άξονα είναι επίσης κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίδραση του κάθετου άξονα. Με άλλα λόγια, το ενεργό μήκος διακένου ευθέως άξονα είναι πολλαπλάσιο του ενεργού μήκους διακένου κάθετου άξονα. Το αποτέλεσμα μιας τέτοιας ανισότητας αντιδράσεων είναι και η ανισότητα των αυτεπαγωγών των δύο αξόνων. Από τη στιγμή, τώρα, που η αυτεπαγωγή είναι αντιστρόφως ανάλογη της αντίδρασης και αντικαθιστώντας την στη Σχέση 3.37, η σχέση μεταξύ αυτεπαγωγών ευθέως και κάθετου άξονα προκύπτει:

$$L_q > L_d \quad (3.38)$$

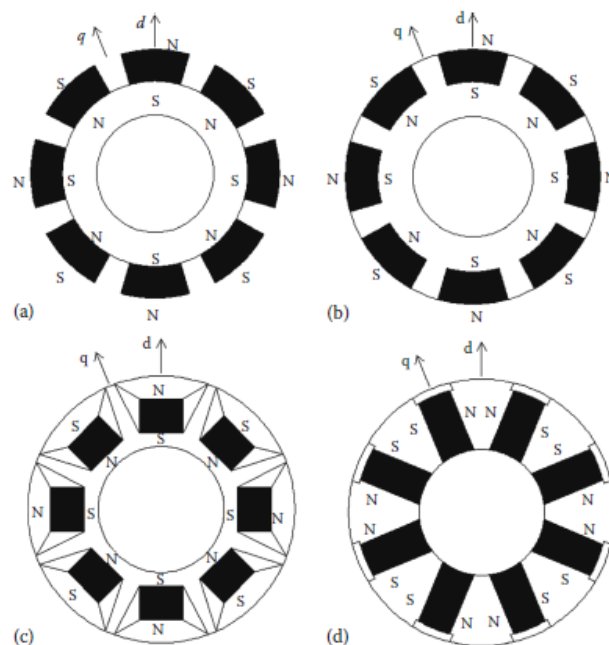
$L_q$  η αυτεπαγωγή κάθετου άξονα

$L_d$  η αυτεπαγωγή ευθέως άξονα

Η αυτεπαγωγή κάθετου άξονα είναι πάντοτε μεγαλύτερη από αυτή του ευθέως άξονα στις σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών, πράγμα το οποίο αντιτίθεται σε αυτό που συμβαίνει στις σύγχρονες μηχανές έκτυπων πόλων τυλιγμένου δρομέα. [4]

### 3.5.2 Διαμορφώσεις δρομέα

Οι διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να διαταχθούν οι μαγνήτες στο δρομέα έχουν δημιουργήσει πολλών ειδών σύγχρονους κινητήρες μονίμων μαγνητών (PMSM) καθώς και ΣΡ χωρίς συλλέκτη (Brushless DC). Μερικές δημοφιλείς και ερευνητικές διατάξεις καθώς και η επιρροή τους στην πυκνότητα μαγνητικής ροής του διακένου, στις αυτεπαγωγές τυλίγματος και στην ροπή αντίδρασης, που μπορεί να ενισχύσει τη ροπή που παράγεται από τους μαγνήτες ή τη σύγχρονη ροπή, περιγράφονται σε αυτήν την ενότητα.



Σχήμα 3. 13 (α) Σύγχρονη μηχανή μονίμων επιφανειακών μαγνητών (SPM), (β) Εσωτερικά επιφανειακών μαγνητών (SIPM), (γ) Εσωτερικών μαγνητών (IPM), (δ) Εσωτερικών μαγνητών με περιφερειακό προσανατολισμό

### **3.5.2.1 Σύγχρονος κινητήρας μονίμων επιφανειακών μαγνητών**

Στο Σχήμα 3.23(a) φαίνεται η τοπολογία των επιφανειακών μαγνητών στην εσωτερική περιφέρεια των ελασμάτων του δρομέα. Αυτή η διάταξη παρέχει τη μέγιστη δυνατή πυκνότητα μαγνητικής ροής, αφού αντιμετωπίζει κατευθείαν το διάκενο, χωρίς την παρεμβολή των ελασμάτων του δρομέα. Τα μειονεκτήματα μιας τέτοιας διάταξης είναι η μειωμένη κατασκευαστική ακεραιότητα και μηχανική ευρωστία, διότι οι μαγνήτες δεν είναι πλήρως ενσωματωμένοι στο δρομέα. Οι μόνιμοι μαγνήτες, στην πράξη, τοποθετούνται εν μέρει μέσα στο δρομέα ώστε να εξασφαλιστεί ότι θα παραμείνουν μηχανικά συγκρατημένοι. Η τοπολογία των επιφανειακών μαγνητών, εν γένει, δεν προτιμάται για εφαρμογές υψηλών στροφών, μεγαλύτερες από 3000rpm, παρόλο που αν έχουν πολύ μικρή διάμετρο δρομέα μπορεί να φτάσουν και τις 5000rpm. Η διαφορά στην αντίδραση ευθέως και κάθετου άξονα σε τέτοιες μηχανές είναι σχετικά μικρή. Ομοίως και η διαφορά ανάμεσα στις αυτεπαγωγές ευθέως και κάθετου άξονα δεν ξεπερνά το 10%.

### **3.5.2.2 Σύγχρονος κινητήρας μονίμων επιφανειακά εσωτερικών μαγνητών**

Το Σχήμα 3.13(b) υποδεικνύει τους μαγνήτες τοποθετημένους στα αυλάκια της εξωτερικής επιφάνειας του δρομέα, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη κυλινδρική επιφάνεια δρομέα. Αυτή η διάταξη είναι πολύ περισσότερο εύρωστη μηχανικά σε σχέση αυτή των επιφανειακών μαγνητών, διότι οι μαγνήτες δεν εξέχουν καθόλου του δρομέα. Σε αυτήν την περίπτωση ο λόγος των αυτεπαγωγών ευθέως και κάθετου άξονα είναι περίπου 2-2.5.

### **3.5.2.3 Σύγχρονος κινητήρας μονίμων εσωτερικών μαγνητών**

Στα Σχήματα 3.13(c) και 3.13(d) φαίνεται η τοποθέτηση των μαγνητών στη μέση των ελασμάτων του δρομέα, σε ακτινικούς και περιφερειακούς προσανατολισμούς, αντίστοιχα. Μια τέτοια τοπολογία είναι γνωστή ως εσωτερικών μαγνητών, παρέχει μεγάλη μηχανική ευρωστία και άρα συνίσταται για εφαρμογές υψηλών στροφών. Η κατασκευή, ωστόσο, μιας τέτοιας διάταξης είναι περισσότερο πολύπλοκη από αυτή των επιφανειακών ή εσωτερικά επιφανειακών μαγνητών. Να σημειωθεί ότι σε αυτήν την περίπτωση, ο λόγος αυτεπαγωγών ευθέως και κάθετου άξονα είναι μεγαλύτερος από αυτόν που παρουσιάζεται στις μηχανές με εσωτερικά επιφανειακούς μαγνήτες. Από το δρομέα εσωτερικών μαγνητών που φαίνεται στο σχήμα έχει αφαιρεθεί σίδηρος ώστε να

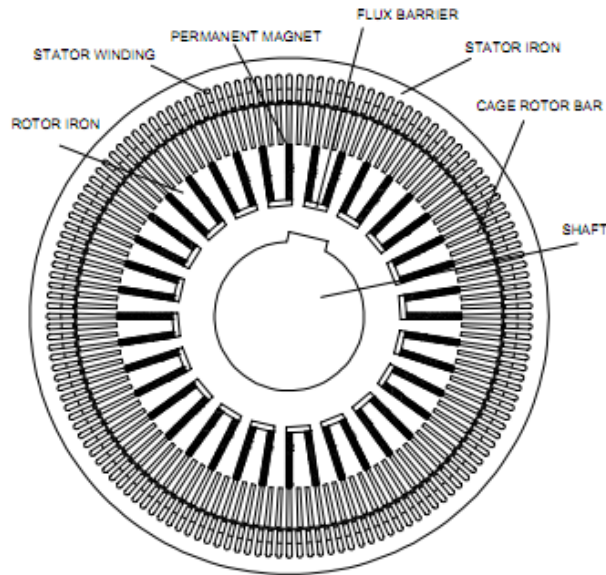
δημιουργηθούν μεγαλύτερα διάκενα αέρα μεταξύ των μαγνητών στο δρομέα. Ο σκοπός τους είναι η μείωση της ροής μεταξύ γειτονικών μαγνητών στην πάνω επιφάνεια του δρομέα. Χωρίς αυτά τα εμπόδια ροής, η ροή θα ακολουθούσε τη διαδρομή ανάμεσα στους μαγνήτες και δε θα περνούσε από το στάτη. Πέραν αυτού, ελαττώνουν και το βάρος του δρομέα, άρα και την αδράνεια αυτού. Επιτυγχάνεται έτσι και μεγαλύτερη επιτάχυνση, πράγμα το οποίο απαιτείται σε εφαρμογές όπως σερβομηχανισμούς (servo drive). Παρά το πλεονέκτημά τους αυτό, σπάνια χρησιμοποιούνται αυτοί οι κινητήρες σε τέτοιες εφαρμογές.[4]

Συγκριτικά με τους δρομείς επιφανειακών μαγνητών, οι δρομείς εσωτερικών μαγνητών παρουσιάζουν τη δυνατότητα συγκέντρωσης της ροής λόγω του μαγνήτη στο σώμα του δρομέα, επιτυγχάνοντας υψηλή αυτεπαγωγή ανοιχτού κυκλώματος στο διάκενο. Επίσης, παρουσιάζουν μεγαλύτερη εκτυπότητα και έτσι παράγεται και ροπή αντίδρασης επιπλέον της ροπής ευθυγράμμισης από το μόνιμο μαγνήτη. Επιτυγχάνεται με την τοπολογία εσωτερικών μαγνητών και υψηλό εύρος στροφών σταθερής ισχύος (υψηλό CPSR) και τέλος, οι εσωτερικοί μαγνήτες είναι περισσότερο προστατευμένοι από απομαγνητίσεις και μηχανικές καταπονήσεις.[5]

#### **3.5.2.4 Σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών εκκίνησης από το δίκτυο (Line-start)**

Υπάρχουν ορισμένοι σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες που σχεδιάζονται για εφαρμογές σταθερής ταχύτητας με σκοπό την αύξηση της απόδοσης και του συντελεστή ισχύος, σε σχέση με τις μηχανές επαγωγής ή τις σύγχρονες τυλιγμένου δρομέα. Αυτές οι μηχανές έχουν δρομέα κλωβού, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 3.14*, ώστε να παρέχεται ροπή από την ακινησία μέχρι ταχύτητα κοντά στη σύγχρονη. Ο κλωβός χρησιμοποιείται και για την απόσβεση των ταλαντώσεων του δρομέα. Όταν η μηχανή αυτή φτάσει τη σύγχρονη ταχύτητα, τα τμήματα κλωβού δε συμμετέχουν πια στην παραγωγή ροπής, διότι δεν υπάρχουν επαγόμενες τάσεις άρα ούτε και ρεύματα, για μηδενική ολίσθηση.

Οι σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών μεταβλητών στροφών δεν παρουσιάζουν την ανάγκη για τυλίγματα απόσβεσης για την αντιστάθμιση των ταλαντώσεων. Η απόσβεση μπορεί να επιτευχθεί και με τη σωστή οδήγηση των ρευμάτων εισόδου από τον αντιστροφέα. Αυτό οδηγεί σε πιο συμπαγή και μικρό δρομέα, σε σχέση με αυτόν με δρομέα κλωβού.



Σχήμα 3. 14 Σύγχρονος κινητήρας line-start με δρομέα κλωβού για απόσβεση

Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται η απόσβεση σε σύγχρονο κινητήρα μονίμων μαγνητών αξίζει να σχολιαστεί. Η μηχανή με τυλίγματα απόσβεσης λειτουργεί με τρόπο τέτοιο ώστε να καταστέλλει τις ταλαντώσεις χωρίς εξωτερική ανατροφοδότηση (feedback). Το feedback δημιουργείται εσωτερικά μέσω της επαγόμενης ΗΕΔ λόγω της ταχύτητας ολίσθησης στο τύλιγμα κλωβού. Από την άλλη, για οδήγηση ελεγχόμενη από αντιστροφέα, ο έλεγχος ξεκινά από εξωτερικό σήμα ή μεταβλητή ανατροφοδότησης για να αντισταθμίσει τις ταλαντώσεις. Επομένως, η εξάρτηση από βρόχο ανατροφοδότησης μειώνει την αξιοπιστία. Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η αξιοπιστία ελέγχου ροπής ή θέσης είναι σημαντική, ο σύγχρονος κινητήρας με τύλιγμα απόσβεσης αποτελεί έξυπνη επιλογή. Για παράδειγμα, αν το φορτίο μπορεί να υπομείνει σταθερή ταχύτητα τότε για περιπτώσεις αποτυχίας του αντιστροφέα είναι δυνατόν να παρακαμφθεί (by-pass) και να συνδεθεί ο κινητήρας με τυλίγματα απόσβεσης, με τη συχνότητα της πηγής. Τότε η μηχανή ξεκινά ως μηχανή επαγωγής και στη συνέχεια λειτουργεί στη σύγχρονη ταχύτητα. Σημειώνεται ότι η ταχύτητα της μηχανής καθορίζεται από τη συχνότητα του στάτη και λειτουργεί σε συγκεκριμένη ταχύτητα μόνο. Αυτό είναι επιθυμητό σε μερικές περιπτώσεις όπου δεν προτιμάται να σταματήσει η μηχανή σε περίπτωση αποτυχίας της λειτουργίας του αντιστροφέα.[4]



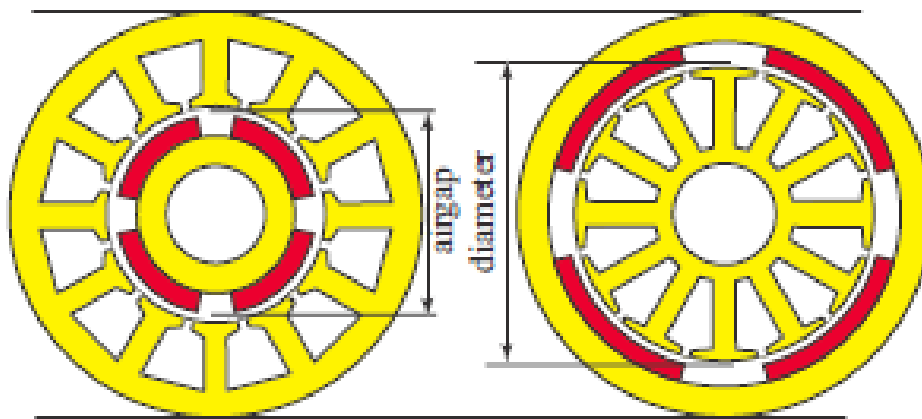
### 3.5.3 Τοπολογία εξωτερικού δρομέα

Πολλές εφαρμογές απαιτούν χαμηλές στροφές και υψηλή ροπή. Συνήθως, μηχανές των 1000 έως 3000rpm συνδέονται με κιβώτια ταχυτήτων ώστε να επιτευχθεί το αποτέλεσμα της χαμηλής ταχύτητας και υψηλής ροπής. Από την άλλη, οι κινητήρες μονίμων μαγνητών παρέχουν τη δυνατότητα της απαλοιφής του κιβωτίου ταχυτήτων, αφού μπορούν να στρέφονται σε χαμηλές ταχύτητες αποδίδοντας την επιθυμητή ροπή. Με τη διάταξη του εξωτερικού δρομέα μπορεί να επιτευχθεί αυτή η υλοποίηση.

Η άμεση οδήγηση παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την οδήγηση με κιβώτιο μετάδοσης, περισσότερα από τα οποία οφείλονται στην απλοποίηση του συστήματος μετάδοσης. Μερικά από αυτά είναι:

- Μειωμένη συντήρηση – ένα κιβώτιο ταχυτήτων απαιτεί συντήρηση, όπως συνεχή λίπανση για την ελαχιστοποίηση των τριβών.
- Υψηλότερη αξιοπιστία – χωρίς κιβώτιο, κάποια σημαντικά αίτια σφαλμάτων αποφεύγονται και το σύστημα κίνησης μπορεί να έχει μεγαλύτερη ζωή.
- Μειωμένος θόρυβος – το κιβώτιο, καθώς και άλλα μηχανικά μέρη του συστήματος μετάδοσης της κίνησης όπως είναι οι μάντες είναι πηγές θορύβου. Με την ελαχιστοποίηση αυτών των μερών επιτυγχάνεται και λιγότερος θόρυβος.
- Υψηλότερη απόδοση – η αφαίρεση του κιβωτίου έχει σαν αποτέλεσμα και τη μείωση των απωλειών μετάδοσης, οι οποίες κατά κύριο λόγο προέρχονται από τις τριβές ανάμεσα στα γρανάζια.
- Μειωμένο βάρος συστήματος – είναι προφανές ότι η εξάλειψη του κιβωτίου συντελεί σε συνολικά ελαφρύτερο σύστημα.[4]
- Ευκολία κατασκευής γιατί συγκεκριμένα για τις μηχανές με μη επικαλυπτόμενα συγκεντρωμένα τυλίγματα, η τοπολογία εξωτερικού δρομέα εξασφαλίζει μεγαλύτερη ευκολία στο τύλιγμα, καθώς τα δόντια εξέχουν (εξωτερικά και όχι εσωτερικά), ειδικά για ανοιχτές αύλακες.[4]
- Οι μηχανές με εξωτερικό δρομέα έχουν συνήθως μεγαλύτερη διάμετρο διακένου από τις μηχανές με εσωτερικό δρομέα και ίδια εξωτερική διάμετρο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.15. Δεδομένου ότι η ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου του διακένου, οι διαστάσεις και γενικά το βάρος της μηχανής εξωτερικού δρομέα μπορεί να είναι μειωμένο.

- Σχετικά με την τοποθέτηση των μαγνητών, οι επιφανειακοί μαγνήτες υπόκεινται σε φυγόκεντρους δυνάμεις, οι οποίες είναι ανάλογες της ακτίνας και της ταχύτητας. Αν ο δρομέας είναι εσωτερικός, οι φυγόκεντρες δυνάμεις τείνουν να αποκολλήσουν το μαγνήτη και άρα απαιτείται κάποιο επιπλέον κράτημα. Αντιθέτως, στην τοπολογία εξωτερικού δρομέα δεν υπάρχει αυτός ο κίνδυνος, καθώς οι μόνιμοι μαγνήτες πιέζονται επάνω στο σώμα του δρομέα.[5]



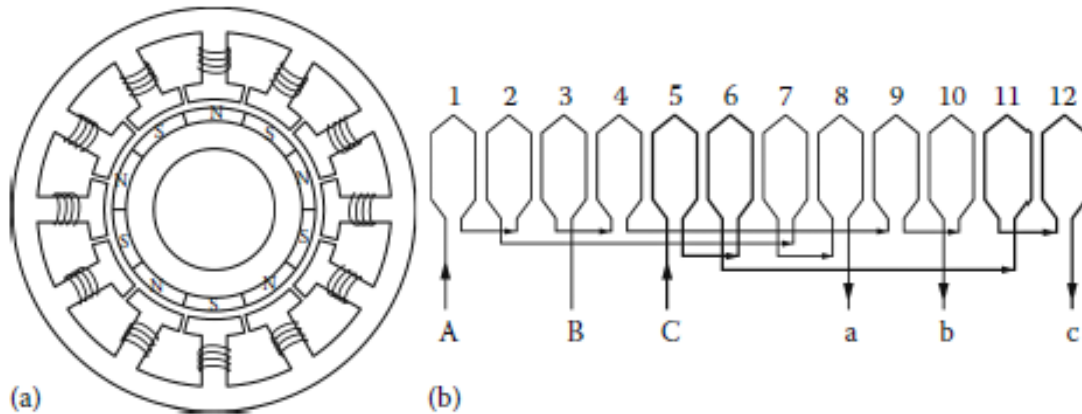
Σχήμα 3. 15 Μηχανή με εσωτερικό δρομέα (αριστερά) και εξωτερικό δρομέα (δεξιά)

### 3.5.4 Κινητήρες μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένο τύλιγμα

Κάποια από τα πλεονεκτήματα του συγκεντρωμένου τυλίγματος σε σχέση με το κατανεμημένο τύλιγμα είναι τα παρακάτω:

1. Ευκολία στην κατασκευή.
2. Δεν υπάρχουν αμοιβαίες αυτεπαγωγές ανάμεσα στις φάσεις, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανοχή στα σφάλματα.
3. Χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης, αφού περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό κύκλων ευθυγράμμισης ανά μηχανική περιστροφή.
4. Δεν υπάρχει απαίτηση για μεγάλα άκρα τυλίγματος λόγω του συγκεντρωμένου τυλίγματος πράγμα το οποίο συμβάλλει σε μειωμένες απώλειες χαλκού.
5. Υψηλή αυτεπαγωγή ευθέως άξονα που επιτρέπει χαμηλότερα ρεύματα να αντισταθμίζουν τη μαγνητική ροή, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο εύρος εξασθένισης πεδίου (flux weakening), ιδιότητα πολύ σημαντική για εφαρμογές ηλεκτρικών

οχημάτων και συγκεκριμένα για επίτευξη υψηλού εύρους στροφών σταθερής ισχύος (CPSR-Constant Power Speed Range).



Σχήμα 3. 16 (α)Μηχανή 10 πόλων και 12 δοντιών με συγκεντρωμένο τυλίγμα, γύρω από κάθε δόντι (β) Η αναπαράσταση του τυλίγματος.[4]

### Κλασματικό βήμα

Στην περίπτωση που ο αριθμός αυλακών ανά πόλο ανά φάση δεν είναι ακέραιος αριθμός, αλλά κλασματικός, αυτό σημαίνει ότι τα πηνία έχουν τοποθετηθεί με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι πιο ‘κοντά’ σε μήκος. Για παράδειγμα, σε μια μηχανή με 12 αύλακες στο στάτη, το πηνίο που ξεκινά από την αύλακα 1 θα έπρεπε να καταλήγει στην αύλακα 7, αν το τυλίγμα είναι πλήρους βήματος (A -C B -A C -B A) για τριφασική μηχανή. Όμως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17 αντί να καταλήγει στην αύλακα 7, καταλήγει στην αύλακα 6. Αυτό σημαίνει ότι αντί το βήμα του πηνίου να είναι  $\frac{6}{6} \cdot 180^\circ = 180^\circ$  είναι  $\frac{5}{6} \cdot 180^\circ = 150^\circ$ . Δηλαδή είναι κλασματικού βήματος 5/6.

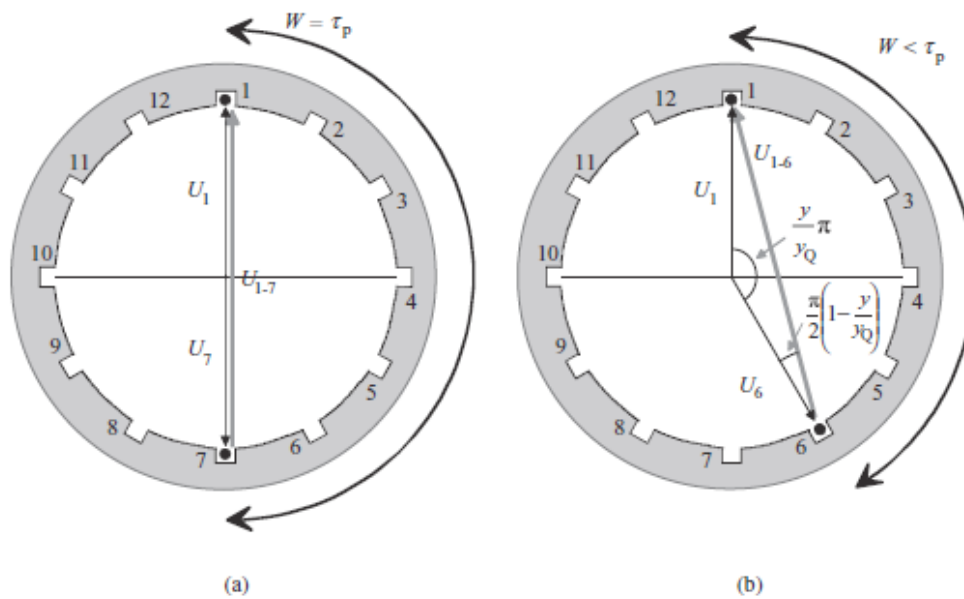
Η μείωση που παρατηρείται στην αντι-ΗΕΔ λόγω κλασματικού βήματος οφείλεται στο συντελεστή βήματος τυλίγματος, ο οποίος σε αυτήν την περίπτωση είναι μικρότερος της μονάδας και ίσος με:

$$k_{pn} = \sin\left(\frac{n \cdot \text{εύρος πηνίου}}{2}\right) \quad (3.39)$$

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το εύρος του πηνίου βρέθηκε ίσο με  $150^\circ$ , επομένως ο συντελεστής τυλίγματος, για τη θεμελιώδη συνιστώσα, ισούται με:

$$k_{p1} = 0.966$$

Από τη Σχέση 3.39 φαίνεται επίσης ότι με το κατάλληλο κλασματικό βήμα δύναται να εξαλειφθεί οποιαδήποτε αρμονική. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, οι αρμονικές 5<sup>ης</sup> και 7<sup>ης</sup> τάξης έχουν συντελεστή βήματος τυλίγματος 0.259, σε αντίθεση με τη μονάδα που εμφανίζουν στο πλήρες βήμα.



