



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
FACULTY OF ENGINEERING

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Διπλωματική Εργασία

**Μοντελοποίηση και δυναμική ανάλυση κινητήρα
συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης**



Φοιτητής: Δούναβης Μιχαήλ

Αριθμός μητρώου: 212017100

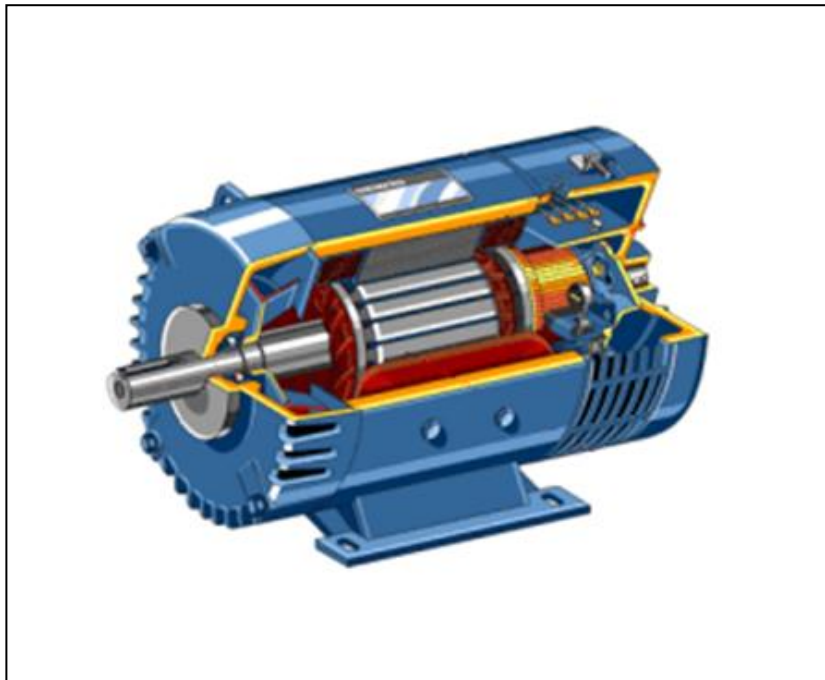
Επιβλέπων Καθηγητής: Καραϊσάς Πέτρος

Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024

Diploma Thesis

Modeling and dynamic analysis of a direct current external excitation motor



Student: Michael Dounavis

Registration Number: 212017100

Supervisor: Karaisas Petros

Associate Professor

ATHENS-EGALEO, MARCH 2024

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Καραϊσάς Πέτρος Αναπληρωτής καθηγητής	Μαλατέστας Παντελής Καθηγητής	Συγγερίδου Ολυμπιάδα Λέκτορας
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Δούναβης Μιχαήλ, Μάρτιος, 2024

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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Δούναβης Μιχαήλ του Μάρκου, με αριθμό μητρώου 483212017100 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.»

Ο Δηλών

Δούναβης Μιχαήλ



Στους γονείς μου

Περίληψη

Στη διπλωματική εργασία που ακολουθεί μελετάται η λειτουργία του κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης και πιο συγκεκριμένα η χαρακτηριστική φορτίου του, υπό την επίδραση μεταβαλλόμενης τάσης στο τύλιγμα του τυμπάνου. Πρόκειται για μια μελέτη που επικεντρώνεται στη μελέτη της λειτουργίας του κινητήρα καθώς γίνεται έλεγχος των στροφών του.

Αρχικά, γίνεται η σχεδίαση του ισοδύναμου κυκλώματος του κινητήρα και καταστρώνονται οι εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του, αλλά και τη χαρακτηριστική φορτίου του. Στη συνέχεια, μέσω του λογισμικού Simulink, σχεδιάζεται το μοντέλο του κινητήρα, προσομοιώνεται για διάφορα επίπεδα τάσης στο τύλιγμα του τυμπάνου του και εξάγονται οι χαρακτηριστικές φορτίου του σε κοινούς άξονες.

Λέξεις – κλειδιά

Ηλεκτρικές μηχανές, Κινητήρες συνεχούς ρεύματος, Ξένη διέγερση, Ανεξάρτητη διέγερση, Χαρακτηριστική φορτίου, Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας, Μοντελοποίηση, Προσομοίωση, Έλεγχος στροφών

Abstract

In the diploma thesis that follows, the operation of direct current motors is studied, and more specifically the load characteristic of the external excitation motor, under the influence of changing voltage on the drum winding. This is a study that focuses on the study of the operation of the motor as its speed is controlled.

First, the equivalent circuit of the external excitation DC motor is designed and the equations describing its operation and the load characteristic are established. Then, through Simulink software, the motor is modeled, simulated for various performances in its drum winding and the load characteristic is extracted.

Keywords

Electric motors, DC motor, External excitation, Independent excitation, Load characteristic, Torque-speed characteristic, Modeling, Simulation, Speed control

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων.....	12
Κατάλογος Εικόνων.....	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	16
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	16
Σκοπός και στόχοι.....	16
Μεθοδολογία.....	16
Δομή.....	16
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ.....	18
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	18
1.2 Μαγνητικό πεδίο	19
1.2.1 Ορισμός του μαγνητικού πεδίου	19
1.2.2 Μαγνητικό πεδίο σε ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό	20
1.2.3 Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου	21
1.3 Η έννοια της μαγνητικής επαγωγής και μαγνητικής ροής.....	22
1.4 Μαγνητικές δυνάμεις	25
1.4.1 Δύναμη Lorentz σε φορτισμένο σωματίδιο	25
1.4.2 Δύναμη Laplace σε ρευματοφόρο αγωγό	26
1.4.3 Δύναμη Laplace παράλληλων ρευματοφόρων αγωγών	27

1.5	Ο νόμος του Ampere	28
1.6	Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή	30
1.6.1	Ηλεκτρεγερτική δύναμη εξ επαγωγής.....	30
1.6.2	Νόμος του Faraday	31
1.7	Μαγνητικά χαρακτηριστικά των υλικών	31
1.8	Μαγνητική υστέρηση.....	33
1.8.1	Μαγνητική υστέρηση μαγνητικών υλικών	33
1.8.2	Απώλειες μαγνητικής υστέρησης.....	35
1.9	Απώλειες δινορευμάτων	36
1.10	Θερμοκρασία Curie	37
2	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	38
2.1	Αρχή λειτουργίας — Παραγωγή ροπής	38
2.2	Ανάπτυξη αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης	40
2.3	Κατασκευαστικά μέρη κινητήρων συνεχούς ρεύματος	41
2.4	Διέγερση κινητήρα συνεχούς ρεύματος	44
2.5	Κατηγορίες τυλιγμάτων επαγωγικού τυμπάνου	45
2.5.1	Βροχοτυλίγματα	46
2.5.2	Κυματοτυλίγματα	46
2.6	Αντίδραση επαγωγικού τυμπάνου	47

2.7	Μαγνητικοί πόλοι με τυλίγματα αντιστάθμισης	49
2.8	Βοηθητικοί πόλοι	49
2.9	Καμπύλη μαγνήτισης	50
2.10	Απώλειες ισχύος και βαθμός απόδοσης	52
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΞΕΝΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ.....	55
3.1	Ισοδύναμο κύκλωμα	55
3.2	Χαρακτηριστική φορτίου	57
3.3	Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής	59
3.3.1	Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής με μεταβολή της τάσης τυμπάνου (V_a).....	60
3.3.2	Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής με μεταβολή του ρεύματος διεγέρσεως (I_f).....	61
3.3.3	Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής με μεταβολή της αντίστασης τυμπάνου (R_a)	63
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MATLAB	64
4.1	Εισαγωγή στα Matlab και Simulink	64
4.2	Περιγραφή της μελέτης	65
4.3	Επεξήγηση του λογισμικού Simulink	65
4.4	Ανάλυση των μπλοκ που απαρτίζουν το μοντέλο του κινητήρα.	68
4.4.1	Powergui	68
4.4.2	DC Machine	68
4.4.3	DC Voltage Source	69

4.4.4	Constant	70
4.4.5	Bus Selector	70
4.4.6	Gain	71
4.4.7	Display	71
4.4.8	Scope	72
4.4.9	XY Graph	72
4.4.10	To Workspace	73
4.5	Σχεδίαση του μοντέλου	73
4.6	Σχεδίαση και μελέτη των χαρακτηριστικών	76
4.7	Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής με μεταβολή της τάσης οπλισμού (V_a)	78
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
	Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές	84

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Ονομαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα	65
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά ονομαστικού σημείου λειτουργίας.....	77
Πίνακας 3: Επίπεδα τάσης δοκιμής	79

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Μαγνητικό πεδίο μεταξύ α) διαφορετικών πόλων, β) όμοιων πόλων.	19
Εικόνα 1.2: Δυναμικές γραμμές μαγνητικού πεδίου ραβδόμορφου μαγνήτη.....	20
Εικόνα 1.3: Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού.	21
Εικόνα 1.4: Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου.	22
Εικόνα 1.5: Μαγνητική ροή κάθετης επιφάνειας.....	23
Εικόνα 1.6: Μαγνητική ροή κεκλιμένης επιφάνειας.....	24
Εικόνα 1.7: Μαγνητική ροή παράλληλης επιφάνειας.....	24
Εικόνα 1.8: Μαγνητική δύναμη σε θετικά ή αρνητικά φορτισμένο σωματίδιο.....	26
Εικόνα 1.9: Ρευματοφόρος αγωγός εντός ομογενούς μαγνητικού πεδίου.....	27
Εικόνα 1.10: Παρουσία δύναμης Laplace μεταξύ παράλληλων ρευματοφόρων αγωγών.....	27
Εικόνα 1.11: Δύναμη Laplace σε ρευματοφόρους αγωγούς που διαρρέονται από α) ομόρροπα ρεύματα, β) αντίρροπα ρεύματα.....	28
Εικόνα 1.12: Πηνίο τυλιγμένο σε σιδηρομαγνητικό πυρήνα.....	29
Εικόνα 1.13: Ανάπτυξη ΗΕΔ σε πηνίο όταν α) ο μαγνήτης είναι ακίνητος, β) ο μαγνήτης εξέρχεται από το πηνίο, γ) ο μαγνήτης εισέρχεται στο πηνίο.....	30

Εικόνα 1.14: Καμπύλη μαγνήτισης σιδηρομαγνητικού υλικού.	32
Εικόνα 1.15: Τυπικός βρόγχος μαγνητικής υστέρησης.	34
Εικόνα 1.16: Βρόγχος υστέρησης α) σκληρού μαγνητικού υλικού, β) μαλακού μαγνητικού υλικού.	35
Εικόνα 1.17: Ανάπτυξη δινορευμάτων σε α) συμπαγή πυρήνα, β) πυρήνα δυναμοελασμάτων.	36
Εικόνα 2.1: (α) Στοιχειώδης ηλεκτροκινητήρας, (β) επαγωγικό τύμπανο.	38
Εικόνα 2.2: Στοιχειώδης ηλεκτροκινητήρας μίας σπείρας.	39
Εικόνα 2.3: (α) Στάτης κινητήρα, (β) μαγνητικός πόλος.	42
Εικόνα 2.4: (α) Δρομέας, (β) Πυρήνας επαγωγικού τυμπάνου.	42
Εικόνα 2.5: (α) Ομάδα τυλίγματος, (β) Τοποθέτηση ομάδων στις οδοντώσεις του πυρήνα.	43
Εικόνα 2.6: Συλλέκτης.	43
Εικόνα 2.7: (α) Ψυκτροφορέας, (β) Ψύκτρα.	44
Εικόνα 2.8: Διέγερση διπολικής μηχανής.	45
Εικόνα 2.9: Σύνδεση βροχοτυλίγματος στους τομείς του συλλέκτη.	46
Εικόνα 2.10: Σύνδεση κυματοτυλίγματος στους τομείς του συλλέκτη.	47
Εικόνα 2.11: (α) Κύριο μαγνητικό πεδίο, (β) Μαγνητικό πεδίο οπλισμού και (γ) Μετατόπιση ουδέτερης ζώνης.	48
Εικόνα 2.12: Τυλίγματα αντιστάθμισης διπολικής μηχανής.	49
Εικόνα 2.13: Διπολικός κινητήρας με βοηθητικούς πόλους.	50
Εικόνα 2.14: Χαρακτηριστική καμπύλη μαγνήτισης μηχανής Σ.Ρ.	51
Εικόνα 2.15: Χαρακτηριστική καμπύλη κενού φορτίου.	51
Εικόνα 3.1: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα με ξένη διέγερση.	55