Σχήμα 3. 17 Αναπαράσταση της ίδιας τοπολογίας με (α)τύλιγμα πλήρους βήματος (β)τύλιγμα κλασματικού βήματος

Υπάρχει και ένας άλλος συντελεστής που οφείλεται στο γεγονός ότι τα πηνία διανέμονται στο χώρο με διαφορά το εύρος της αύλακας και ονομάζεται συντελεστής πλάτους τυλίγματος (distribution factor). Δίνεται από τη σχέση:

$$k_{dn} = \frac{\sin(nm \frac{a}{2})}{m \cdot \sin(\frac{a}{2})} \quad (3.40)$$

$n$  η τάξη της αρμονικής

$m$  ο αριθμός πηνίων ανά φάση

α το βήμα της αύλακας

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα, όπου υπάρχουν δύο πηνία ανά φάση και το βήμα της αύλακας είναι  $30^\circ$  ο συντελεστής πλάτους προκύπτει ίσος με 0.966.

Τελικά, συνδυάζονται οι δύο παραπάνω συντελεστές και προκύπτει ο συντελεστής τυλίγματος:

$$k_{w1} = k_{b1} \cdot k_{p1} = 0.933$$

Για τριφασική μηχανή μονίμων μαγνητών, η ενεργός τιμή της επαγόμενης αντι-ΗΕΔ ανοιχτού κυκλώματος είναι:

$$E_b = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot (k_{w1} \cdot N_{ph}) \cdot \varphi_{m1} \cdot f \quad (3.41)$$

$k_{w1}$  θεμελιώδης συντελεστής τυλίγματος

$N_{ph}$  συνολικά εν σειρά ελίγματα φάσης

$\varphi_{m1}$  θεμελιώδης ροή λόγω μαγνήτη

$f$  ηλεκτρική συχνότητα ρευμάτων στάτη

Υπάρχουν αρκετά συμπεράσματα που προκύπτουν σχετικά με το κλασματικό βήμα και μερικά από αυτά περιγράφονται στη συνέχεια, ενώ τα περισσότερα θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο 4. Λόγω του κλασματικού βήματος, μειώνεται το συνολικό μήκος των πηνίων και άρα η απαιτούμενη ποσότητα χαλκού. Από την άλλη, μειώνεται και η ροή που συνδέει το πηνίο με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός σπειρών απ' ότι στο πλήρες βήμα, για το ίδιο επίπεδο τάσης. Βέβαια, συνολικά έχει μεγαλύτερη σημασία το μικρότερο μήκος των πηνίων και χρησιμοποιείται τελικά μικρότερη ποσότητα χαλκού.

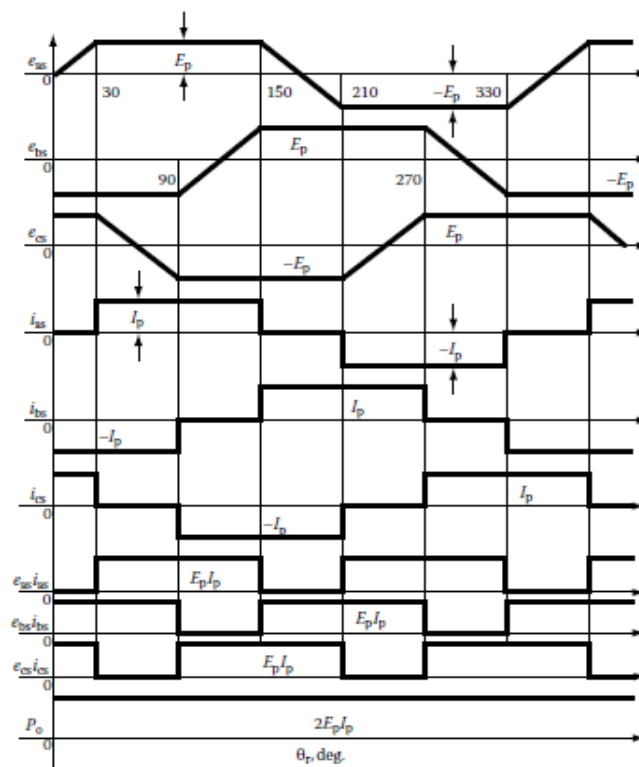
Επηρεάζεται, επίσης, το αρμονικό περιεχόμενο της μαγνητικής ροής του διακένου. Με σωστή επιλογή και υλοποίηση του κλασματικού βήματος επιτυγχάνεται περισσότερο ημιτονοειδής κατανομή του ρεύματος σύνδεσης (current linkage). Επιπλέον, παρατηρείται περισσότερο ημιτονοειδής κατανομή της ΗΕΔ.[20]

### 3.5.5 Είδη κινητήρων μονίμων μαγνητών

Οι κινητήρες μονίμων μαγνητών κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την κατανομή των επαγόμενων ηλεκτρεγερτικών τους δυνάμεων, που είναι είτε ημιτονοειδείς, για σύγχρονους κινητήρες μονίμων μαγνητών PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor), είτε τραπεζοειδείς, για κινητήρες ΣΡ μονίμων μαγνητών χωρίς συλλέκτη (Permanent Magnet Brushless dc).

Παρά το γεγονός ότι οι τραπεζοειδείς ΗΕΔ έχουν σταθερό πλάτος για 120 ηλεκτρικές μοίρες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.18, η ισχύς εξόδου δύναται να προκύψει ομοιόμορφη διεγείροντας τις φάσεις του δρομέα με ρεύματα με διαδοχή 120°. Τα ρεύματα απαιτούν κάποιο χρόνο για να αυξομειώνονται και γι' αυτό κατά τη λειτουργία εμφανίζονται παλμοί ισχύος κατά την αύξηση και το μηδενισμό των ρευμάτων για κάθε μισό κύκλου. Οι αρνητικές συνέπειες αυτού δεν εμφανίζονται για ημιτονοειδείς ΗΕΔ, καθώς και τα ρεύματα είναι ημιτονικά χωρίς βηματικές αλλαγές.

Γενικά, οι PM brushless dc κινητήρες έχουν 15% περισσότερη πυκνότητα ισχύος από τις σύγχρονες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο λόγος της ενεργού (rms) προς τη μέγιστη (peak) τιμής της πυκνότητας ροής στην brushless dc είναι μεγαλύτερη από της σύγχρονης.



Σχήμα 3. 18 Κυματομορφές για τον κινητήρα μονίμων μαγνητών ΣΡ χωρίς συλλέκτη

Ο λόγος των ισχύων εξόδου των δύο μηχανών μπορεί να προκύψει με τον παρακάτω τρόπο, θεωρώντας ίσες απώλειες χαλκού στάτη. Αν είναι  $I_{ps}$  και  $I_p$  οι peak τιμές των ρευμάτων του στάτη στη σύγχρονη και brushless dc μηχανή αντίστοιχα, τότε οι rms τιμές των ρευμάτων αυτών δίνονται από τη σχέση:

$$I_{sy} = \frac{I_{ps}}{\sqrt{2}}$$

$$I_d = I_p \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (3.42)$$

Εξισώνοντας τις απώλειες χαλκού και αντικαθιστώντας τις μέγιστες τιμές των ρευμάτων εξάγεται η σχέση:

$$3 \cdot I_{sy}^2 \cdot R_a = 3 \cdot I_d^2 \cdot R_a \quad (3.43)$$

Αντικαθιστώντας τις rms τιμές, προκύπτει:

$$3 \cdot \left(\frac{I_{ps}}{\sqrt{2}}\right)^2 \cdot R_a = 3 \cdot \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_p\right)^2 \cdot R_a \quad (3.44)$$

Τελικά, για τις peak τιμές των ρευμάτων ενός σύγχρονου και ενός brushless dc κινητήρα είναι:

$$I_p = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{ps} \quad (3.45)$$

Οι peak τιμές των επαγόμενων ΗΕΔ και στα δύο είδη κινητήρων είναι ίσες και παριστάνονται με  $E_p$ . Από τις κυματομορφές στο Σχήμα 3.18 της διέγερσης της brushless dc μηχανής, φαίνεται ότι μόνο οι δύο φάσεις άγουν ρεύμα για οποιαδήποτε στιγμή, άρα στην ισχύ εξόδου συμβάλλουν μόνο δύο φάσεις, για δεδομένη χρονική στιγμή. Αντιθέτως, στη σύγχρονη οι φάσεις διαρρέονται όλες από ρεύμα, δηλαδή στην ισχύ εξόδου συμβάλλουν και οι τρεις.

Ο λόγος των ισχύων εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \text{power output ratio} &= \frac{\text{PM dc brushless power}}{\text{PM synchronous power}} = \frac{2 \cdot E_p \cdot I_p}{3 \cdot \frac{E_p}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{ps}}{\sqrt{2}}} \\ &= \frac{2 \cdot E_p \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{ps}}{3 \cdot \frac{E_p \cdot I_{ps}}{2}} = 1.1547 \end{aligned} \quad (3.46)$$

Να σημειωθεί ότι ο παραπάνω λόγος έχει εξαχθεί θεωρώντας συντελεστή ισχύος στη σύγχρονη μηχανή ίσο με τη μονάδα.

Επιπλέον από την κυματομορφή της brushless dc φαίνεται ότι ο έλεγχος είναι απλός αν είναι δεδομένη η απόλυτη θέση του δρομέα. Για να είναι γνωστή η θέση του δρομέα θα πρέπει να είναι γνωστό το πεδίο του δρομέα και η επαγόμενη ΗΕΔ, άρα απαιτείται η οδήγηση με κατάλληλα ρεύματα στάτη.

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά αυτής της μηχανής είναι τα παρακάτω:

- Για ίσες θερμικές απώλειες έχει 15.4% μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος από τη σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών.
- Το duty cycle του φασικού ρεύματος είναι μόνο 2/3 αυτού της PMSM. Αυτή η ιδιότητα συνεπάγεται ότι άγουν μόνο δύο τρανζίστορ του αντιστροφέα σε σχέση με τρία στην οδήγηση της PMSM. Επίσης, παρέχεται επαρκής χρόνος για την ψύξη των συσκευών του αντιστροφέα και αυτό αυξάνει τη θερμική αξιοπιστία του αντιστροφέα.
- Τα τραπεζοειδή ρεύματα μπορούν να έχουν μεταβλητή συχνότητα και άρα ευκολότερα στη σύνθεση, σε σχέση με τα ημιτονοειδή μεταβλητής συχνότητας.
- Η πολυπλοκότητα της εγκατάστασης των αισθητήρων θέσης για την brushless dc, που είναι συνήθως αισθητήρες Hall είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την εγκατάσταση encoder θέσης που απαιτούν οι κινητήρες PMSM.
- Ένα σημαντικό, βέβαια, μειονέκτημα είναι το μεγάλο ποσοστό της κυμάτωσης της ροπής, που οφείλεται στις αποκλίσεις της επαγόμενης ΗΕΔ από την καθαρά τραπεζοειδή μορφή. Στις εφαρμογές χαμηλής απόδοσης η κυμάτωση της ροπής δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο, αλλά δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή σε καμία περίπτωση για εφαρμογές υψηλής απόδοσης και απαιτείται η εφαρμογή μεθόδων περιορισμού της κυμάτωσης αυτής.[4]



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ 670 WATT

#### 4.1 Προδιαγραφές κινητήρα

Η απαίτηση για όχημα χαμηλών απωλειών υποδεικνύει την κατασκευή ενός κινητηρίου συστήματος υψηλής απόδοσης, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, το οποίο να απαιτεί ταυτόχρονα χαμηλή ισχύ. Για λόγους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο έχει επιλεχθεί η προσαρμογή του κινητήρα στον τροχό ώστε να αποφευχθεί το κιβώτιο μετάδοσης, καθώς και οι επιπλέον απώλειες που αυτό συνεπάγεται. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο και ο υφιστάμενος κινητήρας, αλλά και ο καινούργιος έχουν κατασκευαστεί με εξωτερικό δρομέα.

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, το όχημα καλείται να διανύσει περίπου 25 km σε πίστα χωρίς κλίση στο μέγιστο χρόνο των 51 λεπτών. Αυτό ισοδυναμεί με μέση ταχύτητα 29.4 km/h, δηλαδή περίπου 30 km/h. Βέβαια, για να αντισταθμιστεί ο χρόνος της εκκίνησης, θα πρέπει η ταχύτητα στη διάρκεια του αγώνα να κυμαίνεται από 30 km/h έως 35 km/h. Η εκκίνηση θα πρέπει να γίνει ομαλά, όπως και κάθε είδους επιτάχυνση ή επιβράδυνση κατά τη διάρκεια του αγώνα, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών και για αυτό το λόγο θα πρέπει να αυξηθεί η μέση ταχύτητα για το υπόλοιπο μέρος της διαδρομής.

#### Εκτίμηση γωνιακής ταχύτητας περιστροφής και στροφών

Δεδομένου ότι ο κινητήρας βρίσκεται εσωτερικά του τροχού, η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του τροχού ταυτίζεται με τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Για τον υπολογισμό της γωνιακής αυτής ταχύτητας λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω μεγέθη:

- Η μέση ταχύτητα του οχήματος  $v_{mean} = \frac{35}{3.6} m/sec$
- Η ακτίνα του κινητηρίου τροχού  $r = 0.234 m$

Τελικά, προκύπτει η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής:

$$\omega_{rm} = \frac{v_{mean}}{r} = 41.55 \text{ rad/sec} \quad (4.1)$$

Από τη γωνιακή ταχύτητα υπολογίζονται και οι ονομαστικές στροφές:

$$\omega_{rm} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \Rightarrow n = \frac{\omega_{rm} \cdot 60}{2 \cdot \pi} \Rightarrow n = 400 \text{ rpm ή ΣΑΛ} \quad (4.2)$$

### Εκτίμηση ονομαστικής ροπής και ισχύος

Δεδομένων των προβλημάτων εκκίνησης του υφιστάμενου οχήματος, του οποίου ο κινητήρας είχε ονομαστική ροπή 10 Nm, και μέγιστη ροπή 16 Nm, ο καινούργιος κινητήρας υπερδιαστασιολογήθηκε, ώστε να εξασφαλιστεί η σίγουρη απόδοση της επιθυμητής ροπής.

Η σχεδίαση του νέου κινητήρα βασίστηκε στην απόδοση ονομαστικής ροπής περί τα 16 Nm. Για τις συνθήκες ταξιδιού, βέβαια, απαιτήθηκαν μόλις 2 Nm αλλά, όπως προαναφέρθηκε, η υπερδιαστασιολόγηση πραγματοποιήθηκε για λόγους σίγουρης επίδοσης.

$$T_{el} = 16 \text{ Nm} \quad (4.3)$$

Έτσι, λοιπόν, η ονομαστική ισχύς είναι:

$$P_{el} = T_{el} \cdot \omega_{rm} = 670 \text{ Watt} \quad (4.4)$$

## 4.2 Προκαταρκτική Σχεδίαση

Η προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα με βάση τα μαγνητικά μεγέθη περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Προσδιορισμό της επιφάνειας του διακένου, που θα εξασφαλίζει την απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική ροπή σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας.
- Προσδιορισμό των διαμορφώσεων του δρομέα και του στάτη, που επιτρέπουν τη δημιουργία κατάλληλου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο.
- Έλεγχος των μαγνητικών και ηλεκτρικών ειδικών φορτίσεων.

- Εύρεση απωλειών σιδήρου και χαλκού.

#### 4.2.1 Διαστασιολόγηση διακένου

Η ροπή διακένου  $T_e$  μπορεί να υπολογισθεί με βάση τη μέση εφαπτομενική πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο και την επιφάνεια του διακένου  $A$ , σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις (όπου  $D$  είναι η διάμετρος του διακένου και  $L$  το ενεργό μήκος της μηχανής):

$$F_t = P_t \cdot A$$

$$T_e = \frac{1}{2} \cdot D \cdot F_t \quad (4.5)$$

$$T_e = \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot L \cdot P_t$$

Επίσης, η δύναμη του διακένου δίνεται μέσω της σχέσης:

$$F_t = L \cdot \oint_C B_n \cdot H_t \cdot dc \Rightarrow F_t = \frac{L}{\mu_0} \cdot \oint_C B_n \cdot B_t \cdot dc \quad (4.6)$$

Τελικά προκύπτει ότι:

$$P_t = \frac{1}{\pi \cdot D \cdot \mu_0} \cdot \oint_C B_n \cdot B_t \cdot dc \quad (4.7)$$

Ως μέση επαγωγή διακένου λαμβάνεται η τιμή των 0.7T, ώστε να υπάρχουν μικρές απώλειες σιδήρου στο στάτη. Θεωρώντας ότι:

$$B_n = B_t = \frac{0.7 \cdot \sqrt{2}}{2} = 0.495 \text{ T} \quad (4.8)$$

, η επιφανειακή πίεση είναι:

$$P_t = \frac{0.42^2}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 194.97 \text{ kN/m}^2 \quad (4.9)$$

Τέλος, αντικαθιστώντας στην τελική Σχέση 4.5, προκύπτει:

$$D^2 \cdot L = 52.24 \text{ cm}^3 \quad (4.10)$$

Η τελική διαστασιολόγηση του διακένου προκύπτει από τη διενέργεια της πεδιακής μελέτης και λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς που θέτει η κατασκευή του κινητήρα. Γνωρίζοντας τις διαστάσεις και του υφιστάμενου κινητήρα, ο οποίος είχε κατασκευαστεί για την ίδια εφαρμογή, είναι λογικό να κινηθούν και οι διαστάσεις του νέου κινητήρα στα ίδια πλαίσια. Συγκεκριμένα, είχε επιλεγεί το ζεύγος τιμών  $Lg=3 \text{ cm}$  ,  $D= 15 \text{ cm}$ . Στην παρούσα φάση, όπου σκοπός είναι η κατασκευή ενός βελτιωμένου κινητήρα, πράγμα το οποίο σημαίνει και μικρότερου σε βάρους, επιλέγονται κοντινές διαστάσεις, οι οποίες προκύπτουν ύστερα από δοκιμές:

$$\begin{aligned} L &= 20\text{mm} \\ D &= 170\text{mm} \end{aligned} \quad (4.11)$$

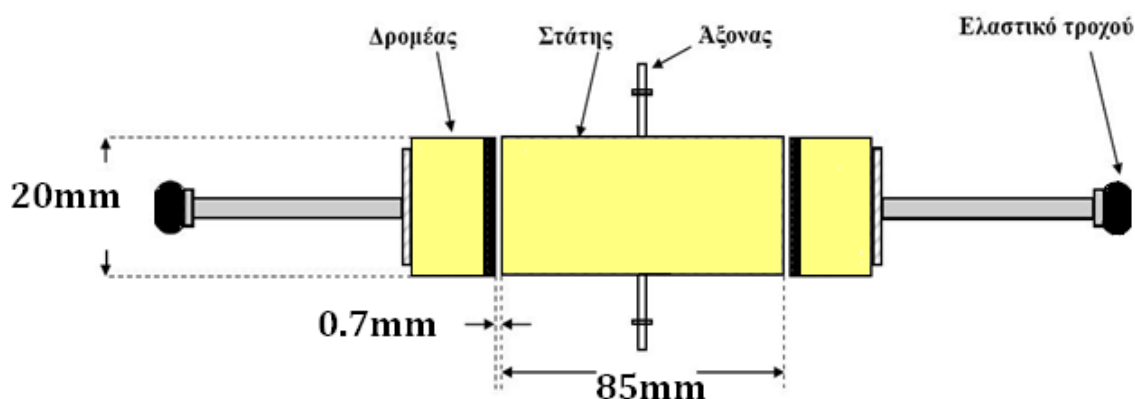
Υπολογίζεται ο λόγος:

$$\frac{Lg}{\tau} = \frac{20 \cdot 10}{170 \cdot \pi} = 0.38 \quad (4.12)$$

Η τιμή του λόγου είναι λογική, διότι πρόκειται για κινητήρα μικρής ισχύος (μικρότερη από 1kW).

Το πλάτος του διακένου θα πρέπει να έχει την ελάχιστη δυνατή τιμή. Εκτιμάται ότι το ελάχιστο διάκενο που μπορεί να επιτευχθεί κατά την κατασκευή είναι:

$$g = 0.7\text{mm} \quad (4.13)$$



Σχήμα 4. 1 Διαστάσεις του κινητήρα με εξωτερικό δρομέα

#### 4.2.2 Μελέτη στάτη

Η επιλογή ονομαστικής συχνότητας λειτουργίας και αριθμού πόλων σχετίζεται με τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής στη μόνιμη κατάσταση:

$$\omega_{rm} = \frac{4 \cdot \pi \cdot f_{el}}{P} \quad (4.14)$$

$P$  ο αριθμός των πόλων του κινητήρα

$f_{el}$  η συχνότητα λειτουργίας.

Λύνοντας ως προς το λόγο  $P/f$ , προκύπτει η σχέση των πόλων με τη συχνότητα λειτουργίας:

$$\frac{P}{f_{el}} = 0.302 \quad (4.15)$$

Οι απώλειες πυρήνα αυξάνονται αυξανόμενης της συχνότητας και επιλέγεται η λειτουργία του κινητήρα να παραμείνει σε συχνότητα χαμηλότερη των 50 Hz με παράλληλη χρήση λαμαρίνας χαμηλών ειδικών απωλειών. Το κάτω όριο συχνότητας τίθεται για λόγους αξιοποίησης υλικού στα 20 Hz περίπου. Επίσης, με δεδομένο τον τρόπο κατασκευής του κινητήρα και τις προβλεπόμενες διαστάσεις, ο αριθμός των πόλων δεν

μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος. Ένα αποδεκτό ζεύγος τιμών (P,f) είναι επομένως, 10 πόλοι και συχνότητα 33 Hz.

Η μέση ροή ανά πόλο υπολογίζεται από τον τύπο (3.1):

$$\Phi = \frac{B_{av} \cdot \pi \cdot L \cdot D}{P} = \frac{0.7 \cdot \pi \cdot 20mm \cdot 170mm}{10} = 0.75 \text{ mWb} \quad (4.16)$$

Για τους παρακάτω υπολογισμούς πρέπει να γίνει πρώτα μια εκτίμηση του επίπεδου τάσεως που παρέχεται από την πηγή στους ακροδέκτες του κινητήρα. Η rms τιμή της φασικής τάσης, λαμβάνοντας υπ' όψιν την πηγή και τον μετατροπέα είναι  $e = 25 \text{ V}$ .

Οι σπείρες των πηνίων κάθε φάσης δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$N_i = \frac{e}{4.44 \cdot f \cdot \frac{P}{2} \cdot \Phi} = 92 \quad (4.17)$$

Η ενεργός τιμή του ρεύματος δίνεται από τη σχέση:

$$I_{rms} = \frac{P_{el}}{3 \cdot e \cdot \cos \varphi} = 10.63A \quad (4.18)$$

, όπου έγινε η υπόθεση πως ο κινητήρας λειτουργεί με συντελεστή ισχύος 0.7 επαγωγικό.