Εικόνα 3.2: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα με ξένη διέγερση. **Error! Bookmark not defined.**

Εικόνα 3.3: Χαρακτηριστική γωνιακής ταχύτητας - ροπής..... 59

Εικόνα 3.4: Επίδραση της μεταβολής της τάσης τύλιγματος τυμπάνου στη χαρακτηριστική φορτίου.
..... 60

Εικόνα 3.5: Επίδραση της μεταβολής του ρεύματος διέγερσης σε όλο το φάσμα στροφών της χαρακτηριστικής φορτίου..... 62

Εικόνα 3.6: Επίδραση της παρεμβολής εξωτερικής αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου. . 63

Εικόνα 4.1: Λογισμικό Matlab & Simulink. 64

Εικόνα 4.2: Επιλογή του εικονιδίου “Simulink”..... 66

Εικόνα 4.3: Επιλογή του εικονιδίου “Blank Model”..... 66

Εικόνα 4.4: Επιλογή του εικονιδίου “Library Browser”..... 67

Εικόνα 4.5: Επιλογή του εικονιδίου “Run”..... 67

Εικόνα 4.6: Powergui..... 68

Εικόνα 4.7: DC Machine..... 69

Εικόνα 4.8: DC Voltage Source 70

Εικόνα 4.9: Constant..... 70

Εικόνα 4.10: Bus Selector 71

Εικόνα 4.11: Gain..... 71

Εικόνα 4.12: Display..... 71

Εικόνα 4.13: Scope 72

Εικόνα 4.14: XY Graph	72
Εικόνα 4.15: Το Workspace	73
Εικόνα 4.16: Τμήμα του μοντέλου που αφορά το κομμάτι του κινητήρα.....	74
Εικόνα 4.17: Μοντέλο κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση	75
Εικόνα 4.18: Χαρακτηριστικές ροπής, ταχύτητας, ρευμάτων οπλισμού και πεδίου σε συνάρτηση με το χρόνο.	76
Εικόνα 4.19: Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας.	78
Εικόνα 4.20: Μοντέλο για την σχεδίαση γραφικών σε κοινούς άξονες.	79
Εικόνα 4.21: Χαρακτηριστικές του κινητήρα συναντήσει του χρόνου για διάφορα επίπεδα τάσης. .	80
Εικόνα 4.22: Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας για διάφορες τάσεις οπλισμού.	81

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, όπως λέει και το όνομα τους, απαιτούν για τη λειτουργία τους μια πηγή συνεχούς ρεύματος και επειδή ως γνωστόν το δημόσιο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας παρέχει εναλλασσόμενη τάση, είχαν παραγκωνιστεί για πολλές δεκαετίες. Λόγω των τεχνολογικών εξελίξεων στον τομέα των ηλεκτρονικών διακοπών και των μικροελεγκτών και σε συνδυασμό με την αλματώδη μείωση του κόστους τους, έχουν επαναφέρει στο προσκήνιο τη χρήση τους. Σημαντικό ρόλο σε αυτό έπαιξε ένα πλεονέκτημα τους, το οποίο είναι το μεγάλο εύρος ρύθμισης της ταχύτητας τους, που ξεκινάει από τις μηδικές στροφές και μπορεί να ξεπεράσει τις ονομαστικές.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της λειτουργίας του κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση και πιο συγκεκριμένα η επίδραση μεταβαλλόμενης τάσης στο τύλιγμα του τυμπάνου στη χαρακτηριστική φορτίου του κινητήρα.

Σκοπός και στόχοι

Σκοπός της εργασίας είναι να διερευνηθεί εάν μπορεί να γίνει έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση με μεταβολή της τάσης στο οπλισμό του, χωρίς να επηρεαστεί η ροπή του φορτίου.

Μεθοδολογία

Αρχικά, σχεδιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα, όπου στη συνέχεια με βάση αυτό γίνεται η σχεδίαση του μοντέλου στο λογισμικό Simulink. Έπειτα προσημειώνεται το μοντέλο για διάφορα επίπεδα εφαρμοζόμενης τάσης στο τύλιγμα του τυμπάνου του και σχεδιάζονται οι χαρακτηριστικές φορτίου για κάθε επίπεδο τάσης σε κοινούς άξονες.

Δομή

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια, όπου στο πρώτο γίνεται μια αναφορά στις βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού που πρέπει κάποιος να γνωρίζει, ώστε να μπορέσει να κατανοήσει την λειτουργία των μηχανών συνεχούς ρεύματος,

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας εξηγείται η αρχή λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος και περιλαμβάνει μία συνοπτική περιγραφή των εξαρτημάτων που είναι απαραίτητα για την κατασκευή και τη λειτουργία τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στον κινητήρα ξένης διέγερσης. Εκεί σχεδιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του, καταστρώνονται οι εξισώσεις που το περιγράφουν και σχεδιάζεται η χαρακτηριστική φορτίου. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι τρόποι ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας περιγράφεται και υλοποιείται ο σχεδιασμός του μοντέλου στο λογισμικό Simulink και προσημειώνεται η λειτουργία του.

Στο πέμπτο κεφάλαιο καταγράφονται όλα τα συμπεράσματα και τις διαπιστώσεις που προήλθαν μέσα από το πρακτικό κομμάτι κλείνοντας ουσιαστικά την εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

1.1 Ιστορική αναδρομή

Ο ηλεκτρομαγνητισμός είναι μια από τις πιο σημαντικές και βασικές αρχές της φυσικής και αποτελεί τη βάση για τη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών. Μέχρι το 18ο αιώνα οι επιστήμονες θεωρούσαν τον ηλεκτρισμό και το μαγνητισμό ως δυο τελείως διαφορετικά και ανεξάρτητα μεταξύ τους φαινόμενα.

Η ιστορία του ηλεκτρομαγνητισμού ξεκινά στις αρχές του 19ου αιώνα, όταν οι επιστήμονες της εποχής, ανακάλυψαν ότι ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός είναι στενά συνδεδεμένα φαινόμενα. Οι πειραματιστές της εποχής ανακάλυψαν πειραματικά ότι ο ηλεκτρισμός μπορεί να παράγει μαγνητικά πεδία και αντιστρόφως, ο μαγνητισμός μπορεί να παράγει ηλεκτρικά πεδία. Αυτή η αμφίδρομη σχέση μεταξύ του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού αποτέλεσε τη βάση του ηλεκτρομαγνητισμού. Οι πρώτες έννοιες για τη σχέση ανάμεσα στον ηλεκτρισμό και το μαγνητισμό αναπτύχθηκαν από τους Ampere, Faraday και Oersted. (Chodos, 2001)

Το επόμενο μεγάλο βήμα έγινε όταν James Clerk Maxwell κατάφερε να αποδείξει με μαθηματικό τρόπο την αλληλεξάρτηση του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου, περιγράφοντας τις θεωρίες προηγούμενων επιστημόνων σε απλές μαθηματικές σχέσεις. Έτσι λοιπόν, το 1861 ο Maxwell δημοσίευσε τις μαθηματικές εξισώσεις για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, που είναι γνωστές ως νόμοι του Maxwell. Οι νόμοι αυτοί αποτελούν μια σειρά από τέσσερις εξισώσεις, που περιγράφουν τις σχέσεις μεταξύ των ηλεκτρικών και των μαγνητικών πεδίων και παρέχουν μια μαθηματική περιγραφή του ηλεκτρομαγνητισμού. (Σιαμαντούρας Δ., 2011) Οι εξισώσεις που διατύπωσε είναι:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \#(1.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \#(1.2)$$

$$\frac{1}{\mu_0} + \nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \#(1.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \#(1.4)$$

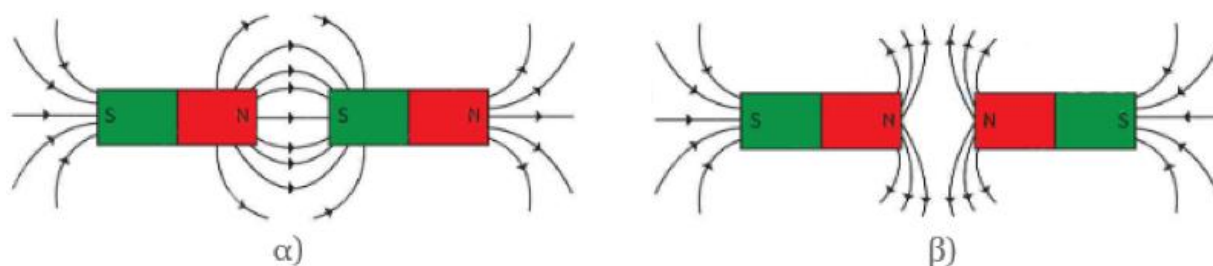
Από τότε και στο εξής, η πειραματική απόδειξη των συμπερασμάτων του Maxwell από τρίτους μελετητές, συνέβαλε στην ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρικών μηχανών και επηρέασε ανεξίτηλα τον

ανθρώπινο πολιτισμό και τον τρόπο ζωής των σύγχρονων κοινωνιών. (Γιαννίκας, Καλεσιάκης & Ψωμάδης, 2011)

1.2 Μαγνητικό πεδίο

1.2.1 Ορισμός του μαγνητικού πεδίου

Το μαγνητικό πεδίο είναι ένας χώρος μέσα στον οποίο αναπτύσσονται μαγνητικές δυνάμεις, είτε ελκτικές, είτε απωθητικές. Ο χώρος αυτός μπορεί να δημιουργηθεί από κάποιο φυσικό μαγνήτη ή από κάποιο αγωγό που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Σαν φυσικό μέγεθος έχει διπολική φύση και αυτό συνεπάγεται από την ύπαρξη δύο μαγνητικών πόλων, τον βόρειο (N) και τον νότιο (S) πόλο, οι οποίοι είναι αντίθετοι μεταξύ τους. Οι μαγνητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται ενδιάμεσα των πόλων, μπορούν να έχουν είτε ελκτικό, είτε απωθητικό χαρακτήρα. Έχει παρατηρηθεί ότι μεταξύ δύο μαγνητικών πόλων όμοιας πολικότητας, οι δυνάμεις που ασκούνται είναι απωθητικές, ενώ σε μαγνητικούς πόλους με διαφορετική πολικότητα οι δυνάμεις είναι ελκτικές. (Κόκκοτας, 2010)

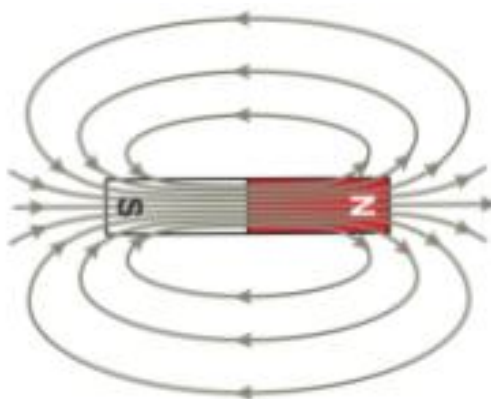


Εικόνα 0.1: Μαγνητικό πεδίο μεταξύ α) διαφορετικών πόλων, β) όμοιων πόλων.

Το μαγνητικό πεδίο σε ένα χώρο και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτόν, δεν είναι ορατά με γυμνό μάτι. Ο πιο εύκολος τρόπος για να ανιχνευτεί η πιθανή ύπαρξη μαγνητικού πεδίου στο χώρο, είναι με τη βοήθεια μιας πυξίδας. Καθώς εκείνη κινείται σε αυτόν, η θέση ισορροπίας της επηρεάζεται από την επίδραση του μαγνητικού πεδίου. Παρατηρώντας τον προσανατολισμό της πυξίδας, μπορεί να αναπαρασταθεί το μαγνητικό πεδίο και να σχεδιαστούν οι δυναμικές γραμμές του. Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου, ορίζουν την διεύθυνση των μαγνητικών δυνάμεων που ασκεί το πεδίο σε κάθε σημείο του χώρου, με φορά από το βόρειο προς το νότιο πόλο. Στη περίπτωση του

φυσικού μαγνήτη ,οι γραμμές αυτές συνεχίζουν και στο εσωτερικό του, με αντίθετη φορά, από το νότιο προς το βόρειο πόλο. (Κόκοτας, 2010)

Η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών ενός μαγνητικού πεδίου, καθορίζει τη ένταση του σε κάθε σημείο του χώρου. Παρατηρείται ότι οι δυναμικές γραμμές πυκνώνουν περισσότερο στα σημεία των πόλων, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ισχυρότερων μαγνητικών δυνάμεων. Αντίθετα, καθώς κινούμαστε στο χώρο και απομακρυνόμαστε από τους πόλους του πεδίου, οι δυναμικές γραμμές αραιώνουν και επομένως οι μαγνητικές δυνάμεις παρουσιάζουν εξασθένιση. (Κόκοτας, 2010)



Εικόνα 0.2: Δυναμικές γραμμές μαγνητικού πεδίου ραβδόμορφου μαγνήτη.

1.2.2 Μαγνητικό πεδίο σε ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό

Ένας ρευματοφόρος αγωγός που διαρρέεται από ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, δύναται να προκαλέσει την εμφάνιση μαγνητικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο που θα αναπτυχθεί, εκτείνεται κατά μήκος του αγωγού και σε αντίθεση με το πεδίο του μόνιμου μαγνήτη, δεν εμφανίζει βόρειο και νότιο πόλο. Η μορφή του πεδίου μπορεί να εξεταστεί με μία μαγνητική βελόνα. Όταν ο αγωγός συνδέεται με πηγή σταθερής τάσης στα άκρα του και η μαγνητική βελόνα πλησιάζει σε αυτόν, παρατηρείται ότι η θέση της βελόνας μεταβάλλεται κυκλικά. Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι οι δυναμικές γραμμές του πεδίου που αναπτύχθηκε, είναι ομόκεντροι κύκλοι με κέντρο τον αγωγό και επίπεδο κάθετο σε αυτόν. Το μέτρο του πεδίου B , σε απόσταση r από το κέντρο ενός αγωγού, ο οποίος διαρρέεται από ένταση ρεύματος I , δίνεται από την σχέση (1.5).

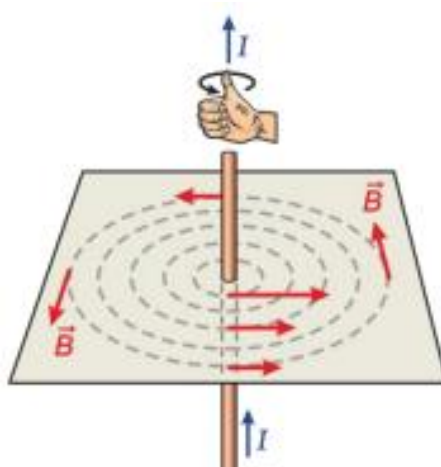
$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{I}}{2 \pi r} \quad (\text{T}) \quad \#(1.5)$$

όπου, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Wb}}{\text{A}\cdot\text{m}}$ και εκφράζει την μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Στην περίπτωση που υπάρχουν n ευθύγραμμοι αγωγοί και διαρρέονται από την ίδια ένταση ρεύματος I , το μέτρο του μαγνητικού πεδίου B υπολογίζεται ως εξής:

$$\mathbf{B} = n \cdot \frac{\mu_0 \mathbf{I}}{2 \pi r} \quad (\text{T}) \quad \#(1.6)$$

Οι δυναμικές γραμμές δεν έχουν τυχαία φορά, αλλά εξαρτάται από την φορά του ρεύματος I που ρέει στον αγωγό. Η εύρεση της φοράς, μπορεί να γίνει με τον κανόνα του δεξιού χεριού, όπου σύμφωνα με αυτόν, κρατώντας τον αγωγό με τεντωμένο τον αντίχειρα, ο αντίχειρας θα δείχνει την φορά του ρεύματος που θα τον διαρρέει και τα υπόλοιπα δάχτυλα την φορά των δυναμικών γραμμών. (Κανταρτζής & Τσιμπούκης, 2017)



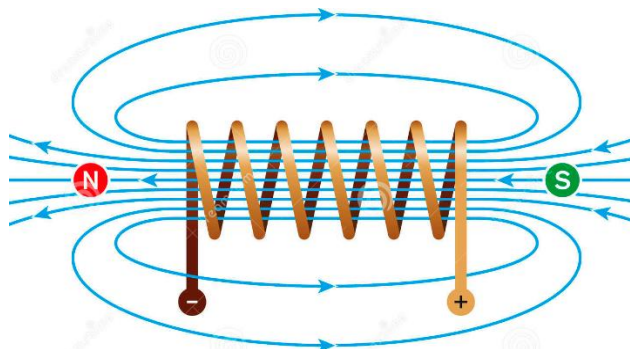
Εικόνα 0.3: Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού.

1.2.3 Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου

Ένας ρευματοφόρος αγωγός, οποίος τυλίγεται n φορές γύρω από ένα μονωμένο κύλινδρο, δημιουργεί ένα σωληνοειδές πηνίο αποτελούμενο από n σπείρες. Στο εσωτερικό του πηνίου,

παρατηρείται ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο, κατά το οποίο οι δυναμικές γραμμές του είναι παράλληλες με τον άξονα του κυλίνδρου. Το μέτρο του μαγνητικού πεδίου δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2 r} \quad (\text{T}) \#(1.7)$$



Εικόνα 0.4: Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου.

Στα άκρα του πηνίου, το πεδίο παρουσιάζει ανομοιογένεια και η ένταση του μαγνητικού πεδίου μειώνεται στο μισό της τιμής που έχει στο εσωτερικό του. (Κόκκοτας, 2010) Έτσι λοιπόν, το μέτρο του μαγνητικού πεδίου στα άκρα του πηνίου υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2 r} \quad (\text{T}) \#(1.8)$$

1.3 Η έννοια της μαγνητικής επαγωγής και μαγνητικής ροής

Η μελέτη της ύπαρξης μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο του χώρου και η κατανόηση της συμπεριφοράς του, προϋποθέτει την γνώση δύο μεγεθών. Αυτά είναι η μαγνητική επαγωγή και η μαγνητική ροή, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους.

Η μαγνητική επαγωγή είναι μια φυσική ποσότητα που περιγράφει το επίπεδο του μαγνητικού πεδίου σε μια συγκεκριμένη περιοχή του χώρου. Υπάρχουν δύο διαφορετικές ποσότητες που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν αυτήν την έννοια, η μαγνητική επαγωγή B και η μαγνητική επαγωγή H .

Η μαγνητική επαγωγή B περιγράφει την πυκνότητα της ροής του μαγνητικού πεδίου στο χώρο. Αντιπροσωπεύεται από το σύμβολο B και μετριέται σε μονάδες Tesla (T). (Κανταρτζής & Τσιμπούκης, 2017)

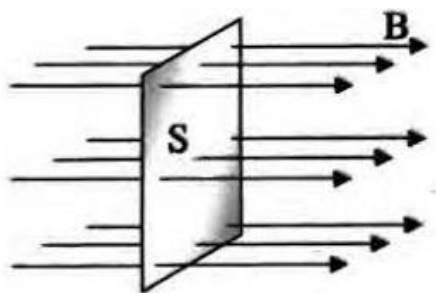
Η μαγνητική επαγωγή H περιγράφει την πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου που προκαλείται από την παρουσία μαγνητικού υλικού στην ίδια περιοχή. Αντιπροσωπεύεται από το σύμβολο H και μετριέται σε Ampere ανά μέτρο (A/m). (Κανταρτζής & Τσιμπούκης, 2017)

Συνοπτικά, η διαφορά μεταξύ της μαγνητικής επαγωγής B και της μαγνητικής επαγωγής H είναι ότι, η πρώτη περιγράφει το μαγνητικό πεδίο σε μια περιοχή του χώρου, ενώ η δεύτερη περιγράφει την επίδραση του μαγνητικού υλικού στο μαγνητικό πεδίο στην ίδια περιοχή. Η μαγνητική επαγωγή H εξαρτάται από τη φυσική κατάσταση του μαγνητικού υλικού και τη διαμόρφωσή του, ενώ η μαγνητική επαγωγή B δεν επηρεάζεται από το μαγνητικό υλικό που βρίσκεται σε αυτή τη περιοχή.

Για την καλύτερη κατανόηση της διαφοράς μεταξύ των δύο ποσοτήτων, δίνεται το εξής παράδειγμα. Έστω ένας μαγνήτης που βρίσκεται κοντά σε έναν σιδηρόδρομο. Η μαγνητική επαγωγή B θα περιγράψει πόσο ισχυρό είναι το μαγνητικό πεδίο στο σημείο του μαγνήτη, ενώ η μαγνητική επαγωγή H θα εκφράσει πόση δύναμη ασκείται στο σιδηροδρομικό τρένο από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο μαγνήτης.

Υποθέτουμε χώρο στον οποίο αναπτύσσεται ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης B . Μέσα στο πεδίο και κάθετα στις δυναμικές γραμμές του, θεωρούμε μία επιφάνεια εμβαδού S . Ως μαγνητική ροή Φ , ορίζεται το γινόμενο της έντασης B επί το εμβαδό της επιφάνειας S και εκφράζει το πλήθος των δυναμικών γραμμών που διαπερνούν την επιφάνεια S . Η μαγνητική ροή μετριέται σε Weber (Wb) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Phi = B \cdot S \text{ (Wb) } \#(1.9)$$

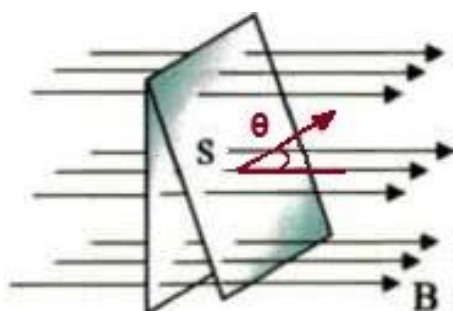


Εικόνα 0.5: Μαγνητική ροή κάθετης επιφάνειας.

Στην περίπτωση που η επιφάνεια δεν είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές του πεδίου αλλά βρίσκεται κεκλιμένη στο χώρο, η μαγνητική ροή Φ παρουσιάζει εξασθένιση και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

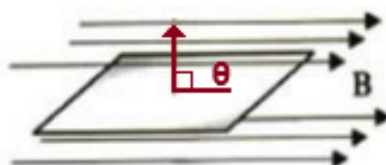
$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\theta \quad (\text{Wb}) \quad \#(1.10)$$

όπου, θ είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των δυναμικών γραμμών του πεδίου και της κάθετης επάνω στην επιφάνεια.



Εικόνα 0.6: Μαγνητική ροή κεκλιμένης επιφάνειας.

Αν η επιφάνεια που μελετάται, είναι παράλληλη με τις δυναμικές γραμμές, η γωνία $\theta = 90^\circ$ και από την σχέση (1.9) προκύπτει ότι η επιφάνεια δεν εμφανίζει μαγνητική ροή.



Εικόνα 0.7: Μαγνητική ροή παράλληλης επιφάνειας.