Η μαγνητεγερτική δύναμη δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$ME\Delta = I_{rms} \cdot N_i = 980 \text{ A} - \varepsilon \quad (4.19)$$

Η αναγκαία διατομή αύλακος που θα δημιουργήσει την παραπάνω MEΔ υπολογίζεται με κριτήριο τη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος, η οποία ισούται με  $J = 4 \text{ A/mm}^2$ . Συνεπώς, η ελάχιστη ενεργή διατομή αύλακος υπολογίζεται ως εξής:

$$A_{Cu} = \frac{ME\Delta}{J} = 245 \text{ A/mm}^2 \quad (4.20)$$

Θεωρώντας συντελεστή αξιοποίησης της αύλακος ίσο με 0.6, η συνολική διατομή κάθε αύλακας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον:

$$A_{slot} = \frac{A_{Cu}}{0.6} = 408 \text{ mm}^2 \quad (4.21)$$

### Υπολογισμός ειδικών φορτίσεων

Όσο αφορά την ειδική μαγνητική φόρτιση, αυτή έχει καθοριστεί να είναι

$$B_{av} = 0.7T \quad (4.22)$$

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση υπολογίζεται ως εξής:

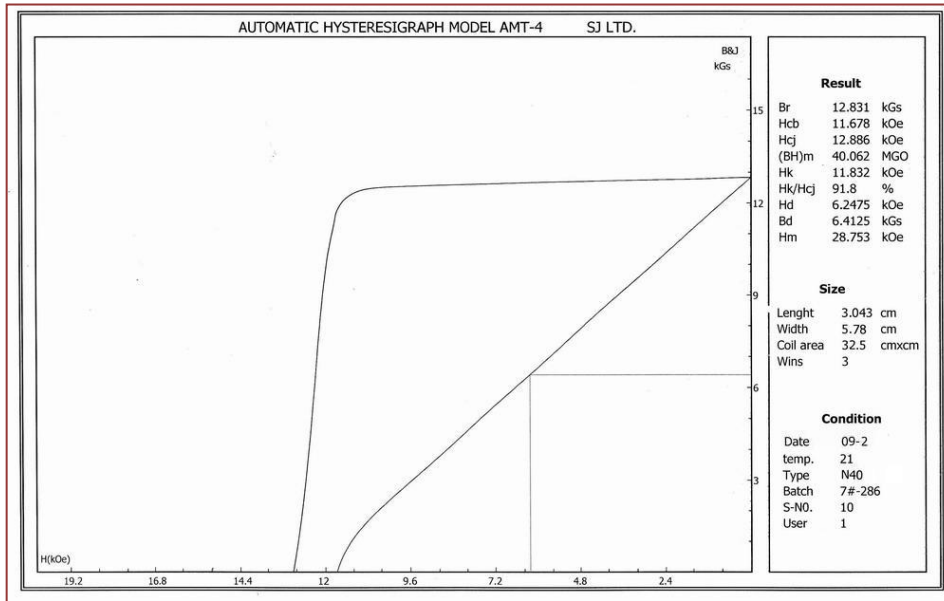
$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_i \cdot P / 2 \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D} = 10992 \text{ A} \cdot \varepsilon / m \quad (4.23)$$

### 4.2.3 Μελέτη δρομέα

Η γεωμετρική διαμόρφωση του δρομέα καθορίζεται από την ανάγκη για χαμηλές απώλειες πυρήνα και δινορρευμάτων. Επιλέγεται δρομέας επιφανειακών μαγνητών γιατί παρουσιάζει αμελητέες απώλειες πυρήνα, καθώς ο επιφανειακός μαγνήτης επιβάλλει σχεδόν σταθερή μαγνητική επαγωγή στο σώμα του σιδήρου. Οι μαγνήτες κράματος Νεοδυμίου – Σιδήρου – Βορίου (NdFeB) επιλέγονται ως υλικό, γιατί έχουν τη μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από τις υπόλοιπες εναλλακτικές του εμπορίου. Παρουσιάζουν μέτρια θερμοκρασιακή συμπεριφορά, αλλά στη συγκεκριμένη εφαρμογή υψηλής απόδοσης δεν αναμένονται υψηλές θερμοκρασίες.

Οι διαστάσεις που θα πρέπει να έχουν οι μαγνήτες και τα κριτήρια με τα οποία θα γίνει επιλογή, περιγράφονται σε επόμενη ενότητα. Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι η καλή αξιοποίηση του μαγνήτη έγκειται στη λειτουργία του σε περιοχή κοντά στο σημείο μέγιστης ενέργειας στην καμπύλη απομαγνήτισης. Η καμπύλη απομαγνήτισης των μαγνητών αυτών είναι σχεδόν ευθεία γραμμή, όπως εξηγήθηκε και στο Κεφάλαιο 3, διευκολύνοντας τον υπολογισμό του σημείου που αποδίδουν τη μέγιστη ενέργεια, αρκεί να είναι γνωστά η παραμένουσα μαγνήτιση,  $B_r$ , και το μαγνητικό πεδίο επαναφοράς,  $H_c$ .

Ο μαγνήτης δίνει τη μέγιστη ενέργεια όταν  $B_d = 0.64 \text{ T}$  και  $H_d = 497 \text{ kA/m}$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Αυτή θα πρέπει να είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνήτη κατά την ονομαστική λειτουργία του κινητήρα. Άρα, στο κενό φορτίο, η μαγνητική επαγωγή θα πρέπει να είναι λίγο αυξημένη, έστω  $B_{nl} = 0.7 \text{ T}$ .



Σχήμα 4. 2 Καμπύλη απομαγνήτισης μαγνητών N40

Για επαλήθευση, λογαριάζεται μέσω της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης και της καμπύλης απομαγνήτισης ποια θα είναι η επιρροή του πεδίου του στάτη στη μαγνητική επαγωγή του μαγνήτη. Συγκεκριμένα, η ειδική ηλεκτρική φόρτιση είναι:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_i \cdot P / 2 \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D} = 109920 \text{ A} - \varepsilon / m \quad (4.24)$$

Θεωρώντας την καμπύλη απομαγνήτισης ως ευθεία γραμμή, έχουμε την εξής εξίσωση περιγραφής της:

$$H \quad H(B) = \frac{929.3}{1.28} \cdot B - 929.3 = 726 \cdot B - 929.3 \quad (4.25)$$



, όπου H σε kA/m και B σε Tesla.

Με χρήση της παραπάνω εξίσωσης συσχετισμού μαγνητεγερτικής δύναμης και πυκνότητας μαγνητικής ροής, συμπεραίνεται ότι στην ονομαστική φόρτιση η πυκνότητα μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνήτη μειώνεται κατά:

$$\Delta B = \frac{ac}{726} = 0.151 \quad (4.26)$$

Επομένως, σε κάθε περίπτωση, ο μαγνήτης θα χρησιμοποιείται κοντά στο σημείο μέγιστης ενέργειας, με περιθώριο μικρής αύξησης της ενέργειάς του ακόμα και σε περίπτωση υπερφόρτισης.

### 4.3 Επιλογή τύπου τυλίγματος, αριθμού πόλων και αριθμού αυλακών

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, οι κινητήρες μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένα μη επικαλυπτόμενα τυλίγματα κλασματικού βήματος παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους κινητήρες κατανεμημένου τυλίγματος πλήρους βήματος. Τέτοια πλεονεκτήματα είναι τα κοντά άκρα τυλίγματος, η χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης, η ημιτονοειδής ηλεκτρεγερτική δύναμη, η επίτευξη μεγαλύτερου συντελεστή πληρότητας και η κατασκευαστική ευκολία.

Έτσι, λοιπόν, σε αρχικό στάδιο της σχεδίασης του κινητήρα έχει επιλεγεί η υλοποίηση συγκεντρωμένου τυλίγματος κλασματικού βήματος διότι με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αποφευχθεί και η τοπολογία πεπλατυσμένων δοντιών του στάτη. Αυτό, βέβαια, θα επιβεβαιωθεί και στη συνέχεια, όπου γίνεται υπολογισμός της ροπής ευθυγράμμισης.

Στη συνέχεια, γίνεται η επιλογή του αριθμού στρώσεων του τυλίγματος. Υπάρχουν τα τυλίγματα απλής στρώσης, στα οποία τα πηνία τυλίγονται γύρω από εναλλασσόμενα δόντια, καθώς και διπλής στρώσης, όπου τα πηνία τυλίγονται γύρω από κάθε δόντι. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η σύγκριση του τυλίγματος απλής στρώσης με το τύλιγμα διπλής στρώσης. [5]

	<b>Τύλιγμα απλής στρώσης</b>	<b>Τύλιγμα διπλής στρώσης</b>
Θεμελιώδης συντελεστής τυλίγματος	υψηλότερος	χαμηλότερος
Άκρα τυλίγματος	μακρύτερα	κοντύτερα
Συντελεστής πληρότητας αύλακας	υψηλότερος	χαμηλότερος
Αυτεπαγωγές	υψηλότερες	χαμηλότερες
Αμοιβαίες Επαγωγές	χαμηλότερες	υψηλότερες
EMF	πιο τραπεζοειδής	πιο ημιτονοειδής
Αρμονικό περιεχόμενο MMF	υψηλότερο	χαμηλότερο
Απώλειες δινορρευμάτων μόνιμου μαγνήτη	υψηλότερες	χαμηλότερες
Δυνατότητα παροχής ροπής σε υπερφόρτιση	υψηλότερη	χαμηλότερη

Πίνακας 4. 1 Σύγκριση χαρακτηριστικών τυλίγματος απλής και διπλής στρώσης

Οι μηχανές με κλασματικό βήμα μονής στρώσης, έχουν υψηλές αρμονικές χώρου στην κατανομή της ΜΕΔ λόγω του μικρού αριθμού αυλακών ανά πόλο ανά φάση. Αυτές οι αρμονικές προκαλούν επιπλέον απώλειες, λόγω των δινορρευμάτων στον πυρήνα. Τοποθετώντας πολλαπλές στρώσεις τυλίγματος επιτυγχάνεται η μείωση, ακόμη και εξάλειψη, των αρμονικών χώρου της αντίδρασης τυμπάνου, διότι ισοδυναμεί με αύξηση των αυλακών.

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή πρωταρχικός σκοπός είναι η επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης, άρα οι μειωμένες απώλειες. Επιπλέον, επιθυμητή είναι η ημιτονοειδής μορφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης, ενώ δεν προβλέπονται υπερφορτίσεις και δεν απαιτείται λειτουργία σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση προτιμάται το τύλιγμα διπλής στρώσης.

Έπειτα, γίνεται η τελική επιλογή του αριθμού πόλων και αυλακών της μηχανής. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που έχει εξαχθεί σχετικά με τα χαρακτηριστικά των κινητήρων μονίμων μαγνητών συγκεντρωμένου τυλίγματος είναι ότι υπάρχουν συνδυασμοί αριθμού

αυλακών και πόλων που επιτρέπουν υψηλό συντελεστή τυλίγματος και συμμετρική τριφασική έξοδο.[4]

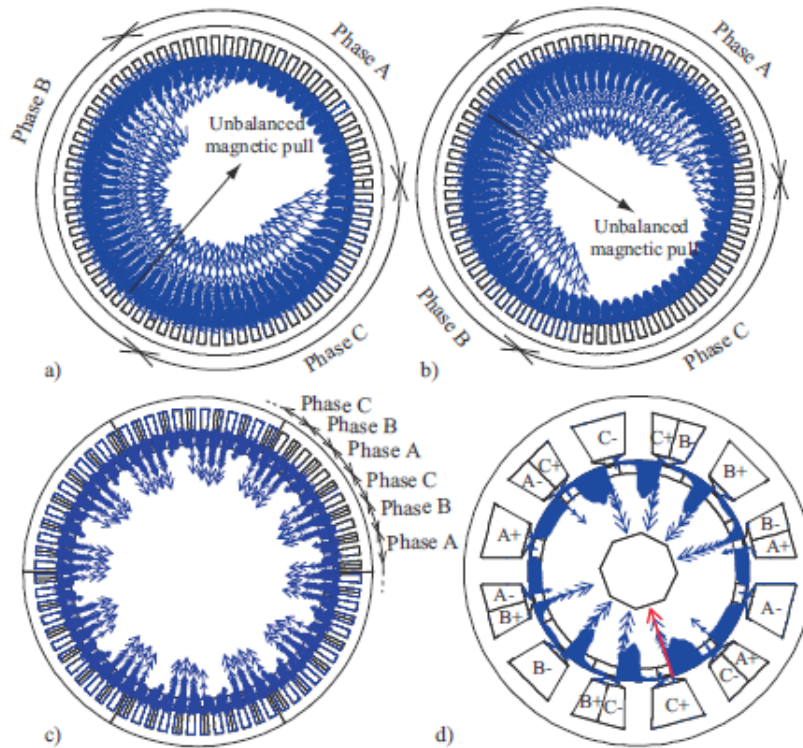
Αρχικά, η ταχύτητα θα καθορίσει τον πιθανό αριθμό των πόλων. Για την επίτευξη σύγχρονης ταχύτητας 400ΣΑΛ, ο αριθμός των πόλων μπορεί να είναι από 10 έως 16. Στη συνέχεια, ο αριθμός των πόλων θα πρέπει να επιλεγεί συνδυαστικά με τον αριθμό των αυλακών, λαμβάνοντας υπόψη κυρίως το συντελεστή τυλίγματος. Ο πίνακας ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό αυτό φαίνεται παρακάτω. Για αριθμό πόλων από 10 έως 16, και για αριθμό αυλακών από 6 έως 15, φαίνονται οι συντελεστές τυλίγματος για κάθε περίπτωση.

Qs/p	10	12	14	16
6	0.5		0.5	0.866
9	0.945	0.866	0.617	0.328
12	<b>0.933</b>		0.933	0.866
15	0.866		0.951	0.951

Πίνακας 4. 2 Επιλογή συνδυασμού αριθμού πόλων και δοντιών για μέγιστο συντελεστή τυλίγματος

Ένας παράγοντας που θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη στο σημείο αυτό είναι η ασύμμετρη μαγνητική έλξη. Αυτό συμβαίνει όταν οι μαγνητικές δυνάμεις δεν είναι συμμετρικά κατανεμημένες στο διάκενο, με αποτέλεσμα το άθροισμά τους να οδηγεί σε δύναμη η οποία περιστρέφεται και παράγει θόρυβο και δόνηση στη μηχανή.

Για παράδειγμα, στη μηχανή του Σχήματος 4.2 (a) και (b) η οποία αποτελείται από 68 πόλους και 69 αύλακες, παρατηρείται ασύμμετρη μαγνητική δύναμη, λόγω της απουσίας συμμετρίας στα τυλίγματα. Στο γ υπάρχει συμμετρία στα τυλίγματα και άρα δεν υπάρχει δύναμη λόγω των ακτινικών μαγνητικών δυνάμεων. Τέλος, στο δ φαίνεται μια μηχανή με 10 πόλους και 12 αύλακες, στην οποία και πάλι δεν υπάρχει ασύμμετρη δύναμη διότι η διάταξη των φάσεων είναι συμμετρική.[5]



Σχήμα 4. 3 Μαγνητικές δυνάμεις στο στάτη σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών με (a) και (b) 68 πόλους και 69 αύλακες, για διαφορετικές χρονικές στιγμές (c) 60 πόλους, 72 αύλακες (d) 10 πόλους, 12 αύλακες

Με βάση τον πίνακα και το γεγονός ότι δεν υπάρχουν προβλήματα ασύμμετρης έλξης σε αυτήν, επιλέγεται η τοπολογία των 10 πόλων και 12 αυλακών. Το κλασματικό βήμα θα είναι  $5/6$  διότι, όπως φαίνεται και στο d, το πολικό βήμα ενός πηνίου δεν είναι  $12/12$  αλλά  $10/12$ . Αυτό σημαίνει ότι το εύρος του πηνίου (coil span) είναι  $5/6 \cdot 180^\circ = 150^\circ$ .

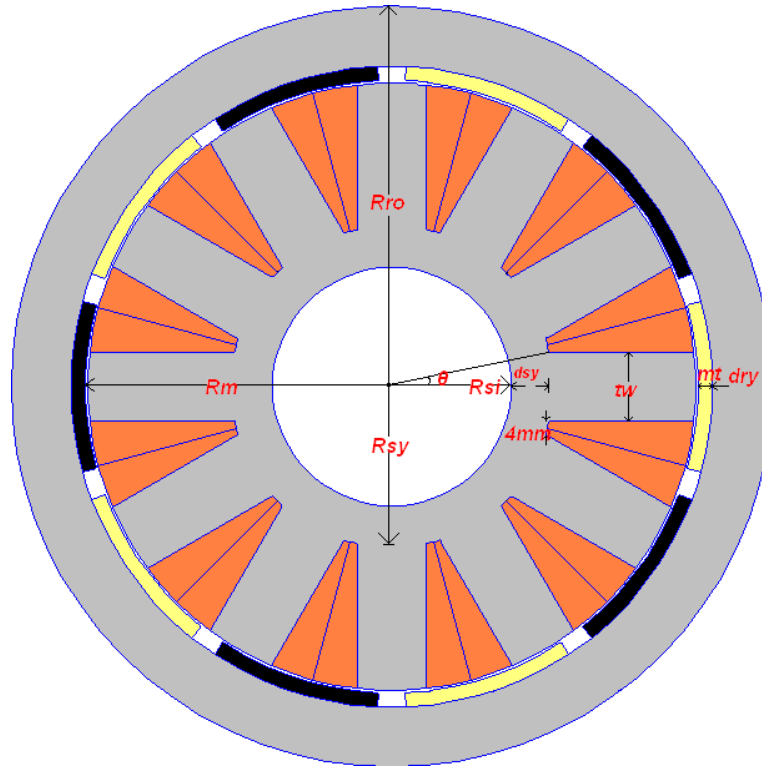
#### 4.4 Παραμετροποιημένη Σχεδίαση

Η διαστασιολόγηση του κινητήρα υπήρξε βασικό αντικείμενο μελέτης με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης τοπολογίας. Ο κινητήρας χρειάστηκε να σχεδιαστεί αρκετές φορές για διάφορες τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων, πριν επιλεγθούν οι καταλληλότερες.

Για το λόγο αυτό, οι διαστάσεις του κινητήρα είναι παραμετροποιημένες με τρόπο τέτοιο, ώστε να εξαρτώνται δυναμικά από κάποιες βασικές διαστάσεις, όπως είναι η εξωτερική διάμετρος του στάτη, το εύρος του μαγνήτη καθώς και το πάχος του δοντιού. Αυτό σημαίνει ότι μεταβάλλοντας αυτές τις βασικές παραμέτρους, ο κινητήρας σχεδιάζεται εκ νέου προσαρμόζοντας και τις υπόλοιπες διαστάσεις με σκοπό να πληρούνται συνεχώς οι

επιθυμητές προδιαγραφές. Η παραμετροποιημένη σχεδίαση στάθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη για τη διαδικασία της επιλογής των βέλτιστων γεωμετρικών παραμέτρων του κινητήρα.

Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια του παρακάτω σχήματος, φαίνεται η εξάρτηση όλων των διαστάσεων από τις βασικές.



Σχήμα 4. 4 Οι παραμετροποιημένες διαστάσεις της μηχανής

Η απόσταση του κέντρου από το εσωτερικό πλάτος της αύλακας έχει ονομαστεί  $R_{sy}$  και είναι ουσιαστικά η εσωτερική ακτίνα του στάτη προστιθέμενη στο μήκος του σώματος του στάτη (stator yoke). Να σημειωθεί ότι σε κάθε περίπτωση, το μήκος του δοντιού σχεδιαζόταν έτσι ώστε το εσωτερικό πλάτος της αύλακας να διατηρείται σταθερό και ίσο με 4mm. Δεδομένου ότι υπάρχουν 12 αύλακες, κάθε μια με πλάτος 4 mm, και ότι το πλάτος του δοντιού καθορίζεται από το ποσοστό (DCT) που καταλαμβάνει το δόντι σε σχέση με το πολικό βήμα του στάτη (stator pole pitch), εξάγεται η παρακάτω σχέση:

$$2\pi \cdot R_{sy} = 12 \cdot 4 + DCT \cdot R_{so} \cdot 2\pi \Rightarrow R_{sy} = \frac{24}{\pi} + DCT \cdot R_{so} \quad (4.27)$$

Επιπλέον, υπολογίζεται η βοηθητική γωνία  $\theta$ , η οποία φαίνεται και στο Σχήμα 4.4, με την οποία εν συνεχεία υπολογίζεται το πλάτος του δοντιού του στάτη. Παρατηρείται σε αυτό το σημείο ότι τα μεγέθη αυτά που αφορούν το στάτη, υπολογίστηκαν μόνο συναρτήσει της εξωτερικής ακτίνας του στάτη καθώς και του ποσοστού του δοντιού, DCT.

$$\theta = \frac{pp}{2} \cdot DCT \cdot \frac{R_{so}}{R_{sy}} \quad (4.28)$$

$$tw = 2 \cdot R_{sy} \cdot \sin(\theta)$$

Προχωρώντας στην εύρεση της εσωτερικής ακτίνας του στάτη, αυτή τίθεται ίση με:

$$R_{si} = R_{sy} - d_{sy} \quad (4.29)$$

$$d_{sy} = 0.5 \cdot tw$$

Από την απόσταση  $R_{sy}$  που φαίνεται και στο Σχήμα 4.4 αφαιρείται το μισό πλάτος του δοντιού, καθώς η μαγνητική ροή περνώντας μέσα από το δόντι, στη συνέχεια μοιράζεται στο σώμα του στάτη. Βέβαια, το ότι το σώμα του στάτη βρισκόταν σε κορεσμό, οδήγησε στην αύξηση του μήκους  $d_{sy}$ .

$$d_{sy} = 0.6 \cdot tw \quad (4.30)$$

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό του μήκους του σώματος του δρομέα (rotor yoke), λαμβάνεται υπόψη ότι θα πρέπει να έχει μήκος περίπου μισό από το μήκος τόξου του μαγνήτη. Αυτό συμβαίνει διότι η μαγνητική ροή που βγαίνει από το μαγνήτη μοιράζεται στο σώμα του δρομέα. Επομένως, το μήκος  $d_{ry}$  θα πρέπει να δίνεται από τη σχέση:

$$d_{ry} = \frac{DCM \cdot R_m}{2} \cdot pp \cdot \frac{\pi}{180} = 0.5 \cdot DCM \cdot R_m \cdot pp \cdot \frac{\pi}{180} \quad (4.31)$$

Κατά τη διαδικασία της σχεδίασης, όμως, παρατηρήθηκε ότι για την τιμή αυτή του μήκους του σώματος του δρομέα, η μαγνητική επαγωγή στο δρομέα δεν ήταν ιδιαίτερα υψηλή για

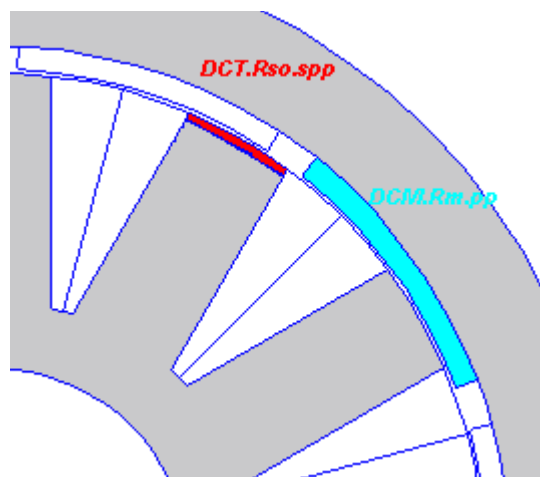
μέγιστη πυκνότητα ρεύματος, περί τα 0.9T. Έτσι, αφού υπήρξε δυνατότητα μείωσης, με τη μαγνητική επαγωγή να μην ξεπερνά τα 1.3T, η νέα σχέση για την  $d_{ry}$  έγινε:

$$d_{ry} = 0.35 \cdot DCM \cdot R_m \cdot pp \cdot \frac{\pi}{180} \quad (4.32)$$

Στη Σχέση 4.32, η παράμετρος  $DCM$  είναι το ποσοστό της γωνίας που καταλαμβάνει ο μαγνήτης, σε σχέση με το πολικό βήμα  $pp$ , το οποίο για δεκαπολικό κινητήρα είναι  $36^\circ$ . Επίσης, να σημειωθεί ότι η διάμετρος του διακένου  $D$  είναι ίση με  $2R_m$ .