Όσα αναφέρθηκαν μέχρι τώρα, ισχύουν όταν το πεδίο είναι ομοιογενές. Όταν το πεδίο παρουσιάζει ανομοιογένεια που είναι και η πιο συνήθης περίπτωση, η μαγνητική ροή δεν μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (1.9). Σε αυτή τη περίπτωση, ο υπολογισμός γίνεται διαφορετικά. Θα πρέπει η

επιφάνεια να χωριστεί σε μικρά στοιχειώδη εμβαδά, να βρεθεί η μαγνητική ροή σε κάθε ένα από αυτά και στη συνέχεια να αθροιστούν όλες οι ροές, ώστε να προκύψει η συνολική ροή της επιφάνειας. (Παρασκευόπουλος, 2018). Η σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της είναι:

$$\Phi = \int_{\text{Επιφάνειας}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad \#(1.11)\#$$

1.4 Μαγνητικές δυνάμεις

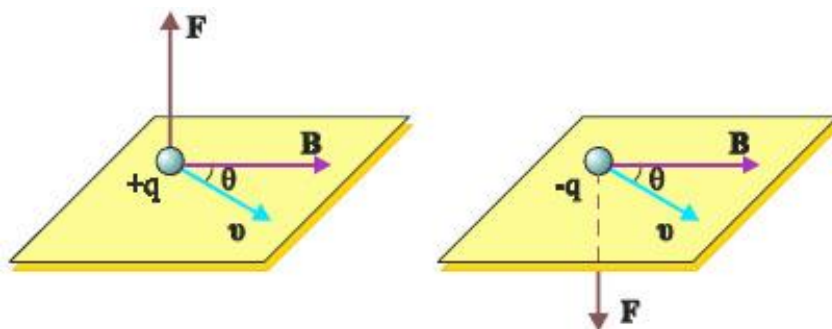
1.4.1 Δύναμη Lorentz σε φορτισμένο σωματίδιο

Έστω μαγνητικό πεδίο στο χώρο, εντός του οποίου φορτισμένο σωματίδιο κινείται με ταχύτητα u . Εάν αυτό συνεχίσει την κίνηση του προς την ίδια κατεύθυνση χωρίς να μεταβληθεί η ταχύτητα του, συμπεραίνεται ότι το σωματίδιο δεν δέχεται κάποια δύναμη από το μαγνητικό πεδίο. Στην περίπτωση που εκτραπεί η πορεία του ή επιταχύνει προς την αρχική του κατεύθυνση, φανερώνεται ότι το πεδίο του ασκεί μία μαγνητική δύναμη. Η δύναμη μπορεί να είναι είτε απωθητική, είτε ελκτική, ονομάζεται δύναμη Lorentz, μετριέται σε Newton (N) και έχει μέτρο:

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot |q| \cdot \mathbf{u} \cdot \sin\theta \quad (\text{N}) \quad \#(1.12)$$

όπου:

- B είναι το μαγνητικό πεδίο, σε (Wb),
- q είναι το φορτίο του σωματιδίου, σε (Cb),
- u είναι η ταχύτητα του σωματιδίου, σε (m/s^2),
- θ είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κατεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου B και της κατεύθυνσης της ταχύτητας u του σωματιδίου, σε μοίρες.



Εικόνα 0.8: Μαγνητική δύναμη σε θετικά ή αρνητικά φορτισμένο σωματίδιο.

Εάν το σωματίδιο πραγματοποιήσει μια κίνηση, η οποία είναι παράλληλη με το μαγνητικό πεδίο ($\theta = 0^\circ$ ή $\theta = 180^\circ \Rightarrow \sin\theta = 0$), τότε η δύναμη που του ασκείται είναι μηδενική. Στην περίπτωση που κινηθεί κάθετα στις δυναμικές γραμμές του πεδίου ($\theta = 90^\circ$ ή $\theta = 270^\circ \Rightarrow \sin\theta = 1$), τότε το μέτρο της δύναμης που μπορεί να δεχτεί το σωματίδιο, γίνεται μέγιστο. (Πέλλης, 2015)

1.4.2 Δύναμη Laplace σε ρευματοφόρο αγωγό

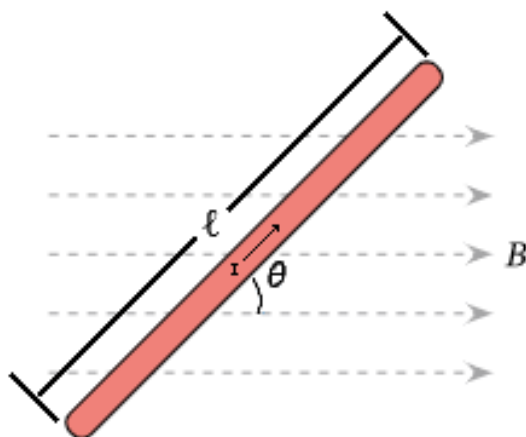
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το μαγνητικό πεδίο έχει τη τάση να ασκεί μαγνητικές δυνάμεις στα σώματα που βρίσκονται εντός του πεδίου δράσης του. Έστω λοιπόν, ένα πεδίο που εμφανίζει ομοιογένεια, εντός του οποίου βρίσκεται ρευματοφόρος αγωγός. Το πεδίο θα ασκήσει τη μαγνητική του δύναμη, η οποία είναι γνωστή ως δύναμη Laplace ή δύναμη εξ επαγωγής, με μέτρο:

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{I} \cdot \ell \cdot \sin\theta \quad (\text{N}) \quad \#(1.13)$$

όπου:

- B είναι ένταση του μαγνητικού πεδίου, σε (Wb),
- I είναι το ρεύμα διαρροής του αγωγού, σε (A),
- ℓ είναι το μήκος του αγωγού, σε (m),
- θ είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ αγωγού και δυναμικών γραμμών, σε μοίρες.

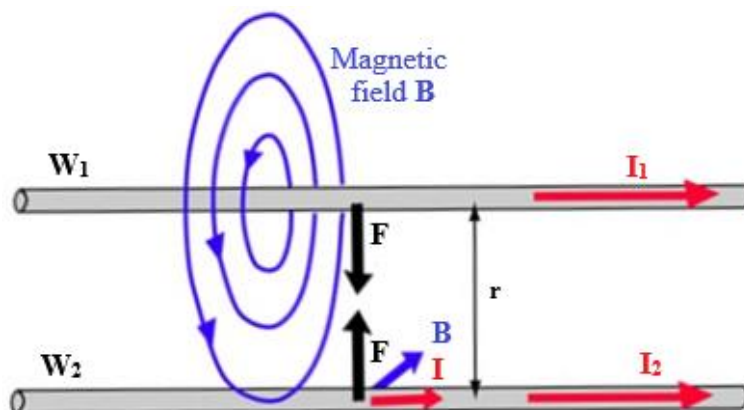
Ο ρευματοφόρος αγωγός δέχεται τη μέγιστη δύναμη Laplace όταν τέμνει κάθετα τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου ($\theta = 90^\circ \Rightarrow \sin\theta = 1$), ενώ στην αντίθετη περίπτωση που η θέση του είναι παράλληλη με το πεδίο ($\theta = 0^\circ$), δεν του ασκείται κάποια δύναμη. (Nelson, (n.d.)



Εικόνα 0.9: Ρευματοφόρος αγωγός εντός ομογενούς μαγνητικού πεδίου.

1.4.3 Δύναμη Laplace παράλληλων ρευματοφόρων αγωγών

Είναι γνωστό ότι, κατά μήκος ενός αγωγού που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Επιπλέον, εάν ένας αγωγός βρεθεί εντός κάποιου άλλου μαγνητικού πεδίου, θα του ασκηθεί μία δύναμη Laplace από το πεδίο. Έστω λοιπόν, οι ρευματοφόροι αγωγοί W_1 και W_2 της εικόνας 1.10, τοποθετημένοι στο χώρο ο ένας παράλληλα στον άλλον. Το μαγνητικό πεδίο που θα αναπτύξει ο W_1 , θα προκαλέσει μία δύναμη Laplace στον W_2 και το αντίστροφο. (Mallet, 2016)



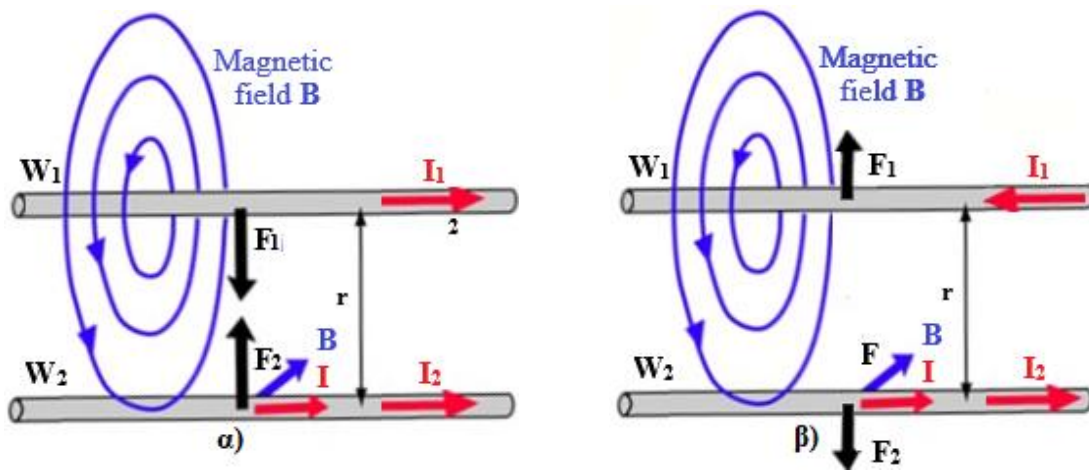
Εικόνα 0.10: Παρουσία δύναμης Laplace μεταξύ παράλληλων ρευματοφόρων αγωγών.

Αν οι αγωγοί έχουν κοινά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διαρρέονται από ίδια ένταση ρεύματος, από την σχέση (1.5) προκύπτει ότι η μαγνητική επαγωγή θα είναι ίδια σε όλο το μήκος τους. Επειδή ο αγωγός W_2 βρίσκεται κάθετα στο μαγνητικό πεδίο του αγωγού W_1 ($\theta = 90^\circ$), μία δύναμη Laplace

ασκείτε σε αυτόν. Από τον συνδυασμό των σχέσεων (1.5) και (1.12), προκύπτει το μέτρο της, το οποίο είναι:

$$F = B \cdot I \cdot \ell = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \ell}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (\text{N}) \quad \#(1.14)$$

Από τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η φορά του ρεύματος κάθε αγωγού, επηρεάζει τις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους. Όταν τα ρεύματα είναι ομόρροπα, οι δυνάμεις είναι ελκτικές και οι αγωγοί πλησιάζουν ο ένας τον άλλον. Στην αντίθετη περίπτωση που τα ρεύματα διαρροής τους είναι αντίρροπα, οι δυνάμεις που ασκούνται είναι απωθητικές και οι ρευματοφόροι αγωγοί απομακρύνονται. (Κόκκοτας, 2010)



Εικόνα 0.11: Δύναμη Laplace σε ρευματοφόρους αγωγούς που διαρρέονται από
α) ομόρροπα ρεύματα, β) αντίρροπα ρεύματα.

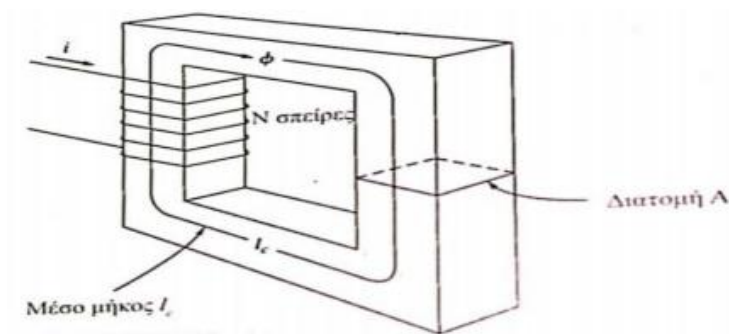
1.5 Ο νόμος του Ampere

Ο νόμος του Ampere, συνδέει την ένταση του μαγνητικού πεδίου H με το ηλεκτρικό ρεύμα I . Η μαθηματική του έκφραση είναι το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της έντασης μαγνητικού πεδίου κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής L και ισούται με το συνολικό ρεύμα που περικλείει η διαδρομή. (Κανταρτζής & Τσιμπούκης, 2017)

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \quad \left(\frac{\text{N}}{\text{A}^2}\right) \quad \#(1.15)$$

Έστω ένας πυρήνας κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό και τυλιγμένος από την μία πλευρά του με πηνίο n σπειρών που διαρρέεται από ένταση ρεύματος I . Το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσει το πηνίο, περιορίζεται στην κλειστή διαδρομή του σιδηρομαγνητικού υλικού. (Henry, 2021) Σύμφωνα με το νόμο του Ampere, το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου H , μπορεί να βρεθεί από την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{H} \cdot \mathbf{L} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{I} \Rightarrow \mathbf{H} = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{I}}{\mathbf{L}} \left(\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{m}} \right) \#(1.16)$$



Εικόνα 0.12: Πηνίο τυλιγμένο σε σιδηρομαγνητικό πυρήνα.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου H είναι μέγεθος διανυσματικό, με φορά και διεύθυνση που καθορίζεται από τις δυναμικές γραμμές του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η φορά και η διεύθυνση της έντασης να ταυτίζεται με τη φορά και τη διεύθυνση της μαγνητικής επαγωγής B . (Henry, 2021) Αυτά τα δύο μεγέθη, συνδέονται ως εξής:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (\text{T}) \#(1.17)$$

όπου, μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού που εξετάζεται.