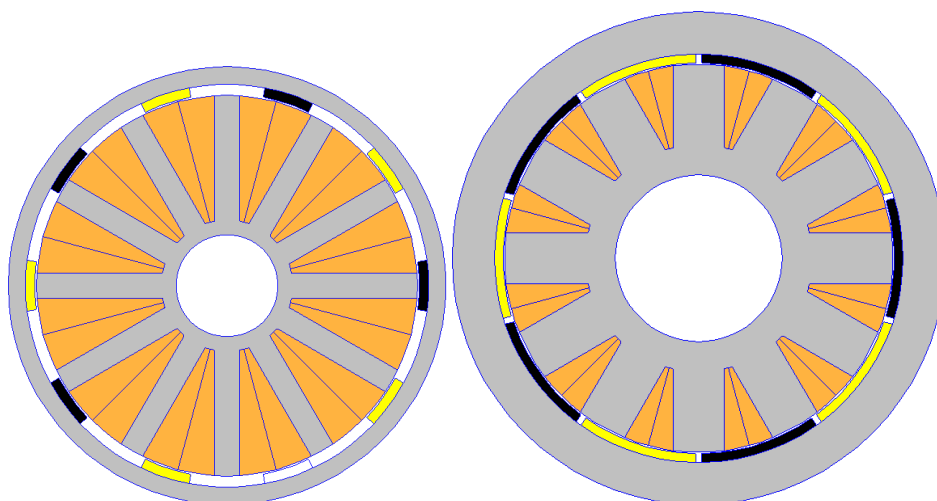
Για να υπολογιστεί, τώρα, η εξωτερική ακτίνα του δρομέα αθροίζονται οι  $R_m$ ,  $mt$  και  $R_y$ .

$$R_{ro} = R_m + mt + d_{ry} \quad (4.33)$$



Σχήμα 4.5 Το μήκος τόξου: της άκρης του δοντιού στάτη και του μαγνήτη του δρομέα

Η παραμετροποιημένη σχεδίαση συντέλεσε στη διαδικασία της σχεδίασης από την άποψη ότι κάθε αλλαγή των βασικών γεωμετρικών παραμέτρων είχε σαν αποτέλεσμα τη δυναμική προσαρμογή του κινητήρα, ώστε να τηρούνται οι παραπάνω σχεδιαστικές προδιαγραφές. Έτσι, η σύγκριση για διαφορετικές διαστάσεις υπήρξε αξιόπιστη ώστε να εξαχθούν σωστά συμπεράσματα κατά την ανάλυση ευαισθησίας. Δύο παραδείγματα σχεδίασης του κινητήρα για διαφορετικές δοθείσες παραμέτρους φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 4. 6 Παράδειγμα της παραμετροποιημένης σχεδίασης με μικρά (αριστερά) και μεγάλα (δεξιά) ποσοστά μαγνήτη και δοντιού

#### 4.5 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων ροπής και μαγνητικής επαγωγής για τη βελτιστοποίηση γεωμετρίας μαγνήτη και αύλακας στάτη

Στο σημείο αυτό, παρουσιάζεται η διαδικασία βελτιστοποίησης του κινητήρα ως προς δύο γεωμετρικές παραμέτρους. Σε ό,τι αφορά τη συστηματική βελτιστοποίηση, η αλληλεξάρτηση πολλών παραμέτρων και μεγεθών προσδίδει πολυπλοκότητα στη σχεδίαση, καθιστώντας την εύρεση του ολικού βέλτιστου αδύνατη από την πλευρά του χρόνου ή της υπολογιστικής ισχύος. Η σχεδίαση που τελικά επιλέγεται είναι αυτή που ικανοποιεί όσο το δυνατόν καλύτερα τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί και επιτυγχάνεται μέσα στα χρονικά περιθώρια που έχουν ορισθεί.

Για την επιλογή των τελικών τιμών του εύρους του μαγνήτη καθώς και του πάχους του δοντιού πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη ροπή και τη μαγνητική επαγωγή, για τη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος  $4 A/mm^2$ . Για τις τιμές ποσοστών του εύρους του μαγνήτη από 50% έως 95% και του πάχους του δοντιού από 25% έως 70%, πραγματοποιήθηκε σάρωση του πεδίου ορισμού και καταγράφηκαν οι τιμές της ροπής και της μέγιστης, ανάμεσα σε όλα τα δόντια του στάτη, μαγνητικής επαγωγής.

Ως βέλτιστη περιοχή επιλέχθηκε εκείνη για την οποία πληρούνται οι προϋποθέσεις:



$$T > 15 Nm$$

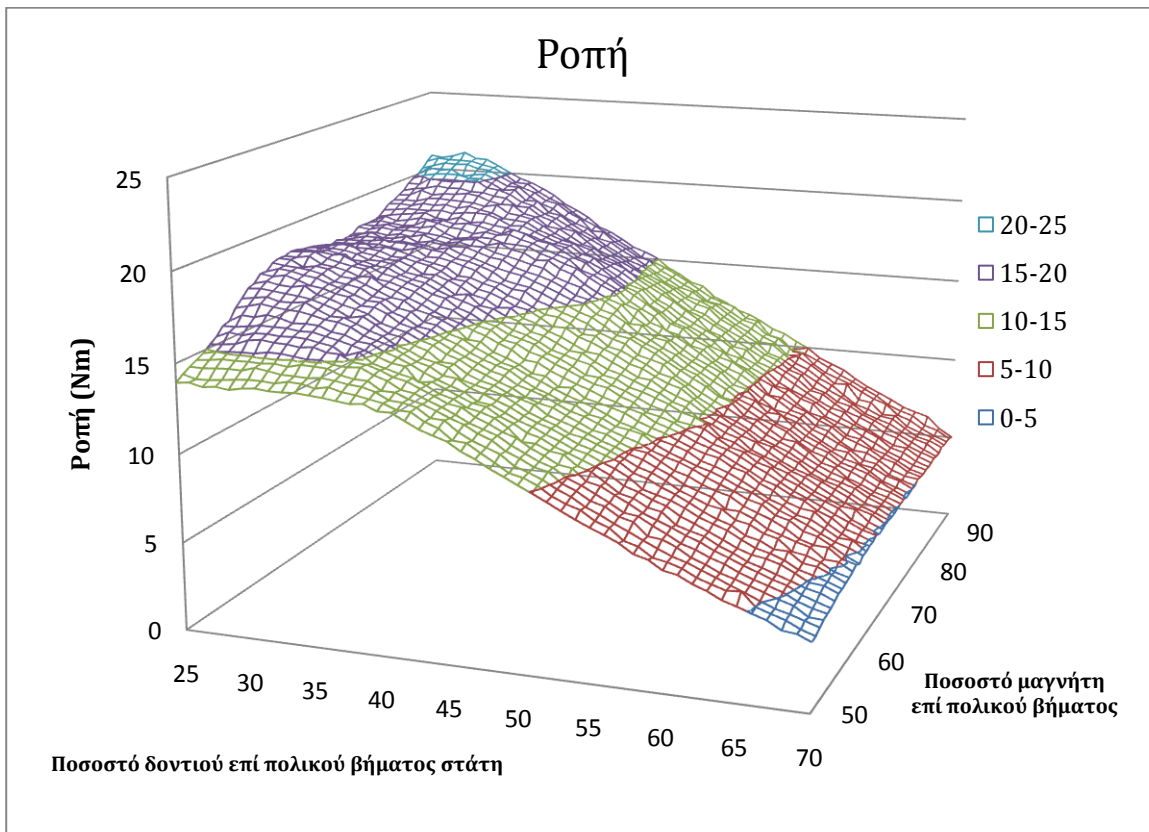
(4.34)

$$B_{max} < 1.75 T$$

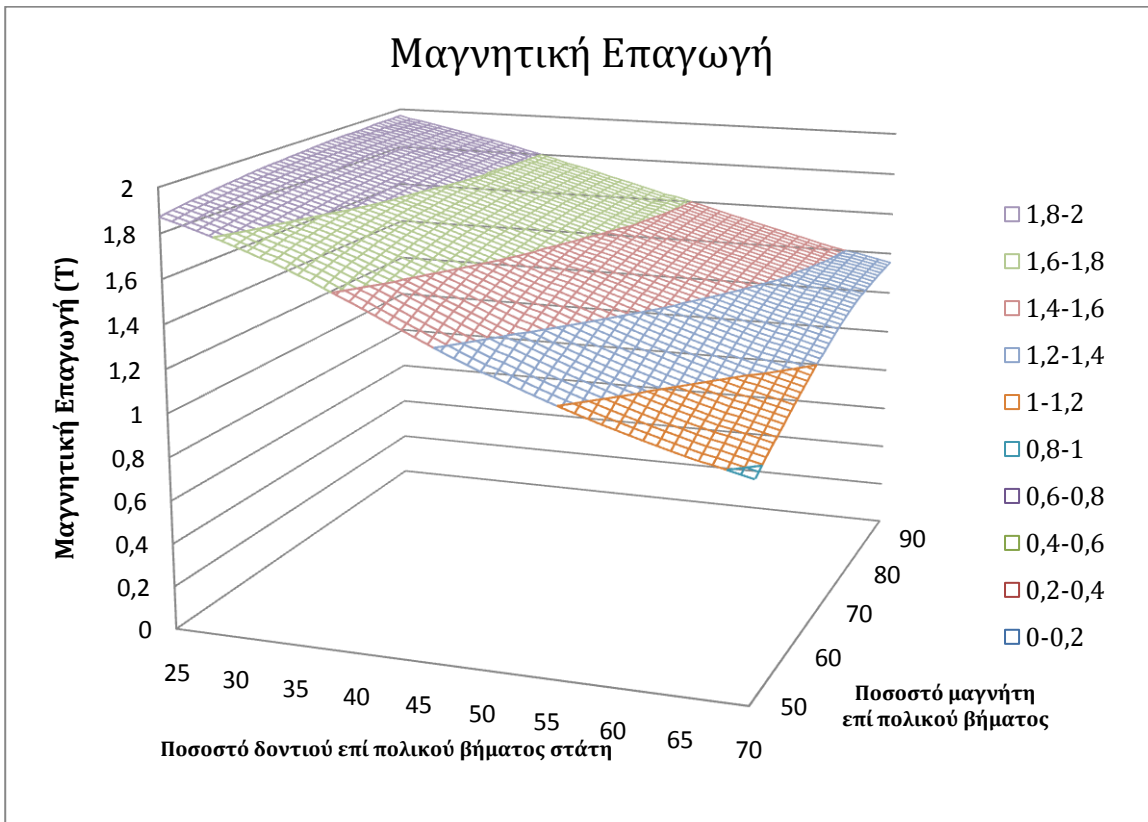
Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι το άνω όριο της μαγνητικής επαγωγής τίθεται μεγάλο, διότι οι μετρήσεις πραγματοποιούνται για μέγιστη πυκνότητα ρεύματος. Στην πράξη, η λειτουργία του κινητήρα γίνεται με πυκνότητα ρεύματος περίπου μισή, ή και λιγότερο, από τη μέγιστη. Επομένως, δε θα υπάρξει πρόβλημα κορεσμού στην κανονική λειτουργία της μηχανής.

Βέβαια, τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη και τους περιορισμούς σχετικά με τη μαγνητική επαγωγή στο δρομέα καθώς και τη μέση μαγνητική επαγωγή του διακένου. Τέθηκαν ως άνω όρια για τις τιμές αυτές τα 1.3T και 0.75T (όπως ορίζει και η προκαταρκτική σχεδίαση) αντίστοιχα. Τα κριτήρια αυτά τηρούνται για όλα τα δεδομένα του πίνακα.

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα της ροπής και της μαγνητικής επαγωγής ως προς τις παραμέτρους της βελτιστοποίησης.



Σχήμα 4. 7 Διάγραμμα της ροπής συναρτήσει του ποσοστού δοντιού και μαγνήτη



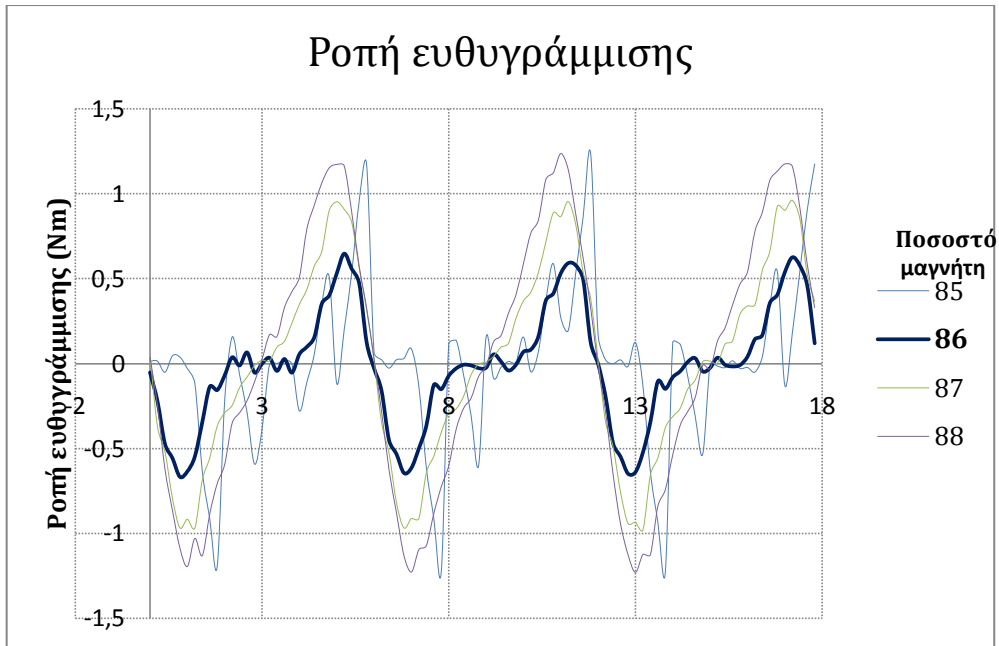
Σχήμα 4. 8 Διάγραμμα μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει του ποσοστού δοντιού και μαγνήτη

Το εύρος τιμών για το οποίο πληρούνται οι προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Ποσοστό (%)	B <sub>max</sub> (T)	Ροπή(Nm)	B <sub>max</sub> (T)	Ροπή(Nm)	B <sub>max</sub> (T)	Ροπή(Nm)
<b>Δοντιού/Μαγνήτη</b>	<b>85</b>		<b>86</b>		<b>87</b>	
43	1.7247	16.481	<b>1.7252</b>	<b>16.228</b>	1.7282	16.099
44	1.7101	15.879	1.7116	15.897	1.7132	15.869
45	1.6942	15.429	1.6961	15.517	1.6982	15.591

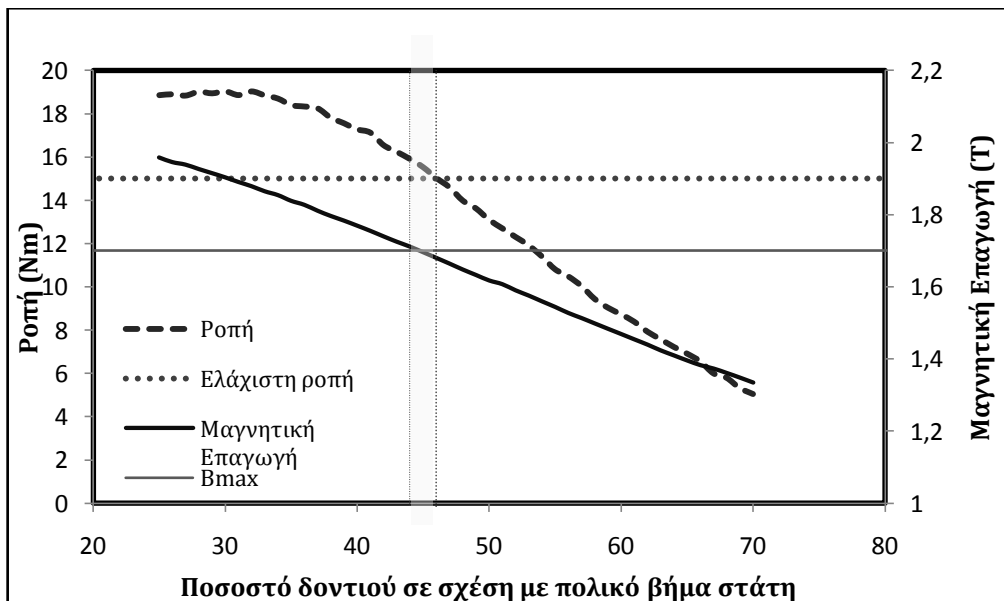
Πίνακας 4. 3 Βέλτιστη περιοχή τιμών ροπής και μαγνητικής επαγωγής για ποσοστό δοντιού και μαγνήτη

Για να επιλεγούν οι τελικές τιμές ώστε να προχωρήσει η σχεδίαση, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση σε σχέση με τη ροπή ευθυγράμμισης για διάφορες τιμές του τόξου του μαγνήτη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο διάγραμμα που ακολουθεί. Να σημειωθεί ότι η μορφή της ροπής ευθυγράμμισης παρατηρήθηκε όμοια για όλες τις τιμές του πλάτους του δοντιού, επομένως στο σημείο αυτό εξετάζεται η συσχέτισή της με το εύρος του μαγνήτη.



Σχήμα 4. 9 Ροπή ευθυγράμμισης σε σχέση με γωνία δρομέα για διάφορες τιμές του ποσοστού μαγνήτη

Όπως φαίνεται, η ελάχιστη ροπή ευθυγράμμισης παρουσιάζεται για ποσοστό μαγνήτη επί του πολικού βήματος 86%, που αντιστοιχεί σε γωνία  $\theta_{\text{μαγνήτη}} = 0.86 \cdot 36^\circ = 30.96^\circ$ . Στη συνέχεια, κρατώντας την τιμή αυτή για το εύρος του μαγνήτη, πραγματοποιείται διερεύνηση σε σχέση με το πλάτος του δοντιού του στάτη. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μαγνητική επαγωγή καθώς και η ροπή, για τις διάφορες τιμές του ποσοστού του δοντιού επί του πολικού βήματος του στάτη.

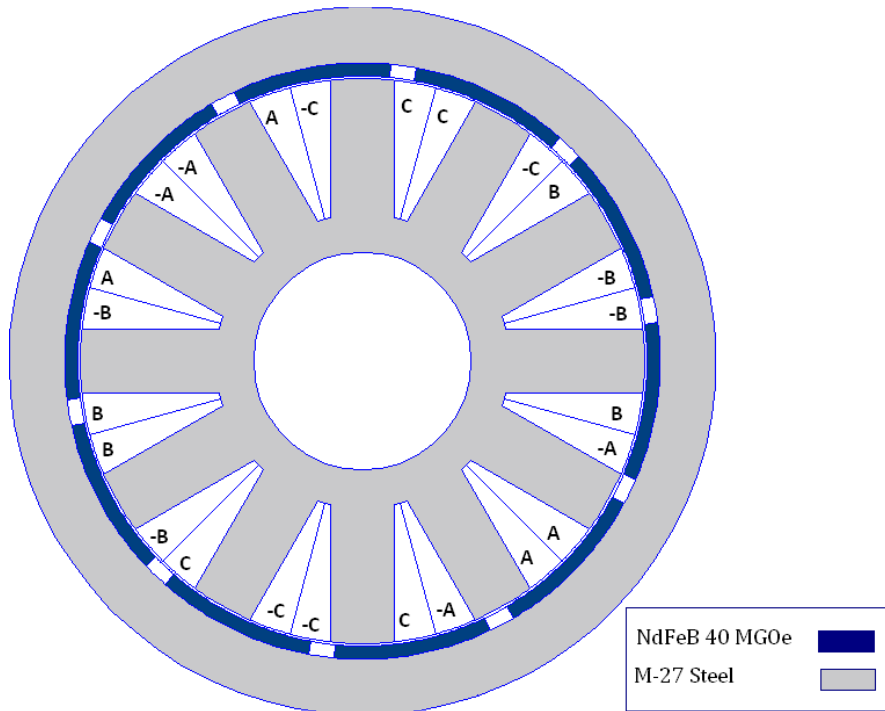


Σχήμα 4. 10 Διάγραμμα ροπής και μαγνητικής επαγωγής ως προς ποσοστό δοντιού

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα επιλέγεται ποσοστό δοντιού ίσο με 43%, που αντιστοιχεί σε μήκος τόξου του άκρου του δοντιού ίσο με  $\text{μήκος τόξου} = 0.43 \cdot 30^\circ = 12.9^\circ$ .

#### 4.6 Τελική διαμόρφωση

Με βάση τα προαναφερθέντα, η τελική διαμόρφωση της μηχανής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4. 11 Τελική διαμόρφωση κινητήρα – Αναπαράσταση τυλίγματος και υλικών κατασκευής

Η θέση του δρομέα για το συγκεκριμένο στιγμιότυπο είναι στη γωνία μέγιστης ροπής. Για την εύρεση της γωνίας αυτής έχει ληφθεί υπόψη ότι η μέγιστη ροπή παρέχεται στις  $90^\circ$  ηλεκτρικές και μεταφράζεται σε  $\frac{90^\circ}{p/2} = 18^\circ$  μηχανικές. Από τη μέτρηση της ροπής για τις διάφορες θέσεις του δρομέα έχει προκύψει ότι η γωνία αναφοράς, για την οποία σημειώνεται μηδενική ροπή είναι στις  $9^\circ$  μηχανικές. Επομένως, η γωνία μέγιστης ροπής είναι στις  $27^\circ$  μηχανικές.

Συγκεντρωτικά, τα χαρακτηριστικά της σχεδίασης του κινητήρα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Ενεργό μήκος μηχανής (mm)	20
Διάκενο (mm)	0.7
Μέγιστη πυκνότητα ρεύματος (A/mm <sup>2</sup> )	4
Ελίγματα	30
<b>Στάτης</b>	
Εξωτερική διάμετρος (mm)	170
Σώμα (mm)	11.66
Πλάτος δοντιού (mm)	19.43
Υλικό	0.35mm laminated M-27 steel
<b>Δρομέας</b>	
Εξωτερική διάμετρος (mm)	212.98
Σώμα (mm)	20.79
Πάχος μαγνήτη (mm)	4
Μήκος τόξου μαγνήτη (°)	31
Υλικό	0.35mm laminated M-27 steel

Πίνακας 4. 4 Τελικά χαρακτηριστικά σχεδίασης κινητήρα

## 4.7 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται για την επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων, συμπεριλαμβανομένου και του ελεύθερου λογισμικού femm που χρησιμοποιείται κατά την παρούσα εργασία. Τα προγράμματα αυτά ξεπερνούν τη δυσκολία της επίλυσης διαφορικών εξισώσεων με συγκεκριμένες οριακές συνθήκες, χωρίζοντας το πρόβλημα σε ένα μεγάλο αριθμό περιοχών και αντίστοιχων υποπροβλημάτων. Τα υποπροβλήματα αυτά αναφέρονται σε απλές γεωμετρίες, με αποτέλεσμα να καθίσταται εύκολη η επίλυσή τους. Επιπλέον, αν η αρχική περιοχή τεμαχιστεί σε αρκετό αριθμό τέτοιων υποπεριοχών, το υπολογιζόμενο δυναμικό προσεγγίζει αρκετά καλά την ακριβή του τιμή.

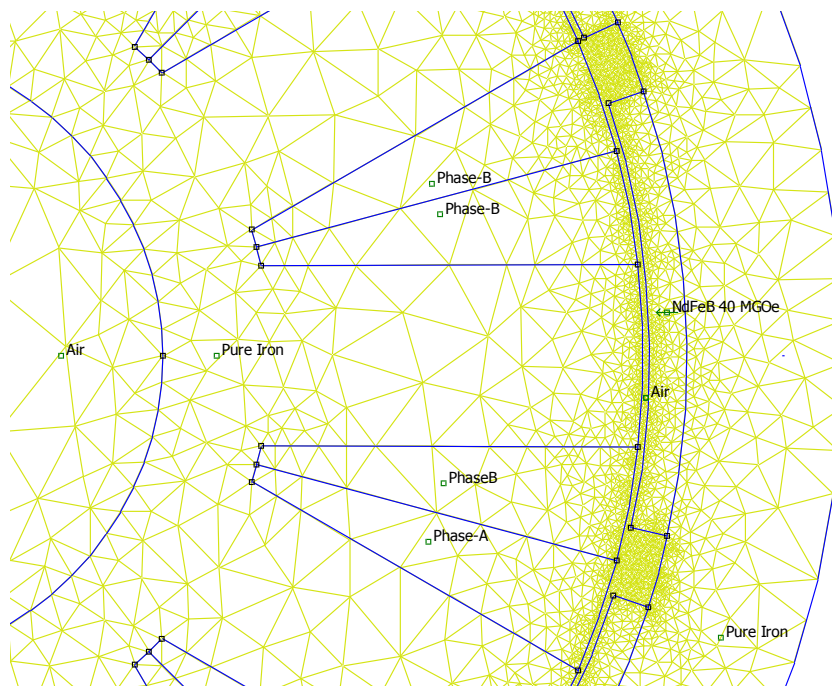
### 4.7.1 Ανάλυση ευαισθησία πλέγματος

Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα femm, διακρίτοποιεί την περιοχή του προβλήματος χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία. Σε κάθε στοιχείο, η λύση προσεγγίζεται με

γραμμική παρεμβολή των τιμών του δυναμικού στις κορυφές του τριγώνου. Το πρόβλημα της γραμμικής άλγεβρας σχηματίζεται με ελαχιστοποίηση του μέτρου του σφάλματος ανάμεσα στην πραγματική διαφορική εξίσωση και την προσεγγιστική διαφορική εξίσωση.

Εύκολα, λοιπόν, συμπεραίνεται ότι ο καθορισμός των τριγωνικών στοιχείων για την επίλυση του προβλήματος παίζει σημαντικό ρόλο στο σφάλμα ή στην απόκλιση. Είναι αναγκαίο να ορισθεί με τέτοιο τρόπο στα διάφορα σημεία της μηχανής ώστε να υπάρχει η απαιτούμενη ακρίβεια. Για παράδειγμα, στο διάκενο το οποίο έχει μήκος 0.7mm ο αριθμός και η πυκνότητα των τριγωνικών στοιχείων θα πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα στο σώμα του στάτη ή του δρομέα.

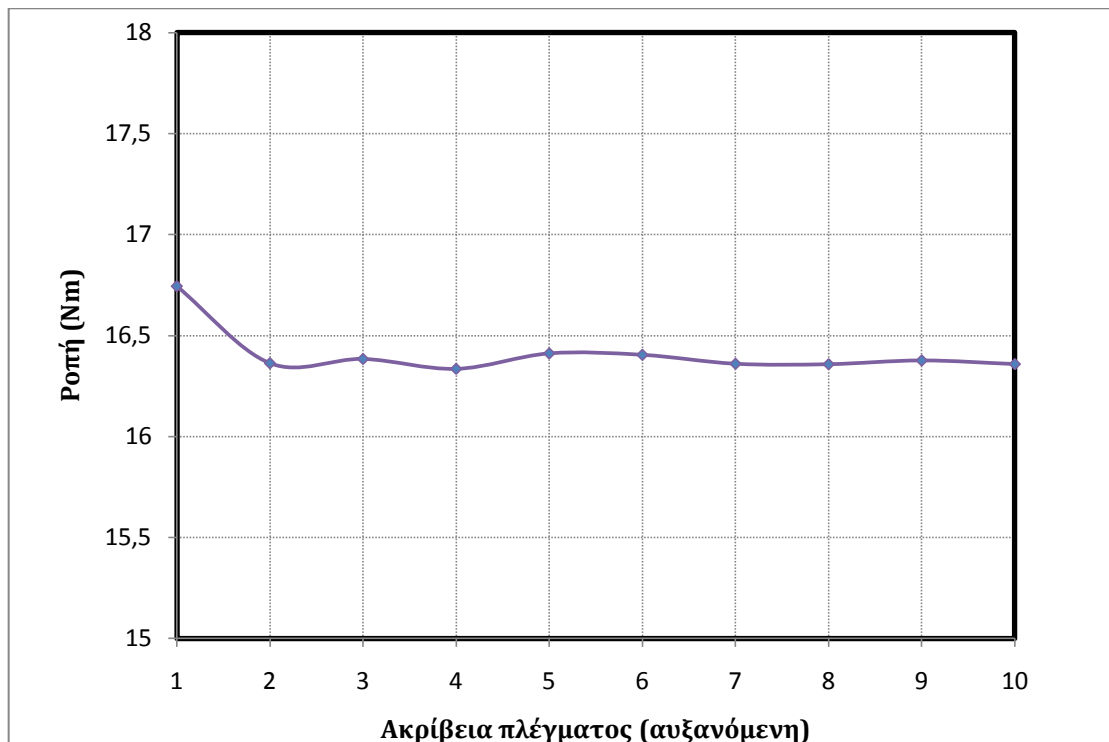
Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η αύξηση του αριθμού των κόμβων στην περιοχή του διακένου.



Σχήμα 4. 12 Το πλέγμα που χρησιμοποιείται κατά την επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Για να εξεταστεί η ευαισθησία των μετρούμενων παραμέτρων σε σχέση με την ευαισθησία του πλέγματος, σχεδιάστηκε το πρόβλημα πολλές φορές για διαφορετικό αριθμό κόμβων και καταγράφηκαν τα αποτελέσματα της υπολογισθείσας ροπής διακένου. Σημειώνεται ότι έχουν ληφθεί 10 μετρήσεις ροπής στη θέση του δρομέα  $\theta=27^\circ$ , η οποία είναι η βέλτιστη γωνία, δηλαδή η γωνία για την οποία παρέχεται η μέγιστη ροπή.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η ροπή σε σχέση με την ακρίβεια του πλέγματος. Η τιμή 1 του οριζόντιου άξονα αντιστοιχεί σε μικρή ανάλυση, ίση με 8739 κόμβους, ενώ η τιμή 10 αντιστοιχεί σε 153950 κόμβους.



Σχήμα 4. 13 Ευαισθησία της ροπής σε σχέση με την ακρίβεια του πλέγματος

Εύκολα φαίνεται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων, καθώς αυξάνονται οι τιμές του οριζόντιου άξονα, η ροπή συγκλίνει σε μια συγκεκριμένη τιμή κοντά στα 16.35 Nm. Βέβαια, ικανοποιητική ακρίβεια επιτυγχάνεται και χωρίς την ανάλυση με το μεγαλύτερο αριθμό κόμβων, αφού το σχετικό επί τοις εκατό σφάλμα δεν ξεπερνά το 0.5%, εξαιρουμένης της περίπτωσης με τους λιγότερους δυνατούς κόμβους, για την οποία το σφάλμα αγγίζει το 2.5%, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί. Δεδομένου και του γεγονότος ότι με την αύξηση του αριθμού των κόμβων αυξάνει και ο υπολογιστικός χρόνος σε μεγάλο βαθμό, καθίσταται σκόπιμη η ανάλυση με περίπου 20000 κόμβους.

Στον παρακάτω πίνακα, το σφάλμα έχει υπολογισθεί ως προς την υπολογισθείσα ροπή για τη μεγαλύτερη ακρίβεια.

	$\delta T = \frac{T_i - T_{10}}{T_{10}} \cdot 100\%$
1	2.36
2	0.027
3	0.155
4	0.144
5	0.323
6	0.281
7	0.0098
8	0.0038
9	0.11
10	0

Πίνακας 4. 5 Σφάλμα ροπής ως προς ακριβέστερη τιμή για αυξανόμενη ακρίβεια πλέγματος

#### 4.7.2 Πεδιακή μεγέθη

##### Μέση μαγνητική επαγωγή διακένου

Αποτελεί τη μαγνητική φόρτιση του κινητήρα και για το λόγο αυτό είναι ένα από τα βασικά μεγέθη που λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία της σχεδίασης. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η μαγνητική επαγωγή του διακένου αυξάνεται με την αύξηση των διαστάσεων του μαγνήτη, καθώς και με τη μείωση του ακτινικού μήκους του διακένου. Επίσης, εξαρτάται από τις διαστάσεις των δοντιών του στάτη.

Πραγματοποιείται υπολογισμός του μεγέθους της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, σε κενό φορτίο, σε ονομαστικό φορτίο και σε υπερφόρτιση 300%, με τη βοήθεια του femm. Επιπλέον, παρατίθενται και οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής του μαγνήτη. Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα:

Φορτίο(%)	$B_g(T)$	$B_m(T)$
0	0.719	0.737
100	0.699	0.74
300	0.716	0.74

Πίνακας 4. 6 Τιμές μαγνητικής επαγωγής διακένου και μαγνήτη για διαφορετικές φορτίσεις

Διαπιστώνεται ότι τα μεγέθη είναι σε συμφωνία με τα προβλεπόμενα από την προκαταρκτική σχεδίαση.

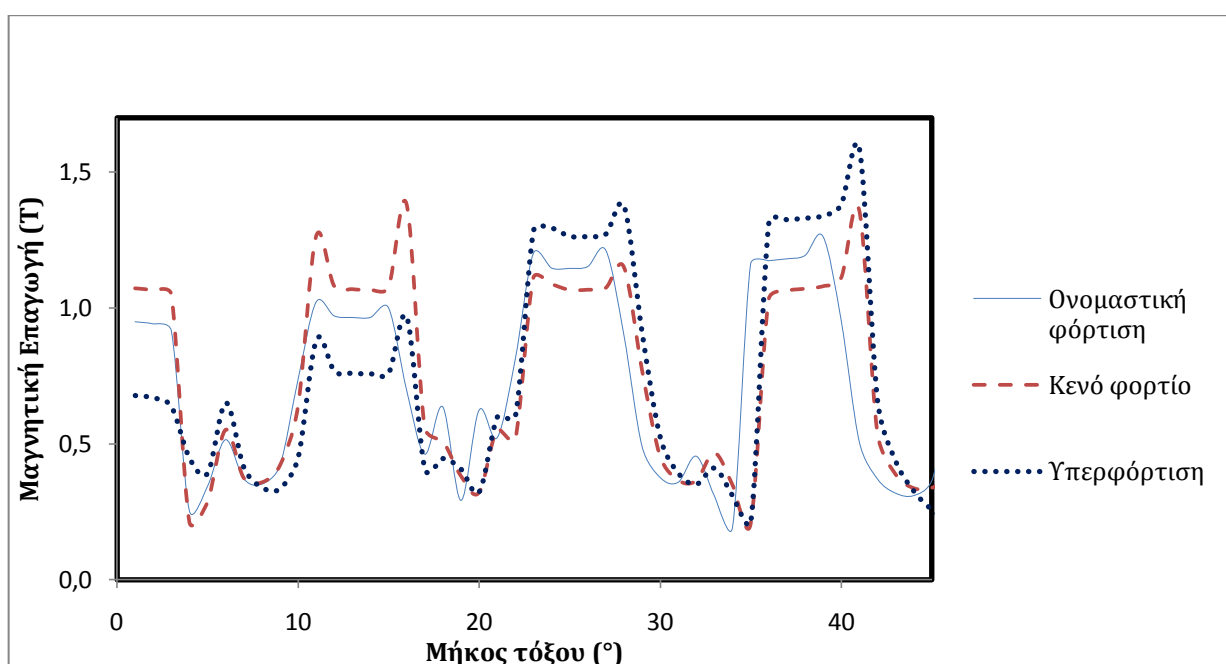


## Μαγνητική επαγωγή μαγνήτη υπό φορτίο

Σε κάθε περίπτωση γίνεται έλεγχος ώστε να διασφαλιστεί ότι ο μαγνήτης δε διατρέχει κίνδυνο απομαγνήτισης λόγω επιβολής εξωτερικού πεδίου. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνεται ότι η μαγνητική επαγωγή στην επιφάνεια του μαγνήτη είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη από 0.5T. Από την καμπύλη απομαγνήτισης για τον N40 μαγνήτη λαμβάνεται η πληροφορία ότι δεν υπάρχει κίνδυνος μόνιμης απομαγνήτισης για τέτοιες τιμές της μαγνητικής επαγωγής, άρα οι μαγνήτες δε διατρέχουν τέτοιο κίνδυνο λόγω εξωτερικού πεδίου.

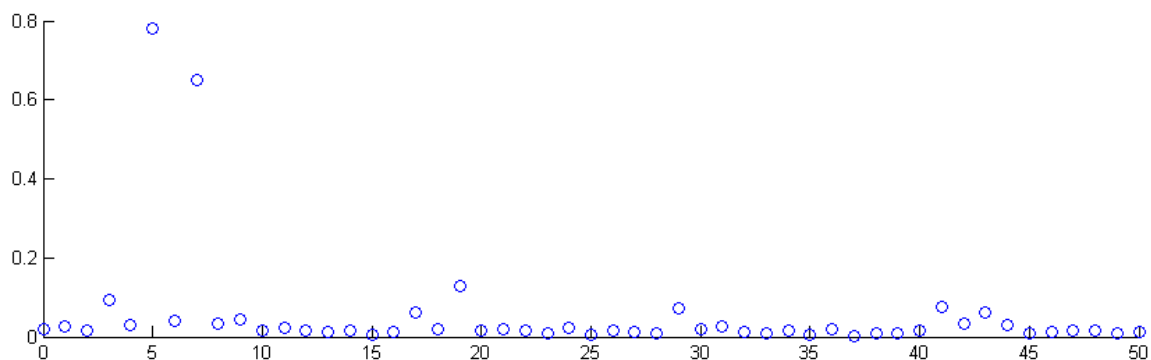
## Μορφή μαγνητικής επαγωγής διακένου

Παρακάτω παρουσιάζεται η μορφή της μαγνητικής επαγωγής του διακένου για ονομαστική φόρτιση, σε κενό φορτίο και για υπερφόρτιση, για γωνία πεδίων 90° ηλεκτρικές. Η ύπαρξη αρμονικού περιεχομένου είναι ευδιάκριτη και οφείλεται στην υλοποίηση του κλασματικού βήματος.



Σχήμα 4. 14 Η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο για διαφορετικές φορτίσεις

Για την καλύτερη διαπίστωση αρμονικού περιεχομένου πραγματοποιείται ανάλυση Fourier.



Σχήμα 4. 15 FFT ανάλυση της ΜΕΔ του διακένου

Συμπεραίνεται από την ανάλυση Fourier ότι η συνιστώσα της 5<sup>ης</sup> αρμονικής έχει τη μεγαλύτερη τιμή. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί οι μηχανές μονίμων μαγνητών κλασματικού βήματος έχουν κατανομή ΜΕΔ με λιγότερους πόλους από αυτούς του δρομέα. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η αρμονική συνιστώσα η οποία επιδρά στη μέση ροπή να μην είναι η θεμελιώδης, αλλά μια ανώτερη αρμονική της τάξης των ζευγών των πόλων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι δεκαπολική η μηχανή, έχει δηλαδή 5 ζεύγη πόλων και γι' αυτό το λόγο παρατηρούμε στο διάγραμμα ότι η 5<sup>η</sup> αρμονική έχει τη μεγαλύτερη τιμή.

Επιπλέον, λόγω της ομοιόμορφης κατανομής των αυλακών, θα υπάρχουν πάντα οι αρμονικές χώρου της τάξης του  $Z \pm p/2$ , όπου  $Z$  ο αριθμός των αυλακών και  $p/2$  τα ζεύγη των πόλων. Δηλαδή οι αρμονικές της τάξης  $n=7$  και  $n=17$  θα υπάρχουν πάντοτε, όπως φαίνεται και από την ανάλυση Fourier. Βέβαια, η τιμή της ΜΕΔ για αυτές είναι μειωμένη κατά 5/7 και 5/17 αντίστοιχα.[5]

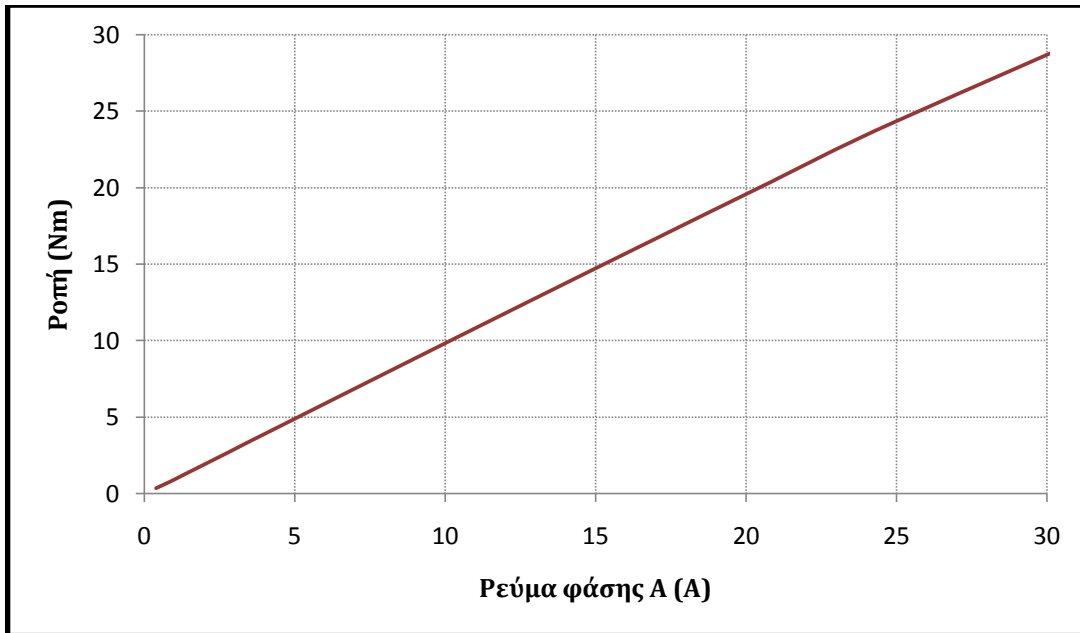
## 4.8 Επίδοση

### Καμπύλη επίδοσης

Η επίδοση του κινητήρα εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ηλεκτρική και μαγνητική του φόρτιση, καθώς και από τις διαστάσεις του. Η ροπή που παρέχει ο κινητήρας είναι γραμμική σε σχέση με το ρεύμα στα τυλίγματά του, εκτός από την περίπτωση όπου ο πυρήνας βρίσκεται σε κορεσμό. Για την καλύτερη αξιοποίηση του όγκου και των μαγνητικών ιδιοτήτων του πυρήνα, θα πρέπει το σημείο λειτουργίας να βρίσκεται λίγο πριν τον κορεσμό.

Ο υπολογισμός της ροπής γίνεται χρησιμοποιώντας τον τελεστή πίεσης του Maxwell πάνω σε καμπύλη ολοκλήρωσης που διατρέχει το μέσο του διακένου. Υπολογίζεται η ροπή στη γωνία μέγιστης ισχύος, που, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, είναι οι 27° μηχανικές περιστροφής του δρομέα από τη σχεδιαζόμενη αρχική θέση.

Τα αποτελέσματα της ροπής σε σχέση με το φασικό ρεύμα, παρουσιάζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 4. 16 Ροπή – Φασικό ρεύμα

Είναι φανερό ότι η ροπή εξόδου, άρα και η ισχύς εξόδου για σταθερές στροφές, μεταβάλλεται γραμμικά με τη μεταβολή του φασικού ρεύματος, ακόμα και για υπερφορτίσεις. Το γεγονός ότι δεν εμφανίζεται σημαντική μείωση της κλίσης της καμπύλης ροπής-ρεύματος, υποδηλώνει ότι ο κινητήρας δε λειτουργεί κοντά στην περιοχή κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα. Η επιλογή αυτή δικαιολογείται από την απαίτηση να επιτευχθεί πολύ υψηλή απόδοση, ενώ η καλύτερη αξιοποίηση των υλικών δεν έχει την ίδια βαρύτητα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

### **Κυμάτωση της ροπής (torque ripple)**

Η κυμάτωση της ροπής οφείλεται στους παρακάτω παράγοντες:

- Στη ροπή ευθυγράμμισης. Η ροπή ευθυγράμμισης παράγεται λόγω της μεταβολής της μαγνητικής διαπερατότητας που 'βλέπουν' οι μόνιμοι μαγνήτες λόγω των αυλακών της επιφάνειας του στάτη, ακόμα και αν το τύλιγμα του στάτη δεν τροφοδοτείται από ρεύμα.
- Στη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας που 'βλέπουν' οι μόνιμοι μαγνήτες όταν ο σίδηρος βρίσκεται σε κορεσμό.
- Στις αρμονικές χώρου, λόγω της αλληλεπίδρασης των αρμονικών χώρου του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από το μόνιμο μαγνήτη με αυτές του πεδίου που παράγεται από τα ρεύματα του στάτη.
- Στις αρμονικές χρόνου, οι οποίες (προκαλούμενες από αντιστροφή) εμφανίζονται στο πεδίο που δημιουργούν τα διαρρέομενα από ρεύμα τυλίγματα και έχουν σαν αποτέλεσμα παλλόμενη ροπή, όταν αλληλεπιδρούν με το πεδίο του δρομέα.
- Τέλος, η κυμάτωση της ροπής μπορεί να οφείλεται και στην ανομοιομορφη μαγνήτιση των μονίμων μαγνητών του δρομέα.[4],[5],[10]

Η κυμάτωση της ροπής δίνεται από τη σχέση:

$$torque\ ripple = \frac{T_{max} - T_{min}}{\bar{T}} \cdot 100\% \quad (4.35)$$

Ακολουθούν διαγράμματα της ροπής για περιστροφή του δρομέα κατά 72°, δηλαδή για δύο πόλους της μηχανής. Για τη μέτρηση της ροπής σε σχέση με τη θέση του δρομέα, αυτός περιστεφόταν κατά 1°, ενώ ταυτόχρονα μεταβάλλονταν και τα ρεύματα του στάτη, ώστε να εξασφαλιστεί ότι τα πεδία στάτη και δρομέα είναι πάντα κάθετα. Στη συνέχεια, καταγράφηκε για κάθε θέση του δρομέα η τιμή της ροπής. Τα διαγράμματα αναφέρονται στο φορτίο που απαιτήθηκε κατά τις συνθήκες ταξιδιού και σε ονομαστικό φορτίο.

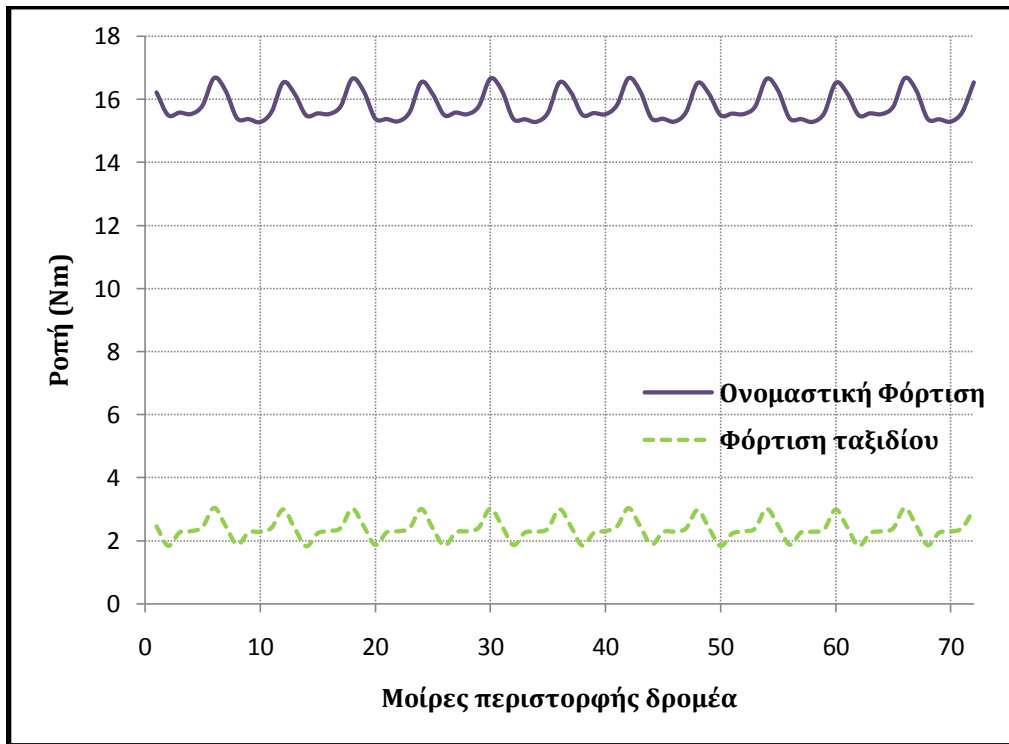
Στο σημείο αυτό παρατηρείται ότι η κυμάτωση της ροπής είναι μικρότερη για την ονομαστική φόρτιση, όπως ήταν αναμενόμενο. Συγκεκριμένα υπολογίζεται για την ονομαστική φόρτιση:

$$torque\ ripple_{nominal} = \frac{T_{max-nom} - T_{min-nom}}{\bar{T}_{nom}} \cdot 100\% = \frac{16.68 - 15.28}{15.81} = 8.85\%$$

Για το φορτίο σε συνθήκες ταξιδιού υπολογίζεται:

$$torque\ ripple_{application} = \frac{T_{max-app} - T_{min-app}}{\bar{T}_{app}} \cdot 100\% = \frac{3.04 - 1.82}{2.37} = 51.48\%$$

Η έντονη κυμάτωση οφείλεται στο γεγονός ότι οι συνθήκες απέχουν από τις ονομαστικές.



Σχήμα 4. 17 Κυμάτωση της ροπής για ονομαστική φόρτιση και φόρτιση της εφαρμογής

### Μέγιστη ροπή

Η ονομαστική ροπή του κινητήρα είναι τέτοια ώστε να υπερκαλύπτει την απαιτούμενη ροπή που καθορίζεται από την εφαρμογή. Η σχεδίαση αυτή είχε ως στόχο τη σίγουρη εξασφάλιση της απαιτούμενης ροπής του οχήματος. Επιπλέον, με αυτόν τον τρόπο

διασφαλίζεται ότι το ρεύμα που θα χρειαστεί για την επίτευξη της ροπής θα είναι χαμηλότερο από το ονομαστικό και αυτό είναι σημαντικό για τα ηλεκτρονικά ισχύος που οδηγούν τον κινητήρα.