Η μαγνητική διαπερατότητα ενός υλικού δηλώνει την αντίσταση του στην διείσδυση του μαγνητικού πεδίου. Συγκεκριμένα, η μαγνητική διαπερατότητα μετρά την ικανότητα ενός υλικού να μαγνητίζεται υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου. Σαν μέγεθος συμβολίζεται με το μικρό γράμμα μ και η μονάδα μέτρησης του είναι Henry ανά μέτρο (H/m). (Κόκκοτας, 2010)

Υλικά όπως ο σίδηρος και το νεοδύμιο, είναι ευαίσθητα στα μαγνητικά πεδία και μπορούν εύκολα να μαγνητιστούν, ενώ άλλα υλικά, όπως το αλουμίνιο και ο χρυσός έχουν την ικανότητα να αντιστέκονται στη μαγνητική αλληλεπίδραση. Γενικά, όλα τα υλικά χαρακτηρίζονται από την

μαγνητική διαπερατότητα η οποία είναι μεγαλύτερη στα πιο ευαίσθητα υλικά και ορίζεται ως το πηλίκο: (Henry, 2021)

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (\text{H/m}) \#(1.18)$$

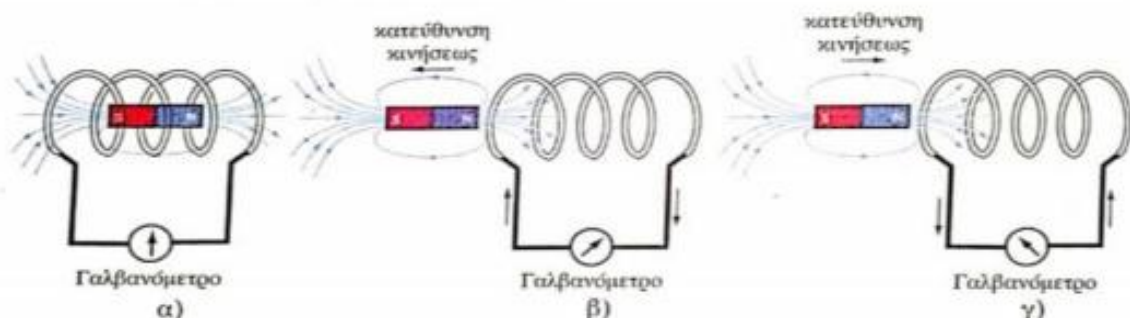
όπου:

- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (H), μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

1.6 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

1.6.1 Ηλεκτρεγερτική δύναμη εξ επαγωγής

Έστω μη ηλεκτροδοτούμενο πηνίο του οποίου τα άκρα του συνδέονται σε γαλβανόμετρο. Το γαλβανόμετρο είναι ένα αναλογικό όργανο που ανιχνεύει και να μετρά μικρές εντάσεις ρεύματος. Εάν στο εσωτερικό του πηνίου τοποθετηθεί ακίνητος ένας μόνιμος μαγνήτης, το γαλβανόμετρο παραμένει στη θέση ισορροπίας του και δεν ανιχνεύει κάποια ένταση ρεύματος. Στην περίπτωση που ο μαγνήτης πραγματοποιήσει μία παλινδρομική κίνηση μέσα στο πηνίο, παρατηρείται ότι η βελόνα ένδειξης του γαλβανόμετρου μεταβάλλεται με ταχύτητα ανάλογης της κίνησης του μαγνήτη και φορά που εξαρτάται από την πολικότητα του.



Εικόνα 0.13: Ανάπτυξη ΗΕΔ σε πηνίο όταν: α) ο μαγνήτης είναι ακίνητος, β) ο μαγνήτης εξέρχεται από το πηνίο, γ) ο μαγνήτης εισέρχεται στο πηνίο.

Έτσι λοιπόν, λόγω της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του πηνίου, εμφανίζεται ένα ρεύμα διαρροής που οφείλεται στην εμφάνιση μίας τάσης στα άκρα του, η οποία καλείται ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.

1.6.2 Νόμος του Faraday

Ο Faraday ήταν ο πρώτος που ανακάλυψε το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, η οποία θεωρείται θεμελιώδης για την λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών. Σύμφωνα με αυτόν, η ΗΕΔ εξ επαγωγής που δημιουργείται σε ένα πηνίο είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής ($\Delta\Phi/\Delta t$) και ανάλογη του αριθμού n των σπειρών του πηνίου. Η μαθηματική του έκφραση είναι:

$$\varepsilon = - n \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (\text{V}) \#(1.19)$$

Το αρνητικό πρόσημο είναι αποτέλεσμα του νόμου του Lenz, κατά τον οποίο η πολικότητα της αναπτυσσόμενης τάσης είναι τέτοια ώστε το παραγόμενο ρεύμα να προκαλεί μαγνητική ροή κατά την φορά που αντιτίθεται στη μεταβολή της μαγνητικής ροής που διαπερνά το βρόγχο. (Κανταρτζής & Τσιμπούκης, 2017)

1.7 Μαγνητικά χαρακτηριστικά των υλικών

Τα μαγνητικά υλικά βάση των μαγνητικών ιδιοτήτων τους, ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες, τα διαμαγνητικά, τα παραμαγνητικά και τα σιδηρομαγνητικά υλικά.

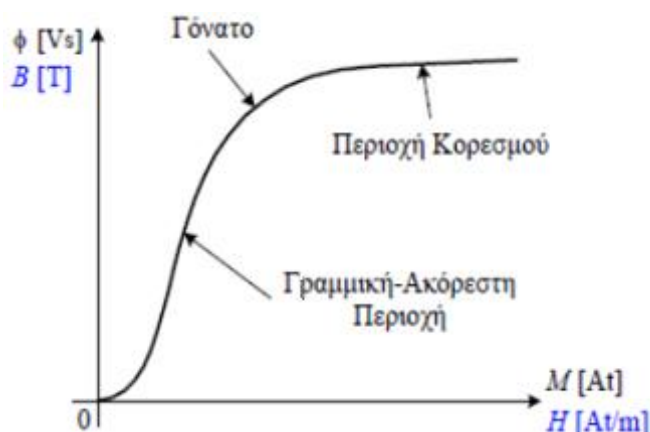
Τα διαμαγνητικά υλικά όταν βρεθούν μέσα σε μαγνητικό πεδίο, προκαλείται παραμόρφωση στην εσωτερική δομή του ατόμου τους και δημιουργούνται μαγνητικά δίπολα που αντιστρατεύονται στο εξωτερικό πεδίο, προκαλώντας αρνητική μαγνήτιση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διαμαγνητισμός. Αυτά τα υλικά χαρακτηρίζονται από μικρή σχετική μαγνητική διαπερατότητα ($\mu_r < 1$). Παραδείγματα διαμαγνητικών υλικών είναι το ασήμι και το χρυσός. (Μανωλακάκης & Δούνος, 2006)

Τα παραμαγνητικά υλικά μπορούν να μαγνητιστούν με ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, αλλά δεν διατηρούν τη μαγνητική ιδιότητα τους όταν το πεδίο αφαιρείται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται παραμαγνητισμός και τα υλικά παρουσιάζουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα μεγαλύτερη της μονάδας ($\mu_r > 1$). Υλικά που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι το αλουμίνιο και ο χαλκός. Αυτά

τα υλικά δεν προτιμώνται για τις μαγνητικές τους ιδιότητες, αλλά παρουσιάζουν ευρεία χρήση σε άλλους σκοπούς, όπως η κατασκευή αγωγών. (Μανωλακάκης & Δούνος, 2006)

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι εκείνα που υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου είναι ικανά να μαγνητιστούν και να διατηρήσουν τη μαγνητική ιδιότητα ακόμη και όταν το πεδίο έχει αφαιρεθεί. Εμφανίζουν πολύ μεγάλη σχετική μαγνητική διαπερατότητα ($\mu_r \gg 1$). Ενδεικτικά, στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται ο σίδηρος, το νικέλιο και το κοβάλτιο, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή μόνιμων μαγνητών και πυρήνων ηλεκτρικών μηχανών. (Μανωλακάκης & Δούνος, 2006)

Η μαγνητική διαπερατότητα ενός σιδηρομαγνητικού υλικού δεν είναι σταθερή, αλλά επηρεάζεται από τη μαγνητική ροή Φ του πεδίου μέσα στο οποίο βρίσκεται. Έστω ένα να σιδηρομαγνητικό υλικό το οποίο δεν φέρει κάποια αρχική μαγνήτιση ($B = 0$). Μελετώντας τη συμπεριφορά του καθώς τοποθετείται εντός μαγνητικού πεδίου που αυξάνει προοδευτικά την ένταση του, μπορεί να σχεδιαστεί γραφικά η εξάρτηση της μαγνητικής ροής του, συναρτήσει της ΜΕΔ ($\Phi = f(M)$). Η καμπύλη που προκύπτει ονομάζεται καμπύλη μαγνήτισης και έχει τρία βασικά χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν. Αυτά είναι η γραμμική-ακόρεστη περιοχή, η μη γραμμική περιοχή που ονομάζεται κορεσμένη και η ενδιάμεση περιοχή που καλείται γόνατο. (Μανωλακάκης & Δούνος, 2006)



Εικόνα 0.14: Καμπύλη μαγνήτισης σιδηρομαγνητικού υλικού.

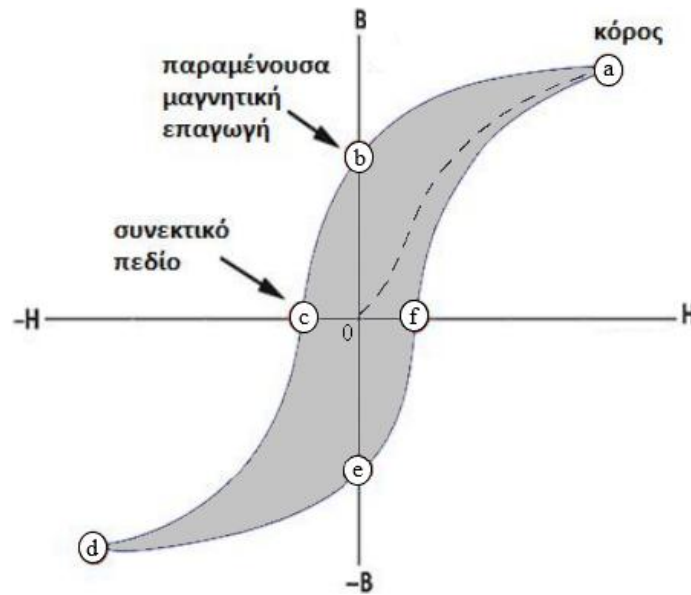
Από τις σχέσεις (1.16) και (1.9) προκύπτει ότι η καμπύλη μπορεί να εκφράσει και την μαγνητική επαγωγή B συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου H ($B = f(H)$). Η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού εκφράζεται από την κλίση της καμπύλης.

1.8 Μαγνητική υστέρηση

1.8.1 Μαγνητική υστέρηση μαγνητικών υλικών

Η μαγνητική υστέρηση είναι μια φυσική ιδιότητα που σχετίζεται με τη συμπεριφορά των μαγνητικών υλικών. Περιγράφει την καθυστέρηση της μαγνητικής απόκρισης ενός υλικού στη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται σε αυτό. Αυτό σημαίνει ότι η μαγνητική υστέρηση προκαλεί μια καθυστέρηση στην επίτευξη της μέγιστης μαγνητικής απόκρισης ενός υλικού, ανάλογα με την ένταση και τη διάρκεια του μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται. Αυτή η καθυστέρηση εκφράζεται από το βρόγχο μαγνητικής υστέρησης του υλικού. Ο βρόγχος αυτός φαίνεται στην εικόνα 1.15 και προκύπτει γραφικά ως εξής:

- i. Το υλικό που μελετάται, τοποθετείται αμαγνήτιστο μέσα σε μαγνητικό πεδίο που έχει μηδενική αρχική μαγνητική επαγωγή, την οποία αυξάνει προοδευτικά. Έτσι σχηματίζεται η καμπύλη $0a$, την οποία ήδη γνωρίζουμε ως καμπύλη μαγνήτισης του υλικού.
- ii. Όταν το υλικό φτάσει στον κόρο, η μαγνητική επαγωγή του πεδίου μηδενίζεται (σημείο b) και το υλικό παρουσιάζει μία ποσότητα μαγνητισμού που ονομάζεται παραμένουσα μαγνήτιση.
- iii. Στη συνέχεια αντιστρέφεται η πολικότητα του πεδίου και αυξάνεται η ένταση του, ώστε το υλικό να δέχεται αρνητική μαγνητική επαγωγή. Στο σημείο c , η παραμένουσα μαγνήτιση μηδενίζεται ξανά και το πεδίο ονομάζεται συνεκτικό πεδίο ή απομαγνητίζουσα δύναμη.
- iv. Η περαιτέρω αύξηση της έντασης του πεδίου, θα οδηγήσει στον κόρο της αρνητικής μαγνήτισης (σημείο d).
- v. Μηδενίζοντας την αρνητική ένταση του πεδίου, παρατηρείται και πάλι μια παραμένουσα μαγνήτιση στο υλικό (σημείο e), η οποία είναι αντίθετη από εκείνη του σημείου b .
- vi. Έπειτα για την απομαγνήτιση του υλικού, αντιστρέφεται ξανά η πολικότητα του πεδίου και η ένταση του αυξάνεται στην απαιτούμενη τιμή (σημείο f).
- vii. Τέλος, η ένταση του πεδίου αυξάνεται ακόμη περισσότερο έως ότου το υλικό κορεστεί.

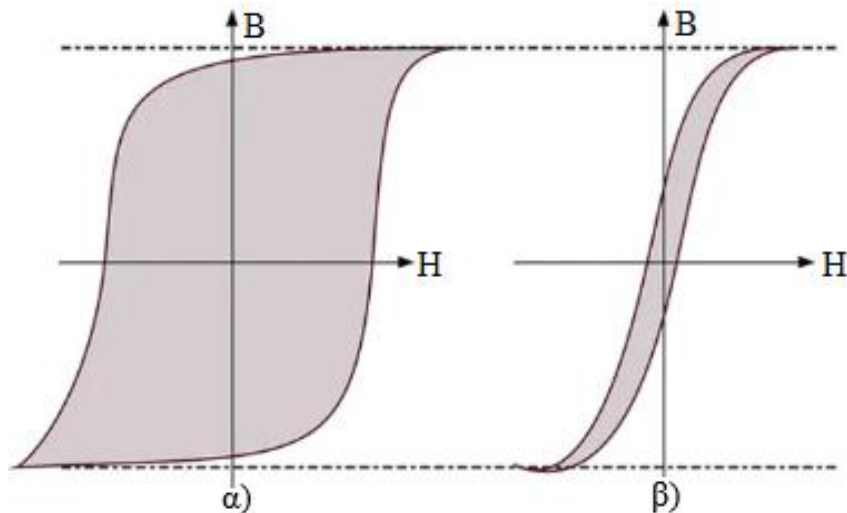


Εικόνα 0.15: Τυπικός βρόγχος μαγνητικής υστέρησης.

Η κλειστή καμπύλη (abcdefa) που περιγράφεται παραπάνω, ονομάζεται βρόγχος υστέρησης και είναι διαφορετικός για κάθε υλικό. Ανάλογα με το εμβαδόν του βρόγχου, τα υλικά κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, τα σκληρά και τα μαλακά μαγνητικά υλικά. (Πηλακούτα, n.d)

Τα σκληρά μαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από βρόγχο υστέρησης μεγάλου εμβαδού. Αυτά τα υλικά παρουσιάζουν μεγάλη μόνιμη μαγνήτιση με αποτέλεσμα να μαγνητίζονται και να απομαγνητίζονται δύσκολα. Λόγω των χαρακτηριστικών τους, τα σκληρά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα για τη κατασκευή μόνιμων μαγνητών σε πολλές εφαρμογές. (Πηλακούτα, n.d)

Αντιθέτως, στα μαλακά μαγνητικά υλικά, ο βρόγχος υστέρησης έχει πολύ μικρότερο εμβαδό και αποτέλεσμα αυτού είναι η πολύ μικρή παραμένουσα μαγνήτιση. Επομένως μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται πιο εύκολα, πράγμα που τα κάνει κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούνται πολλοί κύκλοι μαγνήτισης και απομαγνήτισης, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρικές μηχανές, μετασχηματιστές και επαγωγείς. (Πηλακούτα, n.d)



Εικόνα 0.16: Βρόγχος υστέρησης: α) σκληρού μαγνητικού υλικού, β) μαλακού μαγνητικού υλικού.

1.8.2 Απώλειες μαγνητικής υστέρησης

Έστω μαγνητικό πεδίο στο οποίο η μαγνητική επαγωγή μεταβάλλεται από B_1 σε B_2 . Τότε η ενέργεια ανά μονάδα όγκου δίνεται από τη σχέση:

$$W = \int_{B_1}^{B_2} \mathbf{H} \, d\mathbf{B} \quad (\text{J}) \#(1.20)$$

Αν κάποιο υλικό με όγκο V , βρεθεί μέσα στο μαγνητικό πεδίο, τότε η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου στο υλικό είναι :

$$W = V \int_{B_1}^{B_2} \mathbf{H} \, d\mathbf{B} \quad (\text{J}) \#(1.21)$$

Όταν το υλικό διαγράφει ένα πλήρη βρόχο υστέρησης, καταναλώνει μια ποσότητα ενέργειας W_h που μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία ονομάζεται ενέργεια υστέρησης. Το εμβαδόν S_h του βρόχου υστέρησης ισούται με την ενέργεια ανά μονάδα όγκου κατά τη διάρκεια μιας κυκλικής μεταβολής του πεδίου. Η ενέργεια W_h αντιπροσωπεύει τις απώλειες υστέρησης και εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$W_h = V \cdot S_h \quad (\text{J}) \#(1.22)$$

Όταν το επιβαλλόμενο πεδίο H εναλλάσσεται με συχνότητα f , η ισχύς των απωλειών υστέρησης ανά μονάδα όγκου του υλικού είναι:

$$P_h = f \cdot S_h \quad (W)\#(1.23)$$

Επομένως η ισχύς των απωλειών υστέρησης του υλικού είναι:

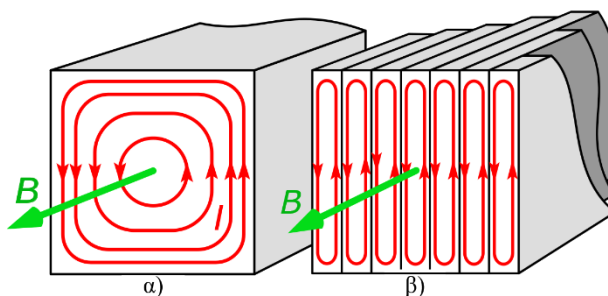
$$P_h = f \cdot V \cdot S_h \quad (W)\#(1.24)$$

Εν συνεχεία όσων αναφέρθηκαν στην προηγούμενη υποενοότητα, συμπεραίνεται ότι τα σκληρά μαγνητικά υλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες υστέρησης έναντι των μαλακών μαγνητικών υλικών, διότι ο βρόγχος τους έχει μεγαλύτερο εμβαδόν. (Μανωλακάκης & Δούνος, 2006).

1.9 Απώλειες δινορευμάτων

Όπως εξηγήθηκε από το νόμο του Faraday, η μεταβολή της μαγνητικής ροής μέσα σε ένα υλικό (πχ σιδηρομαγνητικός πυρήνας) καθώς μεταβάλλεται το πεδίο διέγερσης, προκαλεί την εμφάνιση ηλεκτρεγερτικής δύναμης. Αποτέλεσμα αυτής, είναι η ανάπτυξη επαγωγικών ρευμάτων διαρροής μέσα στο υλικό υπό την μορφή στροβίλων, τα οποία καλούνται δινορεύματα.

Επειδή το υλικό κατασκευής ενός πυρήνα παρουσιάζει ωμική αντίσταση, καταναλώνεται ενέργεια υπό μορφή θερμότητας (φαινόμενο Joule). Η ισχύς P_e αυτού του ρεύματος ανά μονάδα όγκου του υλικού καλείται απώλεια δινορευμάτων. Για τον περιορισμό των απωλειών δινορευμάτων στις ηλεκτρικές μηχανές, η κατασκευή των σιδηροπυρήνων γίνεται από λεπτά φύλλα αντί για συμπαγές υλικό, τα οποία καλούνται σιδηροελάσματα ή δυναμοελάσματα. Ανάμεσα στα δυναμοελάσματα, παρεμβάλλονται μονωτικές ρητίνες για τον περιορισμό των δινορευμάτων. (Collins, 2018)



Εικόνα 0.17: Ανάπτυξη δινορευμάτων σε: α) συμπαγή πυρήνα, β) πυρήνα δυναμοελασμάτων.

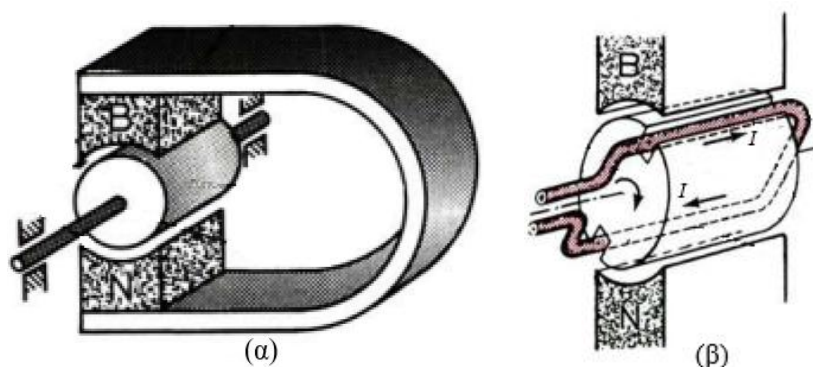
1.10 Θερμοκρασία Curie

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά, όταν θερμανθούν σε υψηλές θερμοκρασίες χάνουν την μαγνητική τους ικανότητα και γίνονται παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία στην οποία εμφανίζεται η παραμαγνητική συμπεριφορά του υλικού ονομάζεται θερμοκρασία Curie (T_c). Σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της T_c , προκαλείται αλλοίωση της προσανατολισμένης κίνησης των ατομικών μαγνητικών ροπών του υλικού που οφείλεται στην εξαναγκασμένη θερμική κίνηση των ατόμων του. Σε εφαρμογές όπου τα μαγνητικά υλικά χρειάζεται να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι σημαντικό να έχει εξασφαλιστεί ότι διαθέτουν υψηλή θερμοκρασία Curie. (Πηλακούτα, n.d)

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

2.1 Αρχή λειτουργίας — Παραγωγή ροπής

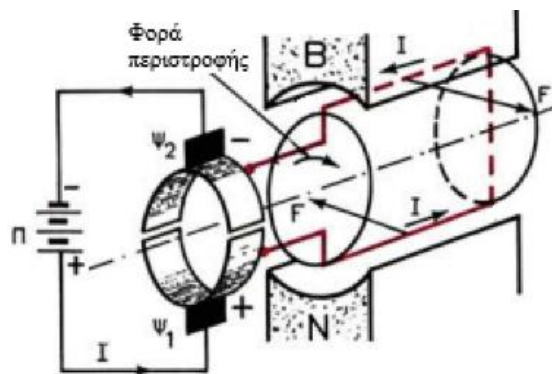
Η λειτουργία του κινητήρα συνεχούς ρεύματος βασίζεται στην αρχή του νόμου του Faraday. Για να περιγραφεί η αρχή λειτουργίας του, φέρνουμε στο μυαλό μας ένα στοιχειώδη κινητήρα που αποτελείται από ένα πεταλοειδή μαγνήτη, ο οποίος φέρει ένα κυλινδρικό τύμπανο στο εσωτερικό του, κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικό υλικό, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1α. Μεταξύ του τυμπάνου και των πόλων του μαγνήτη υπάρχει κενός χώρος, ο οποίος καλείται διάκενο. Το κυλινδρικό αυτό τύμπανο ονομάζεται επαγωγικό τύμπανο, γνωστό και ως σπλισμός και φέρει αυλακώσεις σε διαμετρικά αντίθετα σημεία, ώστε κατά την περιστροφή του να τέμνει τις δυναμικές γραμμές του μαγνήτη. Μέσα στις αυλακώσεις τοποθετούνται οι αγωγοί που συνδέονται στο πίσω μέρος του τυμπάνου (σχ. 2.1β) και σχηματίζουν μία σπείρα η οποία καλείται τύλιγμα τυμπάνου. (Βασιλακόπουλος, 2006)



Εικόνα 2.1: (α) Στοιχειώδης ηλεκτροκινητήρας, (β) επαγωγικό τύμπανο

Όταν το τύλιγμα του τυμπάνου συνδεθεί σε πηγή συνεχούς ρεύματος, διαρρέεται από ρεύμα έντασης I και αναπτύσσεται σε κάθε αγωγό δύναμη F εξ επαγωγής, με μέτρο που υπολογίζεται από τη σχέση (1.13). Το ζεύγος δυνάμεων που αναπτύσσεται, περιστρέφει το τύμπανο κατά μισή περιστροφή και ισορροπεί έτσι ώστε το τύλιγμα να τέμνει κάθετα τις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Για να ολοκληρωθεί μία πλήρης περιστροφή του τυμπάνου, χρειάζεται να γίνει εναλλαγή στη πολικότητα της πηγής, ώστε να αλλάξει η φορά του ρεύματος στους αγωγούς του τυλίγματος και κατ' επέκταση η φορά των δυνάμεων F που το περιστρέφουν. (Βασιλακόπουλος, 2006)

Για να επιτευχθεί η εναλλαγή της πολικότητας, τα άκρα του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου συνδέονται σε συλλέκτη χωρισμένο σε δύο τομείς, που είναι στερεωμένοι στον άξονα του τυμπάνου και περιστρέφεται με αυτόν. Επιπλέον, δύο ψήκτρες (ψ_1 & ψ_2) κατασκευασμένες από άνθρακα, εφάπτονται στους δύο τομείς του συλλέκτη, στερεώνονται στο ακίνητο μέρος της μηχανής και η τροφοδοσία του τυλίγματος τυμπάνου γίνεται μέσω αυτών, σύμφωνα με την εικόνα 2.2. (Βασιλακόπουλος, 2006)



Εικόνα 2.2: Στοιχειώδης ηλεκτροκινητήρας μίας σπείρας.