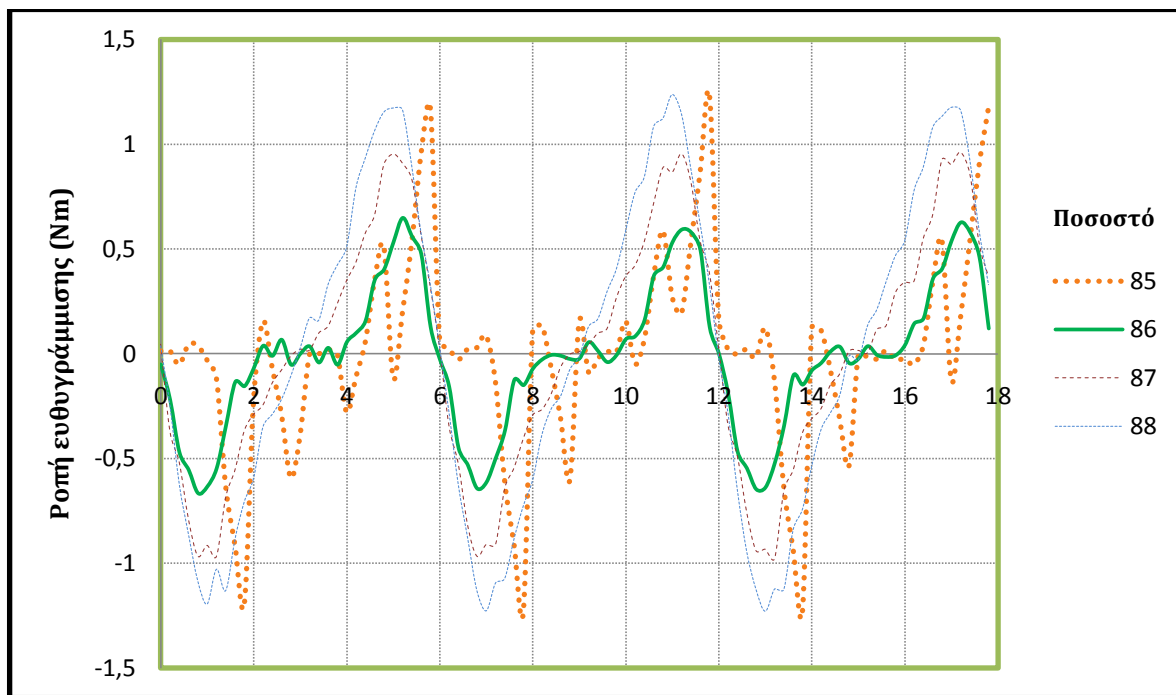
#### 4.8.1 Ροπή ευθυγράμμισης

Η ροπή ευθυγράμμισης ορίζεται ως η ροπή εναλλασσόμενης φύσης που εμφανίζεται κατά την περιστροφή του δρομέα μιας ηλεκτρικής μηχανής μονίμων μαγνητών χωρίς ρεύματα τυμπάνου. Οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των δοντιών του στάτη και του πεδίου των μονίμων μαγνητών του δρομέα. Αυτό μεταφράζεται σε ανομοιόμορφη χωρική κατανομή της μαγνητικής αντίστασης του μαγνητικού κυκλώματος. Όπως ο μαγνήτης του δρομέα πλησιάζει ή απομακρύνεται από κάποιο δόντι, το πεδίο γύρω του αλλάζει, με αποτέλεσμα να αλλάζει και η συνενέργεια στο χώρο ανάμεσα στο μαγνήτη και στο δόντι. Η μεταβολή αυτή της συνενέργειας οδηγεί στην παραγωγή της ροπής ευθυγράμμισης.

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η ροπή ευθυγράμμισης εμφανίζεται ως κραδασμός και για αυτό το λόγο είναι ανεπιθύμητη. Η εμφάνιση αρμονικής συνιστώσας στο ρεύμα των τυλιγμάτων είναι άλλη μια συνέπεια του ίδιου φαινομένου. Επίσης, κατά την εκκίνηση του κινητήρα, η ροπή ευθυγράμμισης προστίθεται στην απαίτηση για ροπή εκκίνησης. Ειδικότερα, το πλάτος της ροπής ευθυγράμμισης μπορεί να είναι ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής ροπής στους κινητήρες μονίμων μαγνητών με μικρή ροπή εξόδου.

Παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη ροπή ευθυγράμμισης είναι γενικά οι παράμετροι σχεδίασης και κατασκευής. Συγκεκριμένα, η ροπή ευθυγράμμισης εξαρτάται από τη δύναμη του μαγνήτη. Αυτό συμβαίνει διότι η παραμένουσα μαγνήτιση είναι αυτή που καθορίζει τη ροή του διακένου και άρα τη ροπή ευθυγράμμισης. Επιπλέον, εξαρτάται και από τη θερμοκρασία (για ορισμένες συνθήκες λειτουργίας) και από τη φόρτιση των μαγνητών. Ένας άλλος παράγοντας που παίζει ρόλο για τον καθορισμό της ροπής ευθυγράμμισης είναι το πλάτος της αύλακας, δεδομένου ότι αυτή οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, μόνο στην αλληλεπίδραση του μαγνήτη με το άνοιγμα της αύλακας. Θεωρητικά, με μηδενικό άνοιγμα αύλακας επιτυγχάνεται μηδενική ροπή ευθυγράμμισης, όμως δεν είναι πρακτική σχεδίαση για όλες τις μηχανές. Οι κατασκευαστικές ανομοιομορφίες αλλά και τα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή επίσης επηρεάζουν τη ροπή ευθυγράμμισης. [4]

Για την αντιμετώπιση της ροπής ευθυγράμμισης θα πρέπει να αρθεί μερικώς η μεταβλητότητα της μαγνητικής αντίστασης του κυκλώματος, κατά την περιστροφή του δρομέα. Αυτό επιτυγχάνεται με τις πεπλατυσμένες άκρες δοντιών. Σε αυτήν την περίπτωση, βέβαια, που έχει επιλεγθεί το δόντι να μην έχει άκρα (tip), μπορεί να εξεταστεί η ροπή ευθυγράμμισης σε σχέση με τις διαστάσεις του μαγνήτη και να επιλεγεί το μήκος τόξο του μαγνήτη, για το οποίο η ροπή ευθυγράμμισης ελαχιστοποιείται. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 4. 18 Ροπή ευθυγράμμισης για διάφορες τιμές ποσοστού του μαγνήτη

Το διάγραμμα αυτό χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή του κατάλληλου μήκους τόξου για το μαγνήτη. Τελικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μικρότερη ροπή ευθυγράμμισης παρουσιάζεται για ποσοστό μαγνήτη επί του πολικού βήματος 86%, που αντιστοιχεί σε γωνία  $\theta_{\text{μαγνήτη}} = 0.86 \cdot 36^\circ = 30.96^\circ$ . Με την επιλογή αυτού του μαγνήτη, η ροπή ευθυγράμμισης δεν ξεπερνά το 3.75% της ονομαστικής, πράγμα το οποίο είναι αρκετά ικανοποιητικό.

## 4.9 Απόδοση

Η απόδοση του κινητήρα είναι το βασικότερο κριτήριο σχεδίασης και αξιολόγησής του. Δεδομένης και της εφαρμογής, η απόδοση είναι αυτή που θα καθορίσει την

καταλληλότητα του κινητήρα. Ο υπολογισμός της απόδοσης ενδιαφέρει κατά τη λειτουργία υπό ονομαστικό φορτίο, αλλά και υπό φορτίο μικρότερο του ονομαστικού. Αυτό εξετάζεται, όχι μόνο για τη μελέτη της ευαισθησίας της απόδοσης σε περιοχή φορτίων και στροφών, αλλά και επειδή το φορτίο που απαιτεί η εφαρμογή είναι μικρότερο από το ονομαστικό φορτίο του κινητήρα. Όπως έχει αναφερθεί, προτιμήθηκε να σχεδιαστεί κινητήρας με ονομαστικά μεγέθη μεγαλύτερα των απαιτούμενων για λόγους σίγουρης επίδοσης.

### **Απώλειες πυρήνα**

Οι απώλειες πυρήνα υπολογίζονται με τη συνάρτηση του David Meeker που δημιούργησε το λογισμικό femm. Η συνάρτηση αυτή θεωρεί, αρχικά, ότι οι μαγνήτες έχουν διαπερατότητα ίση με τη μονάδα και στη συνέχεια τους αντικαθιστά με ισοδύναμα ρεύματα γραμμής. Έπειτα δημιουργεί σειρά Fourier που αντικαθιστά αυτά τα ρεύματα με στις άκρες των μονίμων μαγνητών με ένα σύνολο χωρικών πυκνοτήτων ρεύματος σε διαφορετικές χωρικές συχνότητες. Όταν ο δρομέας περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο στάτης λόγω των ρευμάτων των μονίμων μαγνητών είναι διαφορετική για κάθε αρμονική της σειράς Fourier. Με αυτόν τον τρόπο, τελικά, οι μόνιμοι μαγνήτες μοντελοποιούνται ώστε να ισοδυναμούν με περιστρεφόμενα τυλίγματα δρομέα. Στη θεμελιώδη συνιστώσα συμβάλλουν τα ρεύματα του στάτη και η θεμελιώδης συνιστώσα των ρευμάτων του μαγνήτη. Για τις ανώτερες αρμονικές υπάρχει μόνο η συμβολή των ρευμάτων του μαγνήτη.[19]

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.19 φαίνονται οι απώλειες πυρήνα για διάφορες τιμές της πυκνότητας ρεύματος. Παρατηρείται ότι είναι αρκετά χαμηλές και, όπως ήταν αναμενόμενο, δεν αυξάνονται ιδιαίτερα με την αύξηση του φορτίου.

### **Απώλειες χαλκού**

Για τον υπολογισμό των απωλειών χαλκού θα πρέπει να ληφθούν υπόψη η αντίσταση ανά μέτρο ελίγματος, το μήκος του ελίγματος και ο συνολικός τους αριθμός.

Αρχικά, υπολογίζεται το εμβαδόν της αύλακας που δύναται να καταλάβει ο χαλκός, συνυπολογίζοντας και το βαθμό πληρότητας. Πριν την κατασκευή του κινητήρα εκτιμήθηκε συντελεστής πληρότητας 60%.

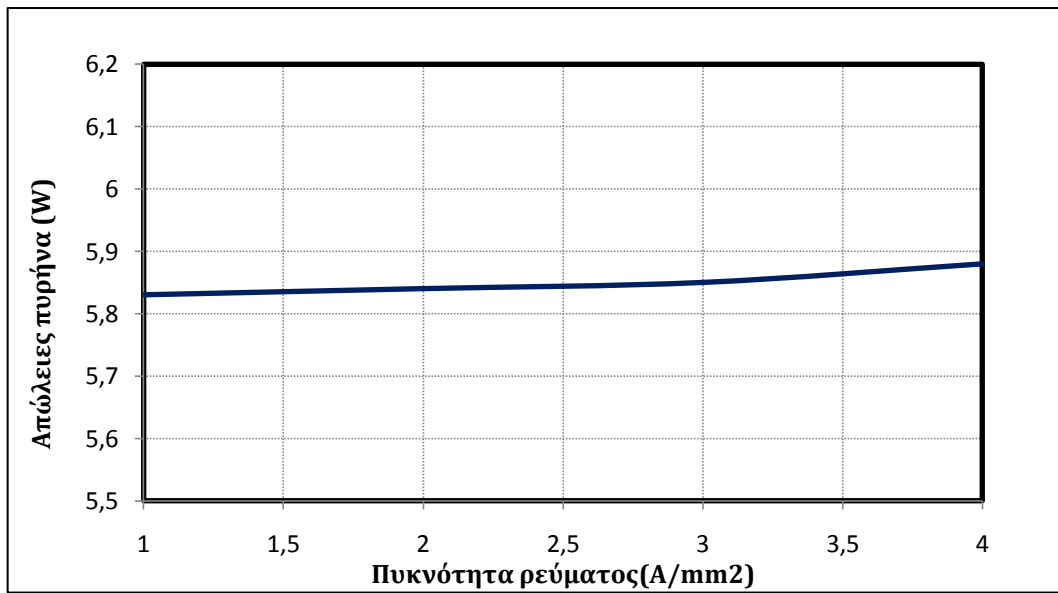


$$S_{Cu} = S_{slot} \cdot ff = 300 \cdot 0.6 = 180mm^2$$

$$N = 36 \text{ σπειρες}$$

(4.1)

$$S_{wire} = \frac{S_{Cu}}{N} = \frac{180}{36} = 5mm^2$$

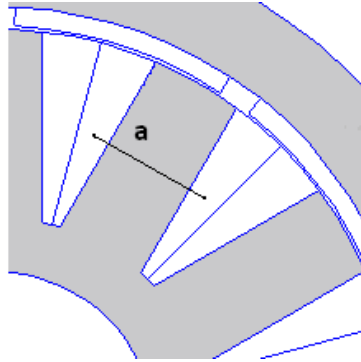


Σχήμα 4. 19 Απώλειες πυρήνα συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί χαλκός διατομής  $3.8mm^2$  , διότι η μεγαλύτερη διατομή θα δημιουργήσει πρόβλημα κατά την περιέλιξη.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του χαλκού λαμβάνεται ίση με  $r_{Cu} = 1.72 \mu\Omega/cm$

Για τον υπολογισμό του μήκους των ελιγμάτων λαμβάνεται υπόψη το μήκος του δοντιού κατά τον άξονα της μηχανής, που είναι όσο το ενεργό μήκος, δηλαδή 20mm. Επιπλέον, λαμβάνεται το μήκος από τη μέση της μιας αύλακας ως τη μέση της άλλης, ώστε να υπολογιστεί ο μέσο μήκος της σπείρας. Αυτό το μήκος φαίνεται στο Σχήμα 4.20 και ισούται με  $\alpha=28.5 mm$ .



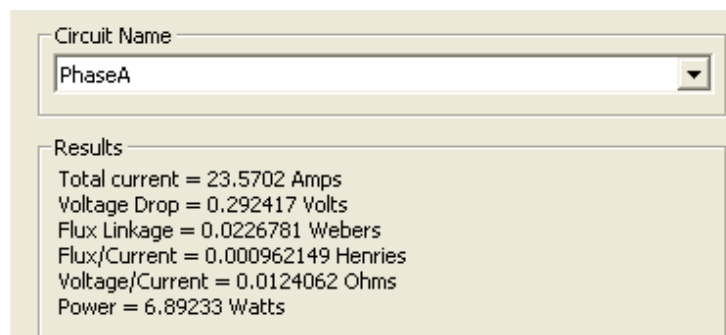
Σχήμα 4. 20 Η απόσταση  $a$  χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μέσου μήκους σπείρας

Επομένως το μήκος για κάθε σπείρα είναι:

$$l_{\text{σπείρας}} = 2 \cdot 28.5 + 2 \cdot 20 = 97 \text{ mm} \quad (4.2)$$

Για τον υπολογισμό της αντίστασης ανά φάση λαμβάνεται υπόψη ότι υπάρχουν 4 πηνία σε κάθε φάση. Άρα προκύπτει:

$$R_{\text{phase}} = 4 \cdot \rho \cdot \frac{l}{S_{\text{wire}}} = 4 \cdot 1.72 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{97 \cdot 36}{3.8} = 0.0632 \Omega \quad (4.3)$$



Σχήμα 4. 21 Χαρακτηριστικά της φάσης A από το πρόγραμμα femm

Το φασικό ενεργό ρεύμα της μηχανής, όπως φαίνεται από το femm, είναι:

$$I_{\text{rms}} = \frac{23.57}{\sqrt{2}} = 16.67A \quad (4.4)$$

Οι συνολικές απώλειες χαλκού της μηχανής, για μέγιστη πυκνότητα ρεύματος είναι:

$$P_{Cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R = 52.7 \text{ Watt} \quad (4.5)$$



Σχήμα 4. 22 Απώλειες χαλκού συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος

Η θερμοκρασία αναμένεται να έχει αμελητέα επίδραση στη συνολική αντίσταση του ελίκτου, καθώς το μέγεθος των απωλειών στην ονομαστική φόρτιση δε δικαιολογεί σημαντική αύξηση θερμοκρασίας.

### Καμπύλη απόδοσης

Λόγω της εφαρμογής κατά την οποία το όχημα θα κληθεί να διατηρήσει σταθερή ταχύτητα, ενδιαφέρει να εξεταστεί η απόδοση για σταθερές στροφές 400rpm. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διάγραμμα απόδοσης σε σχέση με την ισχύ εξόδου και την ηλεκτρική φόρτιση. Η απόδοση υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$\text{απόδοση} = \frac{T \cdot \omega_m}{T \cdot \omega_m + P_{Cu} + P_{Fe}} \quad (4.6)$$

$T$  ροπή εξόδου

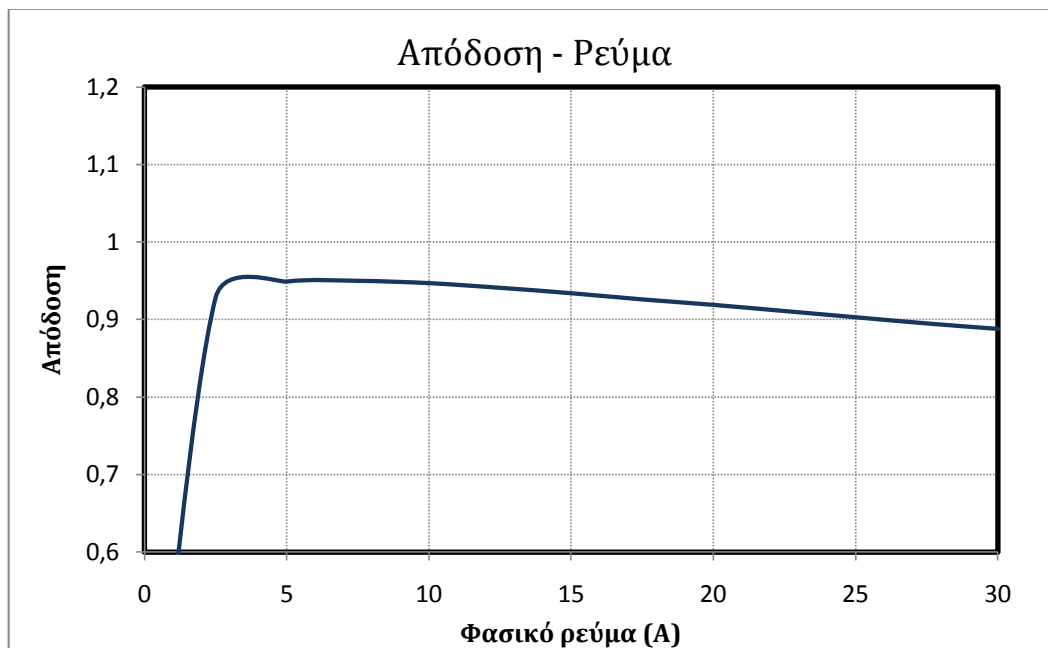
$\omega_m$  γωνιακή συχνότητα περιστροφής

$P_{Cu}$  απώλειες χαλκού

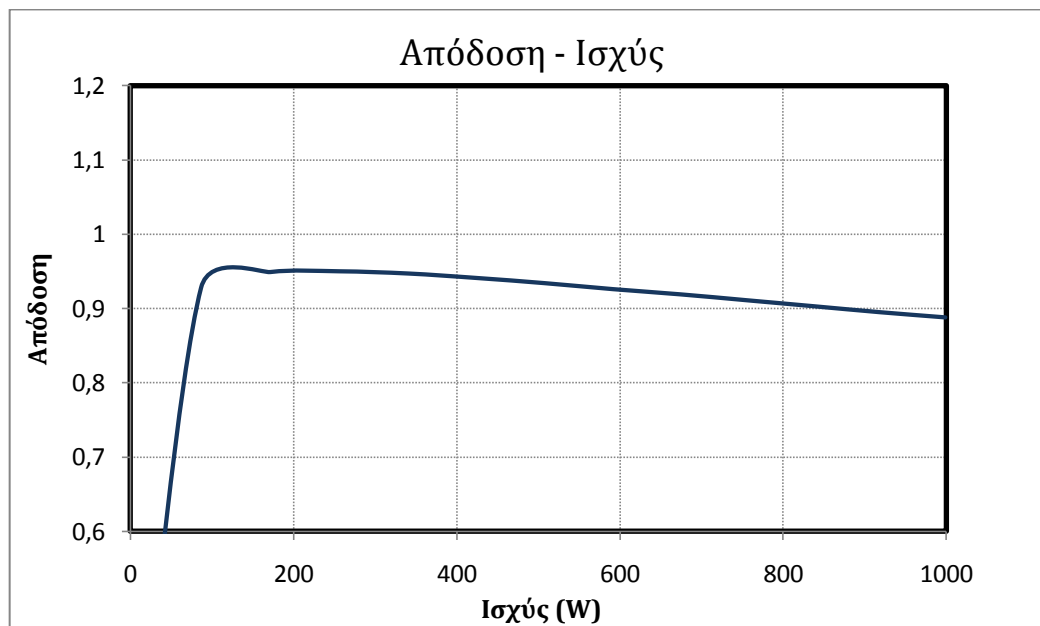
$P_{Fe}$  απώλειες πυρήνα

Παρατηρείται από τα διαγράμματα, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι η απόδοση είναι υψηλή, πάνω από 90%. Επιπλέον, επειδή ενδιαφέρει η λειτουργία σε συγκεκριμένες στροφές, δεν

πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας ως προς την ταχύτητα. Η ευαισθησία της απόδοσης για μεταβολή του φασικού ρεύματος είναι μικρή και διασφαλίζεται με αυτόν τον τρόπο ο υψηλός βαθμός απόδοσης. Επιπλέον, η απόδοση παραμένει υψηλή (>90%) και για ισχείς υψηλότερες της ονομαστικής. Τα αποτελέσματα αυτά αναμένονται να επιβεβαιωθούν και πειραματικά, στο Κεφάλαιο 5.



Σχήμα 4. 23 Απόδοση κινητήρα συναρτήσει φασικού ρεύματος



Σχήμα 4. 24 Απόδοση κινητήρα συναρτήσει ισχύος εξόδου

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ

#### 5.1 Διαδικασία κατασκευής

Η κατασκευή του κινητήρα διήρκεσε περίπου 1 εβδομάδα. Τα φύλλα λαμαρίνας πάχους 0.35mm που χρησιμοποιήθηκαν για το στάτη και το δρομέα κόπηκαν σε CNC τόρνο. Ένα βήμα πριν από την τελική κατασκευή πραγματοποιήθηκαν κάποιες βελτιώσεις σε στάτη και δρομέα, με σκοπό τη μείωση του βάρους της μηχανής. Συγκεκριμένα, αφαιρέθηκε υλικό από κάποια σημεία τα οποία δεν εμφάνιζαν υψηλές τιμές μαγνητικής επαγωγής. Αυτό φαίνεται παραστατικά στο σχήμα που ακολουθεί:



*Εικόνα 2 Ο στάτης της μηχανής με τον άξονα και τα φύλλα λαμαρίνας του δρομέα προς σύσφιξη*

Για την τοποθέτηση και ευθυγράμμιση των φύλλων λαμαρίνας χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία σύσφιξης από ανοξείδωτο ατσάλι, σχεδιασμένα σε πρόγραμμα AutoCad ειδικά για τις ανάγκες της κατασκευής. Αφού δημιουργήθηκε ο πυρήνας του στάτη και τοποθετήθηκε πάνω στον άξονά του, ποτίστηκε σε ειδική κόλλα ώστε να σταθεροποιηθεί το σύστημα. Μερικά από τα φύλλα που χρησιμοποιήθηκαν για το δρομέα διέθεταν ειδικές εγκοπές για την τοποθέτηση των μαγνητών. Οι μαγνήτες λειτούργησαν και ως σταθεροποιητές για το σώμα του δρομέα.

Η μεγαλύτερη δοκιμασία κατά τη διαδικασία της κατασκευής ήταν η περιέλιξη των πηνίων του στάτη. Πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές με διαφορετικές διατομές χαλκού, έως ότου αποφασιστεί η κατάλληλη διατομή που θα χρησιμοποιηθεί. Από τη μια, ο χαλκός με μικρή διατομή τυλιγόταν εύκολα, αλλά απαιτούσαν μεγάλος αριθμός σπειρών. Ενώ η χρήση χαλκού με μεγάλη διατομή συνεπάγεται πολύ λιγότερες σπείρες, παρόλα αυτά δεν μπορούσε να τυλιχτεί εύκολα και απαιτούσε χτύπημα η κάθε σπείρα ώστε να επιτευχθεί ο μεγαλύτερος δυνατός συντελεστής πληρότητας. Τελικά, πραγματοποιήθηκε το τελευταίο, χρησιμοποιήθηκε δηλαδή χαλκός διατομής  $3.5\text{mm}^2$  και περάστηκαν 35 σπείρες, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.

## 5.2 Επίδοση στο διαγωνισμό Shell EcoMarathon

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο σκοπός της σχεδίασης και κατασκευής του συγκεκριμένου κινητήρα ήταν η συμμετοχή στον πανευρωπαϊκό διαγωνισμό Shell EcoMarathon. Στο διαγωνισμό συμμετέχουν πρότυπα οχήματα μειωμένης ενεργειακής κατανάλωσης. Δίνεται η δυνατότητα επιλογής του είδους καυσίμου ή γενικότερης πηγής ενέργειας με το οποίο η κάθε ομάδα μπορεί να διαγωνιστεί. Στην κατηγορία των ηλεκτρικών οχημάτων με επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές, η ομάδα της σχολής ΗΜΜΥ του ΕΜΠ, με το όχημα 'Πυρφόρος' και τον κινητήρα που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία, κατέκτησε την 7<sup>η</sup> θέση ανάμεσα σε 23 συμμετέχοντες, επιτυγχάνοντας την κατανάλωση μόλις 85Watt για τα 51 λεπτά του αγώνα, με τη μέση ταχύτητα των 30km/h. Αυτό αντιστοιχεί σε αυτονομία 360km/kWh ή 3492km ανά ισοδύναμο λίτρο βενζίνης. Η φετινή προσπάθεια υπήρξε η πρώτη επιτυχημένη για το ΕΜΠ στο πλαίσιο του διαγωνισμού αυτού, ενώ η ομάδα 'Προμηθέας' που σχεδίασε και κατασκεύασε το όχημα κρατά πλέον τον τίτλο της επίδοσης για ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση πρότυπου οχήματος στην Ελλάδα.

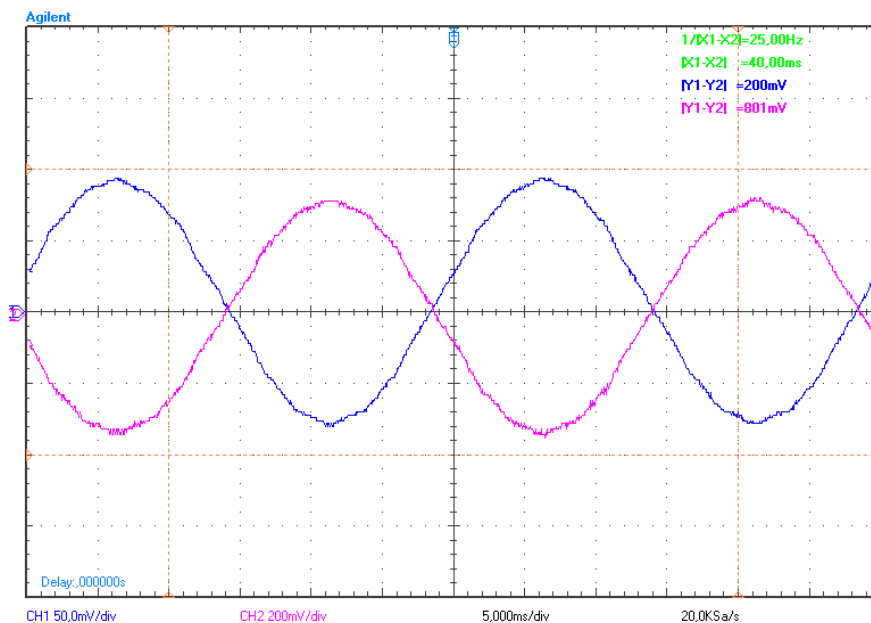


Εικόνα 3 Το όχημα 'Πυρφόρος' κατά τη διάρκεια του διαγωνισμού

### 5.3 Πειραματική Επιβεβαίωση

Το πείραμα για τη λήψη των απαραίτητων μετρήσεων με σκοπό την εξαγωγή των χαρακτηριστικών του κινητήρα πραγματοποιήθηκε ως εξής: ο κινητήρας εξετάστηκε σε λειτουργία γεννήτριας έτσι ώστε να μετρηθεί η απόδοσή του χωρίς να υπολογιστούν οι απώλειες τριβών από το λάστιχο. Χρησιμοποιήθηκε κινητήρας συνεχούς ρεύματος για την περιστροφή του και μετρήθηκε η ενεργός τιμή του φασικού ρεύματος και της τάσης εξόδου καθώς και η ηλεκτρική ισχύς εξόδου από τη λειτουργία γεννήτριας. Για τη μέτρηση της ροπής χρησιμοποιήθηκε πιεζοαντίσταση συνδεδεμένη στον άξονα της μηχανής. Επιπλέον, για κάθε σειρά μετρήσεων, μετρούταν και η ακριβής ταχύτητα περιστροφής με σκοπό τον υπολογισμό της μηχανικής ισχύος εισόδου. Ελήφθησαν περίπου 10 μετρήσεις, ξεκινώντας από μικρό φορτίο (1.5% του ονομαστικού) το οποίο αυξανόταν σταδιακά μέχρι 92% της ονομαστικής ισχύος. Λόγω υψηλού ρεύματος, δε μετρήθηκαν χαρακτηριστικά για μεγαλύτερο φορτίο.

Η έξοδος της γεννήτριας συνδέθηκε επίσης με παλμογράφο για την καταγραφή της μορφής του ρεύματος και της τάσης.



Σχήμα 5. 1 Η τάση και το ρεύμα εξόδου (φασικά μεγέθη) της μηχανής σε λειτουργία γεννήτριας

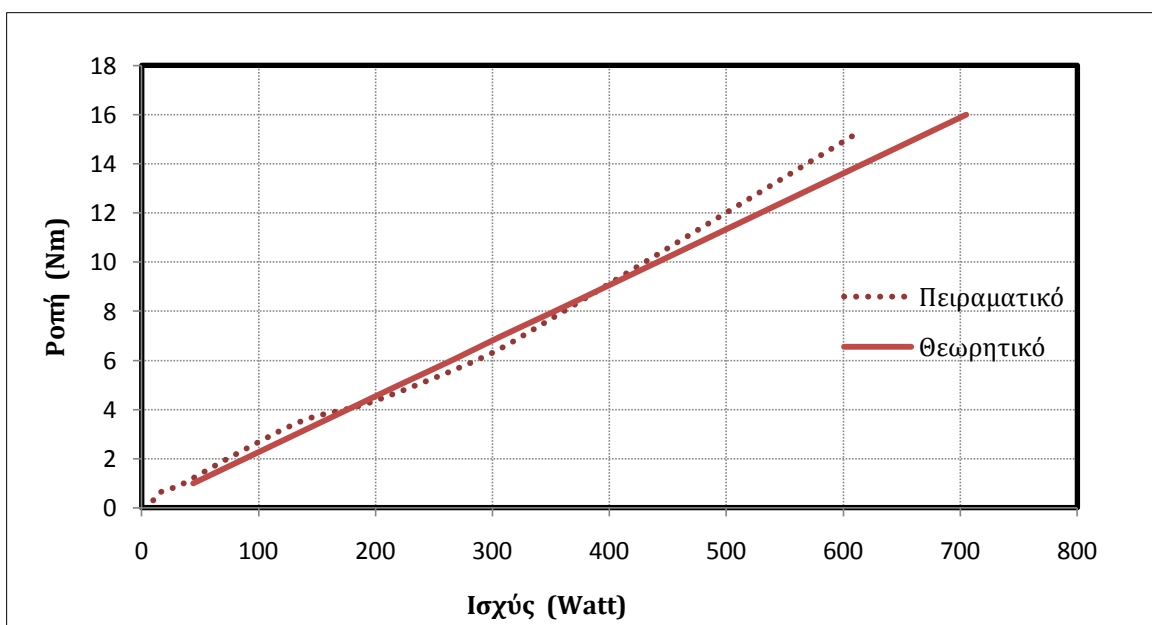
Με βάση αυτές τις μετρήσεις κατασκευάστηκαν ο χαρακτηριστικές ροπής – ισχύος, ισχύος – φασικού ρεύματος και απόδοσης – ισχύος εξόδου. Να σημειωθεί ότι όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής, καθώς η εφαρμογή υπαγορεύει σταθερή ταχύτητα.

Εύκολα παρατηρείται από το παλμογράφημα η ικανοποιητικά ημιτονοειδής μορφή των κυματομορφών τάσης και ρεύματος, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι δεν υπάρχει έντονο αρμονικό περιεχόμενο. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η χαρακτηριστική ροπής-ισχύος για πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα.

Θα πρέπει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι τα πειραματικά δεδομένα αντιστοιχούν σε λειτουργία γεννήτριας. Επομένως, η ροπή είναι η ροπή εισόδου στον άξονα. Υπολογίζεται με τη βοήθεια πιεζοαντίστασης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, συνδεδεμένης στον άξονα της μηχανής. Η ισχύς μετριέται από την έξοδο της μηχανής με αμπεροτσιμπίδα (power clamp meter).

Σχτικά με τα θεωρητικά δεδομένα, αυτά υπολογίζονται με τη βοήθεια προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων και για λειτουργία κινητήρα. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η ροπή για τη συγκεκριμένη φόρτιση του κινητήρα και πολλαπλασιάζεται με τις στροφές για την εύρεση της μηχανικής ισχύος εξόδου. Σε αυτήν προστίθενται οι απώλειες χαλκού και πυρήνα που έχουν υπολογιστεί ώστε να βρεθεί η ηλεκτρική ισχύς εξόδου.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί συγκρίνονται τα πειραματικά με τα θεωρητικά δεδομένα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει τη ροπή και ο οριζόντιος την ηλεκτρική ισχύ. Για την περίπτωση γεννήτριας η ηλεκτρική ισχύς είναι η έξοδος, ενώ για την περίπτωση του κινητήρα έξοδος είναι η ροπή.

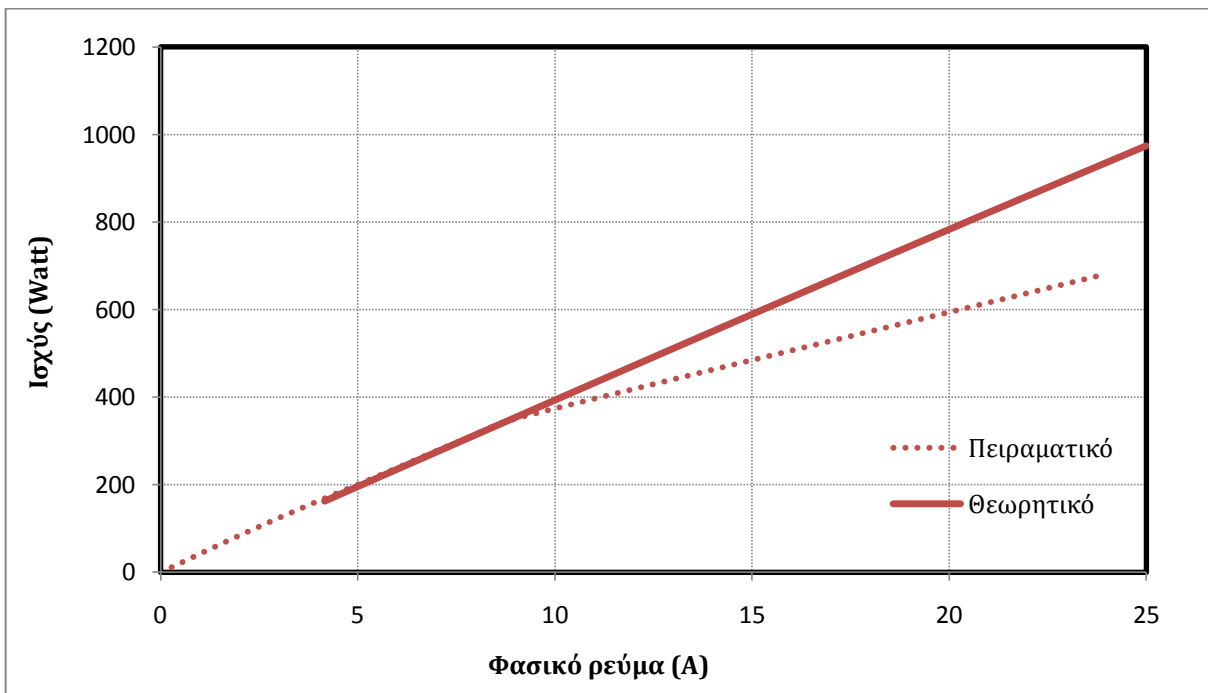


Σχήμα 5. 2 Σύγκριση των θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων ροπής συναρτήσει ισχύος



Τα πειραματικά αποτελέσματα συνάδουν με τα θεωρητικά και μάλιστα οι τιμές που σημειώνονται παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις.

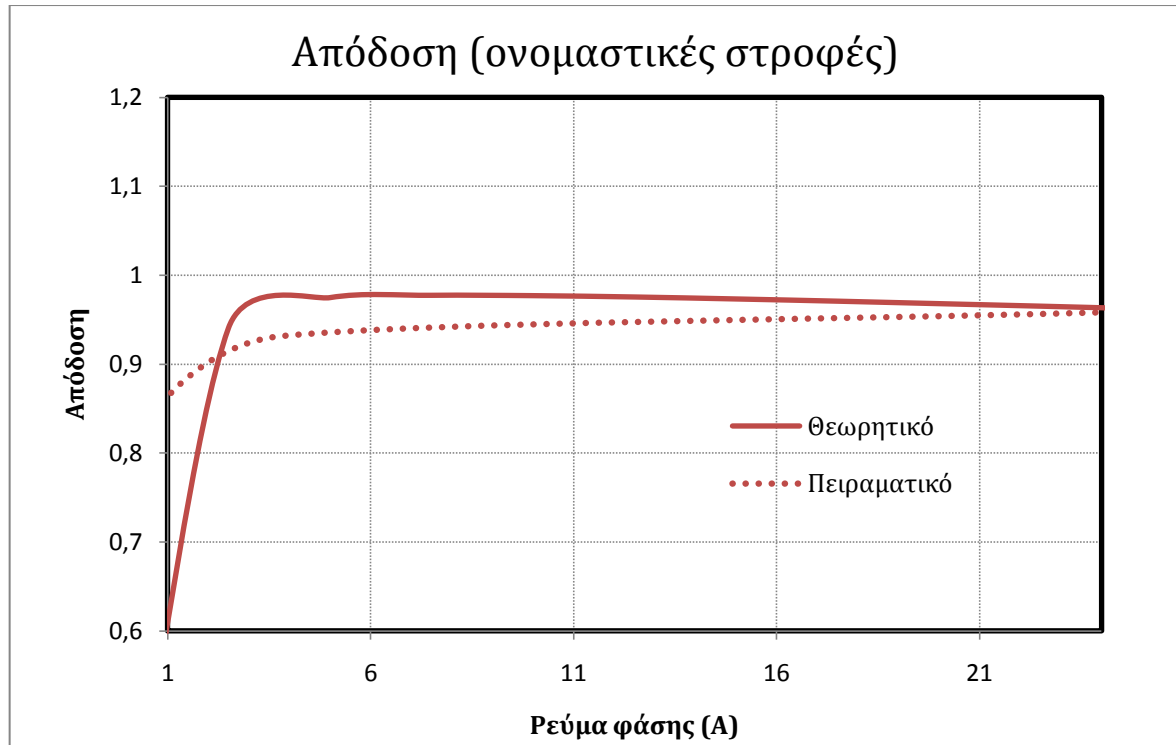
Η χαρακτηριστική ισχύος - φασικού ρεύματος φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Υπάρχει μια μεγαλύτερη απόκλιση στη συγκεκριμένη περίπτωση, με την αύξηση του ρεύματος. Παρόλα αυτά, η απόκλιση μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι οι αντιστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν μπορεί να μην ήταν καθαρά ωμικά στοιχεία.



Σχήμα 5. 3 Σύγκριση των θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων ισχύος συναρτήσει φασικού ρεύματος

Ακολουθεί, τέλος, ο θεωρητικός και πειραματικός υπολογισμός της απόδοσης. Στην περίπτωση των θεωρητικών δεδομένων υπολογίζεται η μηχανική ισχύς εξόδου καθώς και οι απώλειες χαλκού και σιδήρου. Διαιρείται η ισχύς εξόδου με την ισχύ εισόδου και ευρίσκεται η απόδοση. Για τα πειραματικά δεδομένα πραγματοποιείται μέτρηση της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου και της μηχανικής ισχύος εισόδου, μέσω της ροπής και της ταχύτητας περιστροφής.

Για ακόμη μια φορά υπάρχει συμφωνία των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα θεωρητικά προβλεπόμενα. Στη συνέχεια ακολουθούν αναλυτικά οι μετρήσεις που ελήφθησαν στο εργαστήριο για την παραπάνω πειραματική επιβεβαίωση.



Σχήμα 5. 4 Σύγκριση των θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων απόδοσης συναρτήσει ρεύματος φάσης για ονομαστικές στροφές

ΣΑΛ	Τροφοδοσία		Πιεζο-αντίσταση Ένδειξη Vs - Τροφοδοσία Vcc		Έξοδος		
	Vdc(V)	Idc(A)	Vs (mV)	Vcc(V)	Irms(A)	Vrms(V)	Pel(W)
395	160	1	1.9	10.1	0.28	21.65	10
400	162	1	2	10.1	0.41	21.86	15
397	161	1.1	2.2	10.1	0.73	21.09	27
400	162	1.48	2.3	10.1	0.88	21.73	33
401	162	1.8	3.6	10.1	2.21	21.63	83
399	162	2.23	4.9	10.1	3.79	21.12	139
398	163	2.6	5.6	10.1	5.44	20.7	195
398	166	3.02	7.1	10.1	7.8	20.55	277
400	168	3.4	8.1	10.1	9.19	20.12	320
400	170	6.05	16.4	10.1	24	14.6	614

Πίνακας 5. 1 Οι μετρήσεις που ελήφθησαν για την πειραματική επιβεβαίωση του κινητήρα

Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η ροπή στον άξονα από τη μετρηθείσα τάση της πιεζοαντίστασης είναι ο εξής:

$$T = \frac{(V_s - V_{offset}) \cdot B \cdot l}{V_{cc}} \quad (5.1)$$

$V_s$  η μετρηθείσα τάσης της πιεζοαντίστασης

$V_{offset}$  η σταθερή ένδειξη της πιεζοαντίστασης (offset)

$B=20kg \cdot 9.81 \text{ m/s}^2$  το βάρος που ασκείται

$l= 0.105m$  η απόσταση από τον άξονα της μηχανής

$V_{cc} = 2 \frac{mV}{V} \cdot 10.1V$  η τάση τροφοδοσίας

#### 5.4 Σύγκριση με υφιστάμενο κινητήρα

Αρχικά, πραγματοποιείται σύγκριση των δύο μηχανών σε επίπεδο γενικών χαρακτηριστικών και γεωμετρίας. Σε ό,τι αφορά τα γενικά χαρακτηριστικά θα πρέπει να αναφερθεί ότι και οι δύο μηχανές είναι δεκαπολικές, αλλά η υφιστάμενη μηχανή έχει 30 δόντια στο στάτη ενώ η νέα έχει 12 δόντια. Αυτό μεταφράζεται σε 3 αυλάκια ανά πόλο ανά φάση για τον υφιστάμενο κινητήρα και 0.4 αυλάκια ανά πόλο ανά φάση για το νέο. Στη συνέχεια, αξίζει να τονιστεί η διαφορά στο τύλιγμα. Ο υφιστάμενος κινητήρας έχει κατανεμημένο τύλιγμα, απλής στρώσης, πλήρους βήματος, ενώ ο νέος έχει συγκεντρωμένο τύλιγμα, διπλής στρώσης, κλασματικού βήματος.



Εικόνα 4 Κατασκευασμένοι αριστερά ο προηγούμενος και δεξιά ο νέος κινητήρας

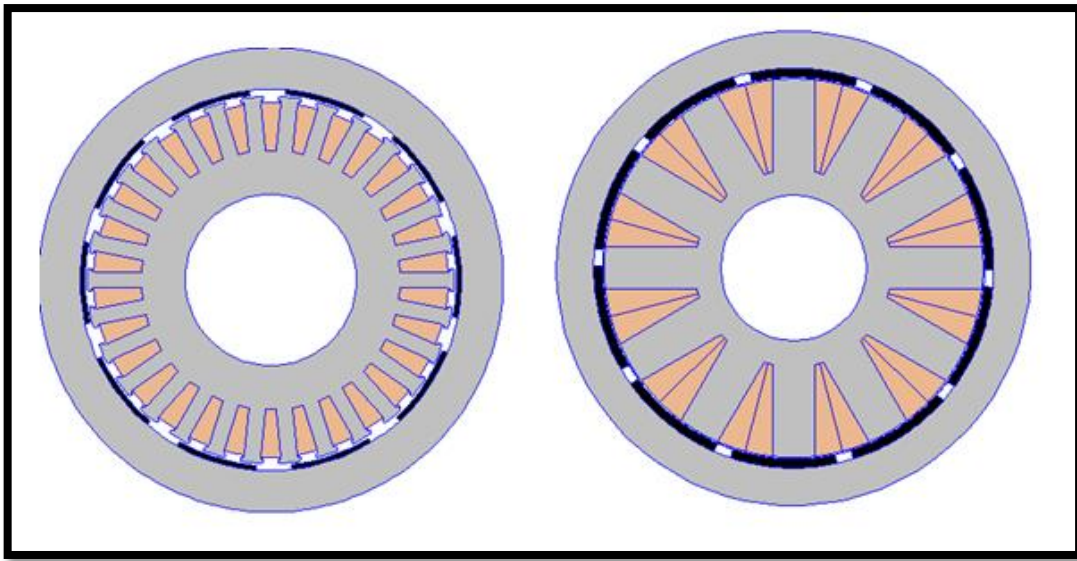
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	Υφιστάμενος κινητήρας	Νέος κινητήρας
Αξονικό μήκος (mm)	30	20
Διάκενο (mm)	1	0.7
Μέγιστη πυκνότητα ρεύματος (A/mm <sup>2</sup> )	4	4
Ελίγματα	30	35
<b>Στάτης</b>		
Εξωτερική διάμετρος (mm)	150	170
Σώμα (mm)	13	11.66
Πλάτος δοντιού (mm)	3	19.43
Υλικό	0.5mm laminated M-15 steel	0.35mm laminated M-27 steel
<b>Δρομέας</b>		
Εξωτερική διάμετρος (mm)	190	212.98
Σώμα (mm)	17	20.79
Πάχος μαγνήτη (mm)	1	4
Μήκος τόξου μαγνήτη (°)	25	31
Υλικό	Non laminated steel	0.35mm laminated M-27 steel
Τύπος μαγνήτη	NdFeB 40 MGOe	NdFeB 40 MGOe

Πίνακας 5. 2 Σύγκριση χαρακτηριστικών προηγούμενου και νέου κινητήρα

Για λόγους ευκολίας στη συνέχεια οι κινητήρες νέος και υφιστάμενος θα αναφέρονται και ως κλασματικού και πλήρους βήματος, αντίστοιχα.

## Επίδοση

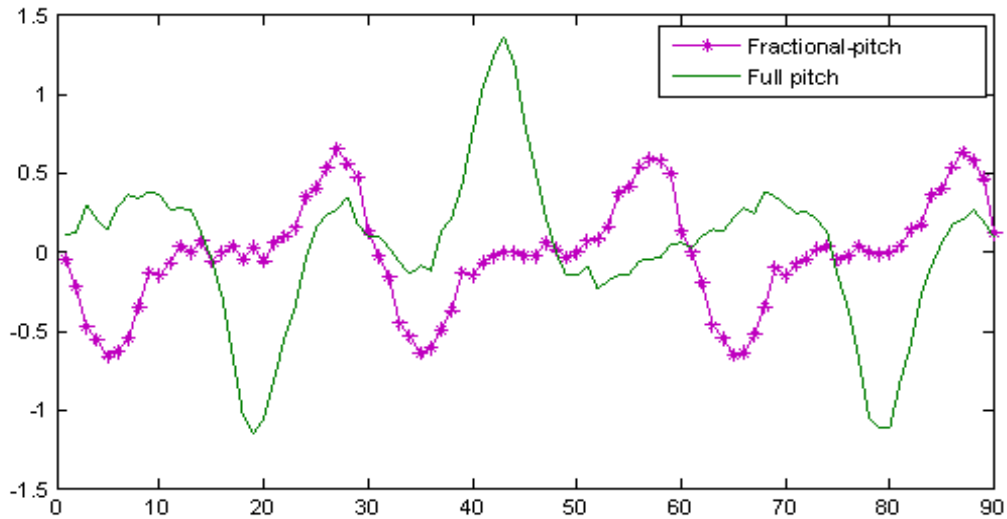
Ο κινητήρας πλήρους βήματος έχει σχεδιαστεί με ονομαστική ροπή 3Nm, ενώ ο κινητήρας κλασματικού βήματος έχει ονομαστική ροπή 16 Nm. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4, ο λόγος για τον οποίο σχεδιάστηκε κινητήρας με μεγαλύτερη ροπή είναι ότι ο πρώτος κινητήρας αντιμετώπιζε προβλήματα κατά την εκκίνηση σε δρόμους με μικρή κλίση, και γενικά δεν παρείχε πάντα την απαιτούμενη ροπή. Η αναξιοπιστία αυτή οδήγησε στην υπερδιαστασιολόγηση της νέας μηχανής. Η διαφορά στην επίδοση ήταν εμφανής για το όχημα.