Έτσι, κατά τη περιστροφή του τυμπάνου, εναλλάσσεται η πολικότητα στο τύλιγμα του και αναπτύσσεται συνεχώς ένα ζεύγος δυνάμεων F που ασκεί ροπή στο τύμπανο. Η ροπή T που αναπτύσσεται στο επαγωγικό τύμπανο δεν είναι σταθερή, αλλά το μέτρο της δίνεται από τη σχέση:

$$T = 2 \cdot F \cdot r \text{ (Nm)} \quad \#(2.1)$$

όπου:

- F είναι η δύναμη που ασκείται σε κάθε αγωγό του επαγωγικού τυμπάνου, σε (N),
- r είναι η ακτίνα του επαγωγικού τυμπάνου, σε (m).

Γνωρίζοντας ότι οι αγωγοί του επαγωγικού τυμπάνου είναι τοποθετημένοι κάθετα στις δυναμικές γραμμές των πόλων της μηχανής ($\sin\theta = 1$) και λαμβάνοντας υπόψιν τη σχέση (1.13), προκύπτει ότι:

$$T = 2 \cdot B \cdot I \cdot L \cdot r \text{ (Nm)} \quad \#(2.2)$$

όπου:

- B είναι η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο, σε (Vs/m²),
- I είναι η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το τύλιγμα, σε (A).
- L και r είναι το μήκος και η ακτίνα του τυμπάνου αντίστοιχα, σε (m).

Στους πραγματικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος, αντί για μόνιμους μαγνήτες χρησιμοποιούνται μαγνητικοί πόλοι με τυλίγματα διέγερσης, ενώ το τύλιγμα του τυμπάνου αποτελείται από πολλές ομάδες μικρότερων τυλιγμάτων. Έτσι, η παραγόμενη ροπή στον άξονα ενός πραγματικού κινητήρα υπολογίζεται ως:

$$T = K_m \cdot \Phi \cdot I_a = \frac{p \cdot s \cdot w}{a} \cdot \Phi \cdot I_a \text{ (Nm) } \#(2.3)$$

όπου:

- p είναι ο αριθμός των ζευγών των μαγνητικών πόλων,
- s είναι ο αριθμός των στοιχείων του τυλίγματος τυμπάνου,
- w είναι ο αριθμός των αγωγών κάθε στοιχείου,
- a είναι ο αριθμός των παράλληλων κλάδων του τυλίγματος τυμπάνου,
- K_m είναι σταθερό μέγεθος για κάθε μηχανή,
- Φ είναι η χρήσιμη μαγνητική ροή κάθε πόλου, σε (Vs),
- I_a είναι το ρεύμα του τυλίγματος τυμπάνου, σε (A).

2.2 Ανάπτυξη αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όταν το επαγωγικό τύμπανο της μηχανής διαρρέεται από ρεύμα, αναπτύσσεται σε αυτό ένα ζεύγος δυνάμεων που το περιστρέφει. Ταυτόχρονα όμως, μέσα στους αγωγούς αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή, λόγω της περιστροφής τους μέσα στο μαγνητικό πεδίο των πόλων. Η φορά της ΗΕΔ είναι αντίθετη από τη φορά του ρεύματος που διαρρέει τη σπείρα του τυμπάνου και επομένως καλείται αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (ΑΗΕΔ). Έτσι λοιπόν, η τάση της πηγής που τροφοδοτεί τη μηχανή πρέπει να υπερνικήσει την ΑΗΕΔ, ώστε να μπορέσει να κυκλοφορήσει ρεύμα στο τύλιγμα του τυμπάνου. Στους πραγματικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος όπου το επαγωγικό τύμπανο αποτελείται από πολλές σπείρες συνδεδεμένες σε σειρά, οι επιμέρους ΑΗΕΔ που αναπτύσσονται αθροίζονται και η συνολική ΑΗΕΔ υπολογίζεται ως:

$$E_a = K_m \cdot \Phi \cdot \omega_m = \frac{p \cdot s \cdot w}{a} \cdot \Phi \cdot \omega_m \text{ (V) } \#(2.4)$$

όπου:

- ω_m είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου, σε (rad/s),

Στους κινητήρες που εργάζονται με κανονικό φορτίο και τροφοδοτούνται με τάση V_a , η ΑΗΕΔ μπορεί να φτάσει μέχρι και το 80 με 95% της V_a . Έτσι λοιπόν, μπορεί η μηχανή να τροφοδοτείται με τάση V_a , αλλά η διαφορά τάσης $V_a - E_a$ είναι εκείνη που προκαλεί το ρεύμα διαρροής του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου. Δηλαδή ισχύει ότι:

$$I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a} \quad (\text{A}) \#(2.5)$$

όπου:

- I_a είναι η ένταση ρεύματος του τυλίγματος τυμπάνου, σε (A).
- R_a είναι η αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου, σε (Ω).

2.3 Κατασκευαστικά μέρη κινητήρων συνεχούς ρεύματος

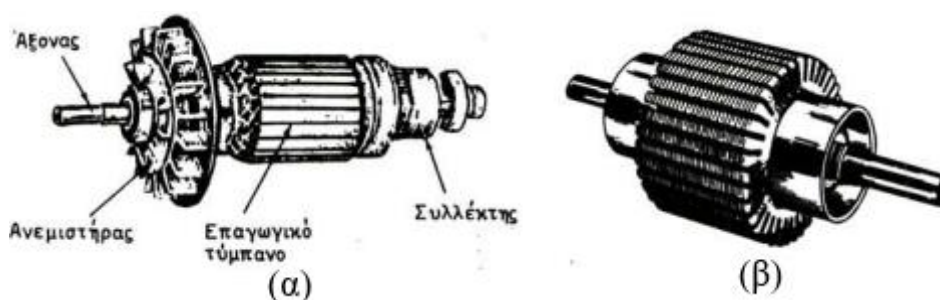
Κάθε κινητήρας συνεχούς ρεύματος αποτελείται από δύο κύρια μέρη, το κινούμενο μέρος που ονομάζεται δρομέας και το ακίνητο μέρος που καλείται στάτη. Εκατέρωθεν του στάτη υπάρχουν δύο καλύμματα με έδρανα. Ο δρομέας βρίσκεται στο εσωτερικό του στάτη και στηρίζεται στα έδρανα του. Στο εξωτερικό του στάτη, βρίσκεται η βάση στήριξης της μηχανής και το κιβώτιο ακροδεκτών με τους οποίους γίνεται η τροφοδοσία της μηχανής. (Βασιλακόπουλος, 2006)

Ο στάτης αποτελείται από το ζύγωμα της μηχανής που είναι το σασί της και από τους μαγνητικούς πόλους της που βρίσκονται στο εσωτερικό του στάτη. Οι μαγνητικοί πόλοι αποτελούνται από δύο τμήματα, τον πυρήνα και το τύλιγμα του. Η κατασκευή του πυρήνα γίνεται από μονωμένα μεταξύ τους σιδηροελάσματα και όχι από συμπαγές υλικό, για λόγους που σχετίζονται με τις απώλειες δινορευμάτων. Το ένα άκρο του πόλου διαμορφώνεται κατάλληλα και σχηματίζει το πέδιλο του πόλου, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα τοποθετείται το τύλιγμα του, σύμφωνα με την εικόνα 2.3α. Το τύλιγμα αυτό καλείται τύλιγμα διέγερσης και αποτελείται από μονωμένες μεταξύ τους σπείρες χάλκινου σύρματος. Ο αριθμός των πόλων είναι βασικό χαρακτηριστικό μίας μηχανής και ανάλογα με αυτόν καλείται αντίστοιχα, διπολική, τετραπολική, κ.λπ. Πάντοτε ο αριθμός των πόλων που διαθέτει ένας ηλεκτροκινητήρας είναι άρτιος αριθμός. (Βασιλακόπουλος, 2006)



Εικόνα 2.3: (α) Στάτης κινητήρα, (β) μαγνητικός πόλος.

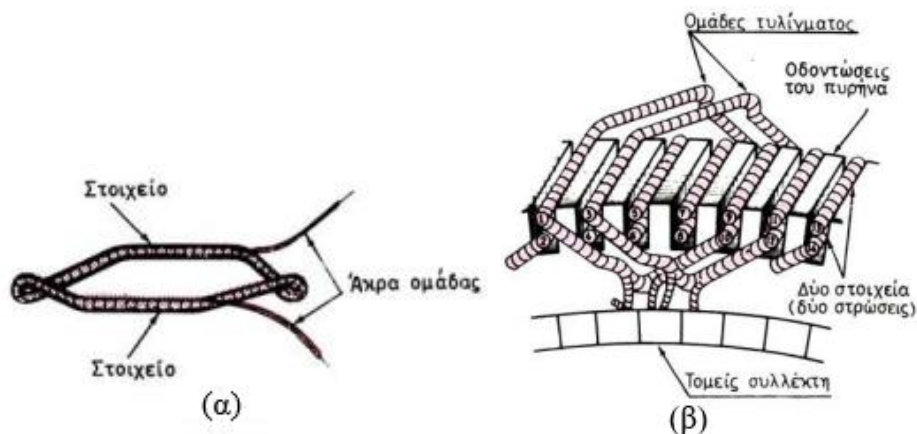
Ο δρομέας του κινητήρα φέρει τον άξονα, επάνω στον οποίο αποδίδεται η ροπή της μηχανής. Επάνω σε αυτόν βρίσκονται ο συλλέκτης, το επαγωγικό τύμπανο και ο ανεμιστήρας του κινητήρα, όπως αυτά παρουσιάζονται στην εικόνα 2.4α. Σκοπός του ανεμιστήρα είναι η ώθηση του αέρα για την απαγωγή θερμότητας από τα τυλίγματα του κινητήρα. (Βασιλακόπουλος, 2006).



Εικόνα 2.4: (α) Δρομέας, (β) Πυρήνας επαγωγικού τυμπάνου.