Εικόνα 5 Σχεδιαστική σύγκριση των δύο κινητήρων – προηγούμενος (αριστερά) και νέος (δεξιά)

## Ροπή ευθυγράμμισης

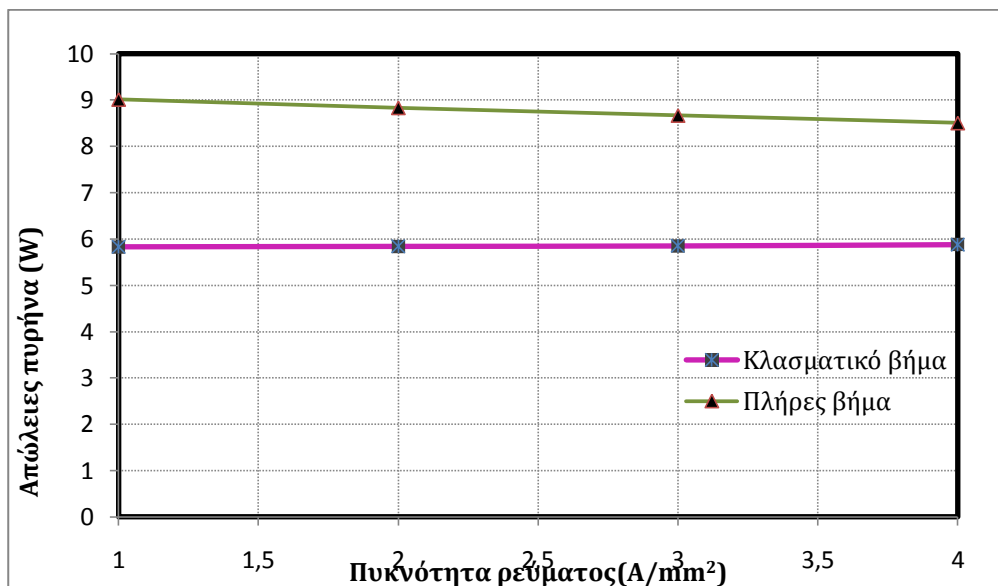
Εξ' αρχής αναμενόταν ο κινητήρας κλασματικού βήματος να παρουσιάζει μικρότερη ροπή ευθυγράμμισης από τον κινητήρα πλήρους βήματος. Βέβαια, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4, υπάρχουν συνδυασμοί αριθμού πόλων και αυλακών για τους οποίους ελαχιστοποιείται η ροπή ευθυγράμμισης, αλλά και η κυμάτωση της ροπής. Τα αποτελέσματα της θεωρητικής σύγκρισης φαίνονται στον παρακάτω διάγραμμα και επιβεβαιώνουν τα προαναφερθέντα.



Σχήμα 5. 5 Σύγκριση ροπής ευθυγράμμισης προηγούμενου (πλήρους βήματος-full pitch) και νέου κινητήρα (κλασματικού βήματος-fractional pitch)

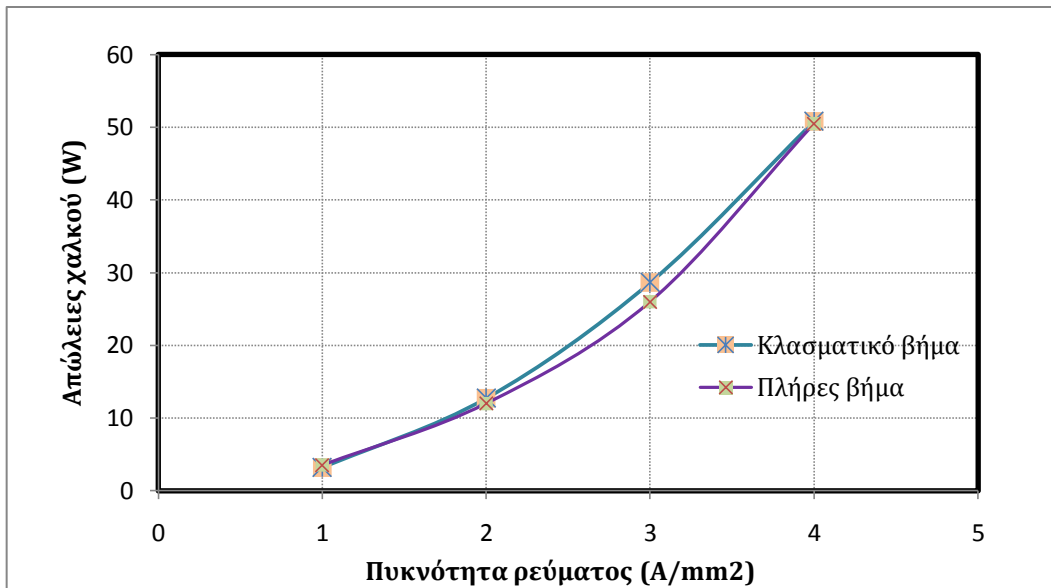
### Απόδοση

Υπολογίζονται με τη βοήθεια της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία οι απώλειες χαλκού και σιδήρου για τις δύο μηχανές. Αυτό που αναμένεται να παρατηρηθεί είναι χαμηλότερες απώλειες πυρήνα στον κινητήρα κλασματικού βήματος, διότι λόγω χαμηλότερου συντελεστή τυλίγματος και για τη θεμελιώδη αλλά και για τις αρμονικές περιττής τάξης, είναι μικρότερο το αρμονικό περιεχόμενο της ΜΕΔ. [5] Αυτό επιβεβαιώνεται μέσω του παρακάτω διαγράμματος.



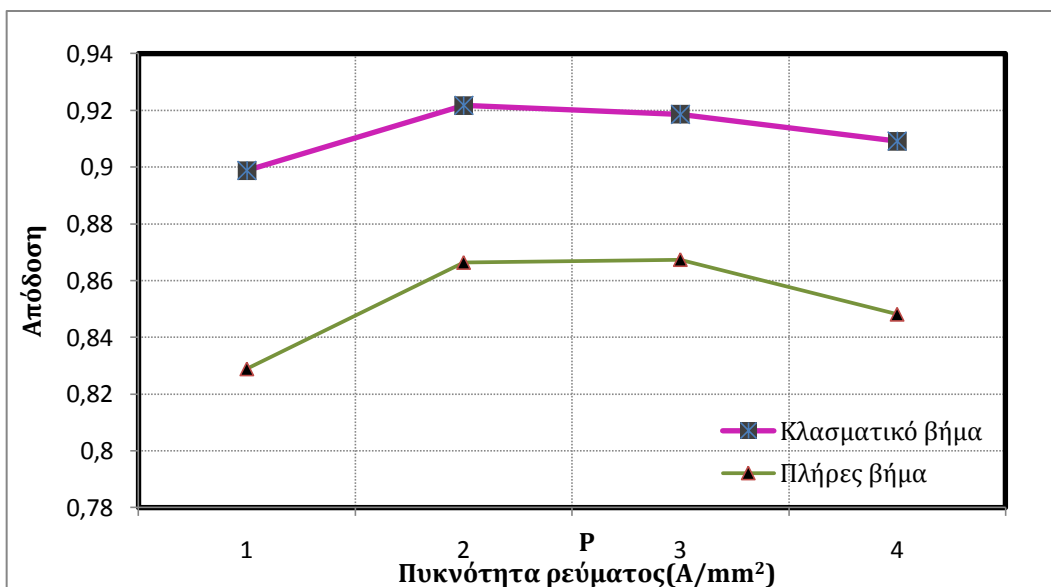
Σχήμα 5. 6 Σύγκριση απωλειών πυρήνα για κινητήρα πλήρους και κλασματικού βήματος

Οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται κυρίως από την πυκνότητα ρεύματος και για το λόγο αυτό κινούνται στις ίδιες περίπου τιμές, όπως φαίνεται:



Σχήμα 5. 7 Σύγκριση απωλειών χαλκού για κινητήρα πλήρους και κλασματικού βήματος

Τελικά, η απόδοση του κινητήρα κλασματικού βήματος είναι μεγαλύτερη από αυτήν του κινητήρα πλήρους βήματος. Στην εκτίμηση της απόδοσης έχει ληφθεί και μια προσεγγιστική τιμή των απωλειών περιστροφής, η οποία είναι 10Watt και για τις δυο μηχανές. Για το λόγο αυτό η απόδοση στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται μικρότερη απ' ότι στο διάγραμμα.

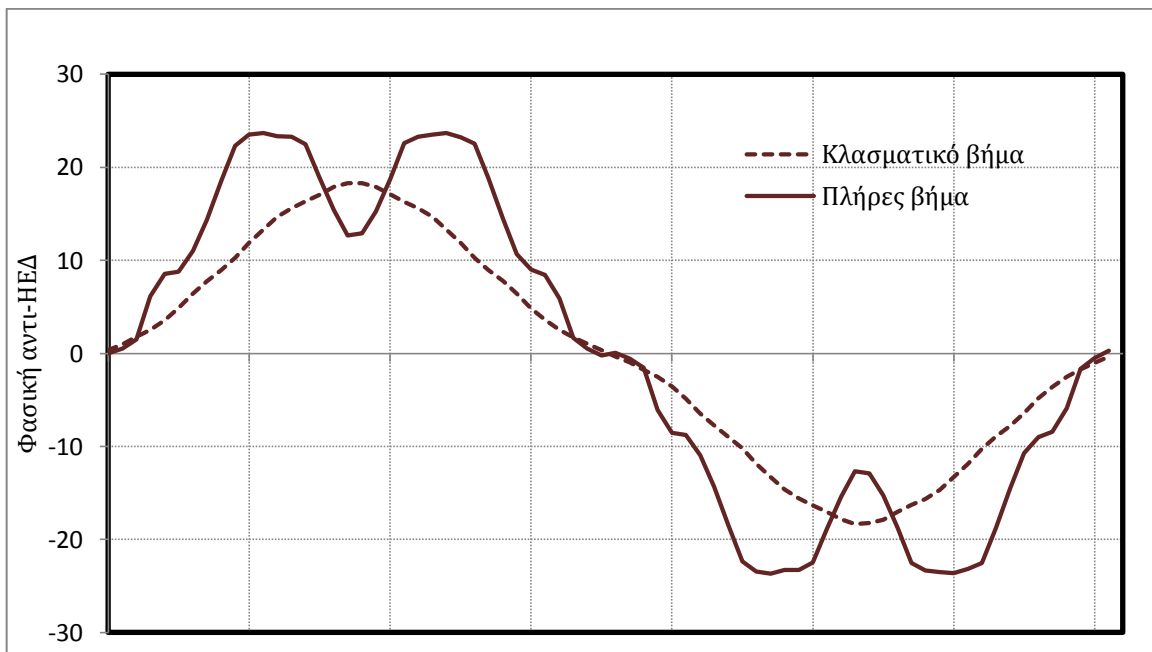


Σχήμα 5. 8 Σύγκριση βαθμού απόδοσης κινητήρα πλήρους και κλασματικού βήματος

## Ηλεκτρεγερτική δύναμη

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του κλασματικού βήματος είναι η ημιτονοειδής μορφή της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (back-emf), πράγμα το οποίο διαπιστώνεται και από τη σύγκριση με το πλήρες βήμα, στο διάγραμμα. Βέβαια, φαίνεται και η μείωση της τιμής της αντι-HEΔ στο κλασματικό βήμα, σε σχέση με το πλήρες, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, λόγω του συντελεστή βήματος  $k_{pn}$ , αφού:

$$\begin{aligned}
 HE\Delta_{\text{κλασματικό βήμα}} &= k_{pn} \cdot HE\Delta_{\text{πλήρες βήμα}} \\
 &= \sin\left(\frac{n \cdot 5/6 \cdot 180^\circ}{2}\right) \cdot HE\Delta_{\text{πλήρες βήμα}} \\
 \Rightarrow HE\Delta_{\text{κλασματικό βήμα}} &= 0.966 \cdot HE\Delta_{\text{πλήρες βήμα}}
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$



Σχήμα 5. 9 Σύγκριση αντι-HEΔ κινητήρα πλήρους και κλασματικού βήματος



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

#### 6.1 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε κινητήρας υψηλής απόδοσης με σκοπό να ικανοποιεί τις προδιαγραφές που ετέθησαν για την κίνηση ενός πρωτότυπου οχήματος χαμηλών απωλειών.

Συγκεκριμένα, πρόκειται για κινητήρα μονίμων επιφανειακών μαγνητών, εξωτερικού δρομέα, και απόδοσης άνω του 90% σε ικανοποιητικό εύρος ισχύος εξόδου. Επιπλέον, σημαντική ήταν και η ιδιότητα παροχής αυξημένης ροπής, σε σχέση με αυτή που απαιτούνταν από την εφαρμογή. Ο εν λόγω κινητήρας κατασκευάστηκε και προσαρτήθηκε στον τροχό του οχήματος 'Πυρφόρος', στο πλαίσιο της συμμετοχής της ομάδας HMMY του ΕΜΠ στον πανευρωπαϊκό διαγωνισμό οικονομίας καυσίμου Shell EcoMarathon 2011.

Συγκεντρωτικά, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη σχεδίαση του εν λόγω κινητήρα, αλλά και από τη σύγκρισή του με τον υφιστάμενο κινητήρα που είχε σχεδιαστεί για την ίδια εφαρμογή, έχουν ως εξής:

- Είναι δυνατόν να αποφευχθούν τα πεπλατυσμένα δόντια του στάτη αν υιοθετηθεί συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος, το οποίο εμφανίζει μειωμένη ροπή ευθυγράμμισης. Με αυτόν τον τρόπο, επιπλέον, δημιουργείται περισσότερος χώρος για τα τυλίγματα χαλκού, με αποτέλεσμα την επίτευξη μεγαλύτερου συντελεστή πληρότητας.
- Οι κινητήρες μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένο τύλιγμα, διπλής στρώσης και κλασματικού βήματος υπερέχουν έναντι των κινητήρων κατανεμημένου τυλίγματος, μονής στρώσης, πλήρους βήματος. Παρουσιάζουν χαμηλότερη ροπή ευθυγράμμισης και κυμάτωση ροπής, ευκολότερη κατασκευή λόγω λιγότερων αυλακών και ευκολίας στο τύλιγμα, περισσότερο ημιτονοειδή κατανομή της ΗΕΔ, μικρότερο αρμονικό περιεχόμενο ΜΕΔ και χαμηλότερες απώλειες σιδήρου άρα συνολικά μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης.

- Η πλήρως παραμετροποιημένη σχεδίαση που προτάθηκε στην παρούσα εργασία αποτελεί ισχυρό εργαλείο για τη σύγκριση τοπολογιών με διαφοροποιημένες βασικές παραμέτρους, όπως είναι το μήκος τόξου του μαγνήτη και το πλάτος του δοντιού. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την παραμετροποιημένη σχεδίαση λαμβάνονται υπόψη σημαντικοί παράγοντες, όπως είναι η πορεία της μαγνητικής ροής στο σώμα του στάτη και του δρομέα και η διατήρηση συγκεκριμένου βάθους της αύλακας για το τύλιγμα. Τελικά, η παραμετροποιημένη σχεδίαση συμπληρώνει τη διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης τοπολογίας.
- Υπάρχει βέλτιστος συνδυασμός μήκους τόξου μαγνήτη και πλάτους δοντιού για ελαχιστοποίηση της ροπής ευθυγράμμισης και μεγιστοποίησης της ροπής, για τη μέγιστη αποδεκτή τιμή της μαγνητικής επαγωγής στα δόντια του στάτη. Αυτός ο συνδυασμός προκύπτει από τη σάρωση του πεδίου ορισμού των προαναφερθέντων παραμέτρων.
- Υπάρχει συμφωνία ανάμεσα στους θεωρητικούς υπολογισμούς και τις πειραματικές μετρήσεις και αυτό σημαίνει ότι τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη σχεδίαση ήταν αξιόπιστα.

## 6.2 Πρωτότυπη συνεισφορά της εργασίας

Η εργασία επιχείρησε την πλήρη μελέτη και πρόταση κατασκευής ενός κινητήρα μονίμων μαγνητών, κεντρικό χαρακτηριστικό του οποίου είναι η υψηλή απόδοση λειτουργίας, της τάξης του 90%. Η προτεινόμενη διαμόρφωση ξεχωρίζει λόγω της τοπολογίας του εξωτερικού δρομέα, χάριν της οποίας αποφεύγεται το κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης και οι απώλειες τις οποίες αυτό συνεπάγεται. Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το τύλιγμα του στάτη του κινητήρα, το οποίο είναι συγκεντρωμένο, διπλής στρώσης, κλασματικού βήματος και υπερέχει σε αρκετά σημεία έναντι του κατανεμημένου τυλίγματος, απλής στρώσης, πλήρους βήματος της υφιστάμενης μηχανής. Σε ό,τι αφορά το στάτη της μηχανής επιλέχθηκε ορθογωνικό σχήμα δοντιού, χωρίς πεπλατυσμένα άκρα, για μεγαλύτερη ευκολία κατά την περιέλιξη. Η σχεδίαση και κατασκευή ενός τέτοιου κινητήρα αποτέλεσε κίνητρο για την ανάπτυξη επί μέρους τεχνικών ώστε να διευκολύνεται η βελτιστοποίηση της απόδοσης των κινητήρων ηλεκτρικών οχημάτων.

Πιο συγκεκριμένα, κατά την παραπάνω προσπάθεια, οι κυριότερες ιδιαίτερες τεχνικές που αναπτύχθηκαν ήταν οι ακόλουθες:

- Η παραμετροποιημένη σχεδίαση της μηχανής σε λογισμικό Matlab, μέσω σχέσεων που λαμβάνουν υπόψη την κατεύθυνση και την ποσότητα της μαγνητικής ροής που διέρχεται μέσα από το σώμα του στάτη και του δρομέα. Οι εν λόγω σχέσεις χρησιμοποιούν, επίσης, τις γεωμετρικές διαστάσεις του μαγνήτη (πάχος και μήκος τόξου) καθώς και τις διαστάσεις του δοντιού του στάτη. Με την παραμετροποιημένη σχεδίαση εξασφαλίζεται ότι κάθε φορά που θα αλλάζουν ορισμένες δοθείσες διαστάσεις στο πρόγραμμα του Matlab, ο κινητήρας θα σχεδιάζεται στο Femm, τηρώντας όλες τις απαραίτητες σχεδιαστικές προδιαγραφές.
- Η ανάλυση ευαισθησίας της ροπής και της μαγνητικής επαγωγής, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του στάτη αλλά και του μαγνήτη. Κατά τη διαδικασία αυτή επιχειρείται και η ελαχιστοποίηση της ροπής ευθυγράμμισης (cogging torque), ενώ η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυξάνεται λόγω της παραμετροποιημένης σχεδίασης.

### 6.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Η εργασία αυτή ανέδειξε ορισμένα σημεία που χρήζουν περαιτέρω συμπληρωματικής διερεύνησης. Προτείνεται μελλοντική εργασία στα παρακάτω θέματα:

- Διεξοδική πειραματική μέτρηση των χαρακτηριστικών του κατασκευασμένου κινητήρα και επικαιροποίηση της βελτιστοποίησης λαμβάνοντας υπ' όψιν τις κατασκευαστικές ατέλειες και τις επιπτώσεις των μηχανικών καταπονήσεων κατά τη διαμόρφωση των μαγνητικών υλικών.
- Επέκταση της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης της γεωμετρίας που προτάθηκε στην παρούσα εργασία, λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες της μηχανής, με σκοπό την επίτευξη ακόμη υψηλότερου βαθμού απόδοσης.
- Ανάπτυξη και σύγκριση μεθόδων υπολογισμού απωλειών πυρήνα, λαμβάνοντας υπόψη και την καμπύλη ειδικών απωλειών. Η ενσωμάτωση ακριβέστερων δεδομένων ειδικών απωλειών αναμένεται να δώσει πιο ακριβή αποτελέσματα.
- Υλοποίηση του κινητήρα ως ΣΡ χωρίς συλλέκτη (Brushless DC) με την κατάλληλη οδήγηση με σκοπό την πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3, αλλά κυρίως με σκοπό τη σύγκρισή του με τη σύγχρονη μηχανή.

## Βιβλιογραφία

- [1] C.C. Chan, K.T. Chau, *Modern electric vehicle technology*, University of Hong Kong, Oxford University Press.
- [2] Sandeep Dhameja, *Electric Vehicle Battery Systems*, Boston, 2001, Newnes
- [3] Husain, Iqbal, *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*, New York, 2003, CRC Press.
- [4] R. Krishnan, Electrical and Computer Engineering Department, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press, 2010
- [5] Florence Meier, *Permanent Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications*, Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, Electrical Machines and Power Electronics, 2008
- [6] K. Laskaris and A. Kladas, "High Torque Internal Permanent Magnet Motor for Electric Traction Applications", *Proceedings of the XVIII International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, Portugal, 6-9 September 2008, Paper ID 1428.
- [7] Freddy Magnussen, Dmitry Svechkarenko, Peter Thelin, Chandur Sadarangani, *Analysis of a PM Machine with Concentrated Fractional Pitch Windings*, KTH Royal Institute of Technology, Sweden
- [8] Mitch Olszewski, *Fractional-Slot Surface Mounted PM Motors with Concentrated Windings for HEV Traction Drives*, Energy Efficiency and Renewable Energy FreedomCAR and Vehicle Technologies, Vehicle Systems Team, 2005
- [9] Khwaja M. Rahman, Nitin R. Patel, Terence G. Ward, James M. Nagashima, Federico Caricchi, Fabio Crescimbin, 'Application of Direct-Drive Wheel Motor for Fuel Cell Electric and Hybrid Electric Vehicle Propulsion System', *Industry Applications Society Annual Meeting, Seattle, WA, October 2001*, Paper IPCSD-06-029
- [10] P. Salminen, M. Niemela, J. Pyrhonen, J. Mantere, *High-Torque Low-Ripple Fractional-Slot PM Motors*, Lappeenranta University of Technology, Laboratory of Electrical Engineering, Finland
- [11] Nicola Bianchi, *Impact of MMF Space Harmonic Rotor Losses in Fractional Slot Permanent Magnet Machines*, Paper TEC-00109-2008, 2008

- [12] F. Libert, J. Soulard, "Design Study of Different Direct-Driven Permanent-Magnet Motors for a Low Speed Application", *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics Trondheim*, Norway, 2004.
- [13] R. H. Staunton, S.C. Nelson ET. Al., *PM motor parametric design analyses for a Hybrid Electric Vehicle traction drive application*, Oak Ridge national laboratory, September 2004.
- [14] Hamdi, E. S. *Design of small electrical machines*, Chichester: 1998(1994), John Wiley & Sons.
- [15] Γεώργιος Ι. Τσεκούρας, *Μελέτη κατασκευής, ανάλυση κυκλωματικής και πεδιακής συμπεριφοράς δοκιμίου 2.5 kW και ανεμογεννήτριας 25 kW*, Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα, 2000, Ε.Μ.Π.
- [16] M. G. Say, *Alternating current machines*, Essex, 1986, Longman Scientific & Technical.
- [17] "Finite Element Method Magnetics, User's Manual", David Meeker, Μάιος 2008
- [18] Venkataraman, P., *Applied optimization with MATLAB® Programming*, New York, 2001, a Wiley & Sons Interscience Publication.
- [19] David Meeker, Iron Loss Calculations, <http://www.femm.info/list/msg00504.html>
- [20] Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*, 2008 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-69516-6
- [21] Copper wire properties,  
[http://www.epanorama.net/documents/wiring/wire\\_resistance.html](http://www.epanorama.net/documents/wiring/wire_resistance.html)