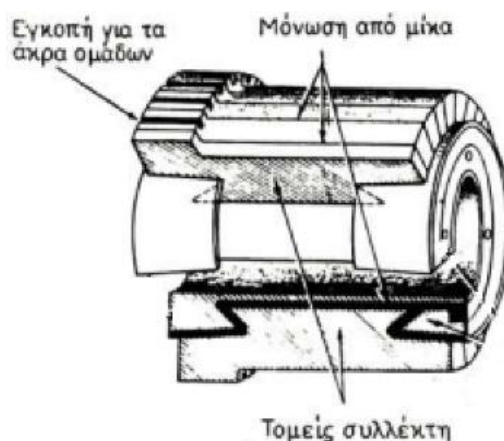
Το επαγωγικό τύμπανο αποτελείται και αυτό από πυρήνα, κατασκευασμένο από σιδηροελάσματα και μονωμένα μεταξύ τους με ειδικό βερνίκι. Τα ελάσματα αυτά φέρουν οδοντώσεις και σχηματίζουν τα αυλάκια του τυμπάνου, μέσα στα οποία βρίσκεται ένα τύλιγμα που ονομάζεται τύλιγμα τυμπάνου. Το τύλιγμα τυμπάνου δεν είναι ενιαίο αλλά αποτελείται από πολλές ομάδες μικρότερων τυλιγμάτων (σχ. 2.5α). Κάθε ομάδα αποτελείται από πολλές σπείρες μονωμένου σύρματος χαλκού και τα άκρα της συνδέονται σε δύο τομείς του συλλέκτη, σύμφωνα με την εικόνα 2.5β. Κάθε στοιχείο της ίδια ομάδας, τοποθετείται σε διαφορετικό αυλάκι του πυρήνα με τρόπο

τέτοιο, ώστε κάθε αυλάκι να έχει δύο στοιχεία από δύο διαφορετικές ομάδες (σχ. 2.5β). Όλες οι ομάδες που είναι τοποθετημένες στο πυρήνα του τυμπάνου κατά αυτό τον τρόπο, καλούνται στο σύνολο τους τύλιγμα τυμπάνου. (Βασιλακόπουλος, 2006)



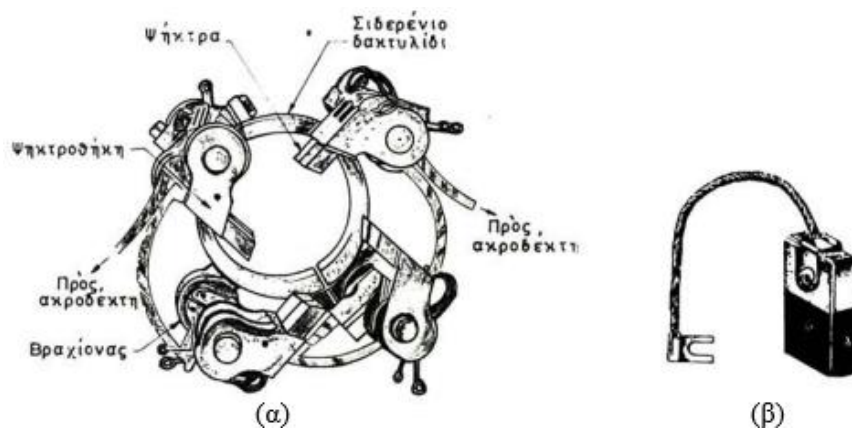
Εικόνα 2.5: (α) Ομάδα τυλίγματος, (β) Τοποθέτηση ομάδων στις οδοντώσεις του πυρήνα.

Ο συλλέκτης κατασκευάζεται από πολλά χάλκινα ελάσματα που ονομάζονται τομείς του συλλέκτη και σχηματίζουν την κυλινδρική του επιφάνεια. Οι τομείς είναι μονωμένοι μεταξύ τους, αλλά και ως προς τον άξονα με μίκα. Επάνω στους τομείς βρίσκονται εγκοπές με τις οποίες γίνεται η σύνδεση του συλλέκτη με τις ομάδες του τυμπάνου. (Βασιλακόπουλος, 2006)



Εικόνα 2.6: Συλλέκτης.

Στο εσωτερικό του στάτη υπάρχει και άλλο ένα εξάρτημα, ο ψυκτροφορέας, ο οποίος βρίσκεται απέναντι από το συλλέκτη. Αυτός αποτελείται από ένα μεταλλικό δακτυλίδι που διαθέτει βραχίονες μονωμένους προς αυτό. Επάνω στους βραχίονες στερεώνονται ψυκτροθήκες, εντός των οποίων τοποθετούνται ψύκτρες κατασκευασμένες από άνθρακα. Οι ψυκτρές διαθέτουν χάλκινο σύρμα (σχ. 2.7β) που συνδέεται στον ακροδέκτη της ψυκτροθήκης και μέσω του συλλέκτη τροφοδοτούν το τυλίγμα του τυμπάνου. Για τη καλύτερη επαφή των ψυκτρών με το συλλέκτη, αυτές πιέζονται με μικρά ελατήρια τα οποία στερεώνονται στην ψυκτροθήκη. (Βασιλακόπουλος, 2006)

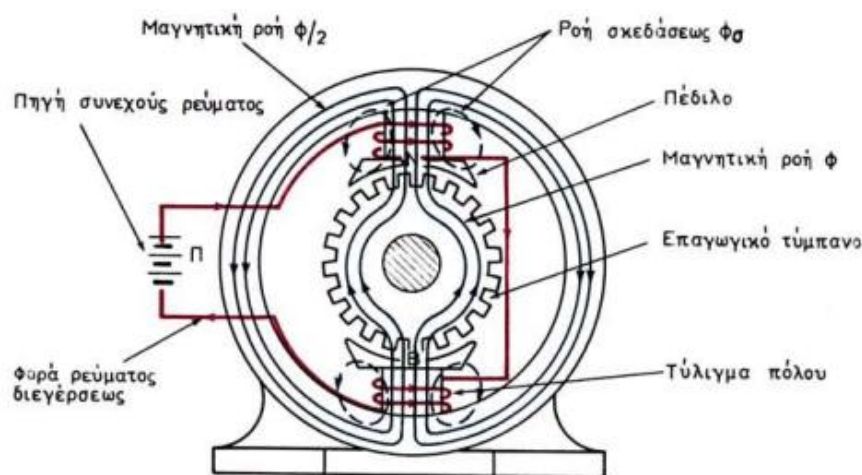


Εικόνα 2.7: (α) Ψυκτροφορέας, (β) Ψύκτρα.

2.4 Διέγερση κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος πολύ μικρής ισχύος, για την παραγωγή του μαγνητικού πεδίου μέσα στο οποίο περιστρέφεται το επαγωγικό τύμπανο, διαθέτουν μόνιμους μαγνήτες (σχ. 2.1α). Στους κινητήρες μεγαλύτερης ισχύος, το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από ηλεκτρομαγνήτες, δηλαδή από μαγνητικούς πόλους των οποίων τα τυλίγματα τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος.

Έστω μια διπολική μηχανή συνεχούς ρεύματος με συνδεδεμένα τα τυλίγματα των πόλων της σε σειρά και τροφοδοτούμενη από πηγή συνεχούς ρεύματος. Αποτέλεσμα αυτού θα είναι να αναπτυχθεί ένα μαγνητικό πεδίο του οποίου οι μαγνητικές γραμμές θα ακολουθούν την φορά της εικόνας 2.8. (Βασιλακόπουλος, 2006)



Εικόνα 2.8: Διέγερση διπολικής μηχανής.

Σε ένα κινητήρα, η παραγωγή του μαγνητικού πεδίου από το ηλεκτρικό ρεύμα καλείται διέγερση της μηχανής. Αντίστοιχα, το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα των πόλων ονομάζεται ρεύμα διεγέρσεως, ενώ όλα τα τυλίγματα των μαγνητικών πόλων που βρίσκονται στο στάτη, σχηματίζουν ένα ενιαίο τύλιγμα που ονομάζεται τύλιγμα διέγερσης. (Βασιλακόπουλος, 2006)

Κατά τη τροφοδοσία του τυλίγματος διέγερσης, αναπτύσσεται μαγνητική ροή. Χρήσιμη είναι εκείνη η ποσότητα ροής που ξεκινά από τον ένα πόλο, διαπερνά το τύμπανο και το διάκενο εκατέρωθεν αυτού, φτάνει στον άλλο πόλο και επιστρέφει μέσα από το ζύγωμα του κινητήρα. Η ροή αυτή είναι που δημιουργεί τα ζεύγη δυνάμεων στο επαγωγικό τύμπανο και επομένως την ροπή του κινητήρα. Υπάρχει μία μικρή ποσότητα μαγνητικής ροής που ακολουθεί ευκολότερες διαδρομές (σχ. 2.8), η οποία δεν συμβάλει στην παραγωγή ροπής και καλείται ροή σκεδάσεως Φ_{σ} . (Βασιλακόπουλος, 2006)

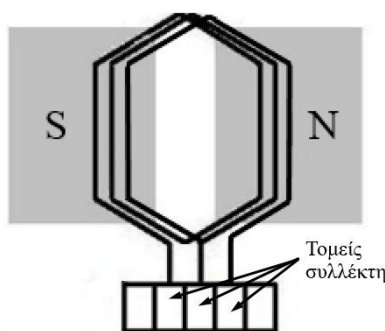
2.5 Κατηγορίες τυλιγμάτων επαγωγικού τυμπάνου

Το επαγωγικό τύμπανο ενός πραγματικού κινητήρα διαφέρει από αυτό του στοιχειώδους κινητήρα της μιας σπείρας (σχ. 2.2) και αποτελείται από πολλές ομάδες (σχ. 2.5α), όπου κάθε μία έχει πολλές σπείρες. Οι ομάδες αυτές διανέμονται κατά μήκος της κυλινδρικής επιφάνειας του επαγωγικού τυμπάνου με ομοιόμορφο τρόπο και τοποθετούνται μέσα στα αυλάκια του. Κατ' αυτόν τον τρόπο κατασκευάζονται κινητήρες που μπορούν να αναπτύξουν σημαντική και σταθερή ροπή περιστροφής.

Έτσι λοιπόν ανάλογα με το είδος της ηλεκτρικής μηχανής, τα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου των κινητήρων συνεχούς ρεύματος διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα βροχοτυλίγματα και τα κυματοτυλίγματα. (Βασιλακόπουλος, 2006)

2.5.1 Βροχοτυλίγματα

Τα βροχοτυλίγματα αποτελούνται από ομάδες μίας ή και περισσότερων σπειρών και σχηματίζουν κλειστούς βρόγχους. Τα άκρα κάθε ομάδας συνδέονται σε διαδοχικούς τομείς του συλλέκτη, όπου στον τομέα του συλλέκτη που τελειώνει η μία ομάδα, αρχίζει η επόμενη. Κάθε ομάδα έχει έκταση που αρχίζει από ένα νότιο πόλο και τελειώνει σε ένα βόρειο πόλο. Η διάταξη των ομάδων γίνεται με κατάλληλο τρόπο σχηματίζοντας παράλληλους κλάδους. Στις μηχανές που διαθέτουν βροχοτυλίγματα, ο αριθμός των ψυκτρών είναι ίδιος με τον αριθμό των πόλων και των παράλληλων κλάδων. (Βασιλακόπουλος, 2006).



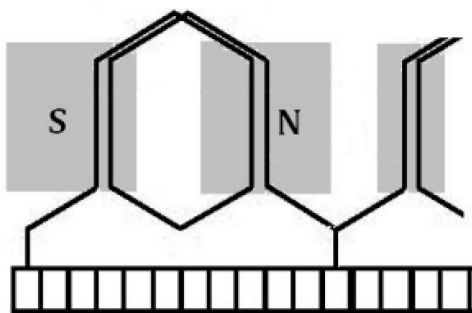
Εικόνα 2.9: Σύνδεση βροχοτυλίγματος στους τομείς του συλλέκτη.

Τα τυλίγματα αυτά συναντώνται στα επαγωγικά τύμπανα μηχανών χαμηλής τάσης και υψηλής έντασης ρεύματος. Έτσι λοιπόν οι ομάδες του τυλίγματος κατασκευάζονται από αγωγούς μεγάλης διατομής. Τέτοιου είδους τυλίγματα χρησιμοποιούνται στις μίξες των οχημάτων. (Βασιλακόπουλος, 2006)

2.5.2 Κυματοτυλίγματα

Στα κυματοτυλίγματα η σύνδεση των άκρων κάθε ομάδας γίνεται σε τομείς που απέχουν πολύ μεταξύ τους. Κάθε ομάδα αποτελείται από πολλαπλές σπείρες, όπου το τέλος της πρώτης είναι η αρχή της επόμενης. Η συνήθης διάταξη των ομάδων είναι τέτοια ώστε να σχηματίζονται δύο

παράλληλοι κλάδοι. Στα κυματοτυλίγματα, ο αριθμός των ψυκτρών δεν απαιτείται να είναι ίδιος με τον αριθμό των πόλων. Τέτοιου είδους τυλίγματα χρησιμοποιούνται σε μηχανές υψηλής τάσης και χαμηλής έντασης ρεύματος. (Βασιλακόπουλος, 2006)

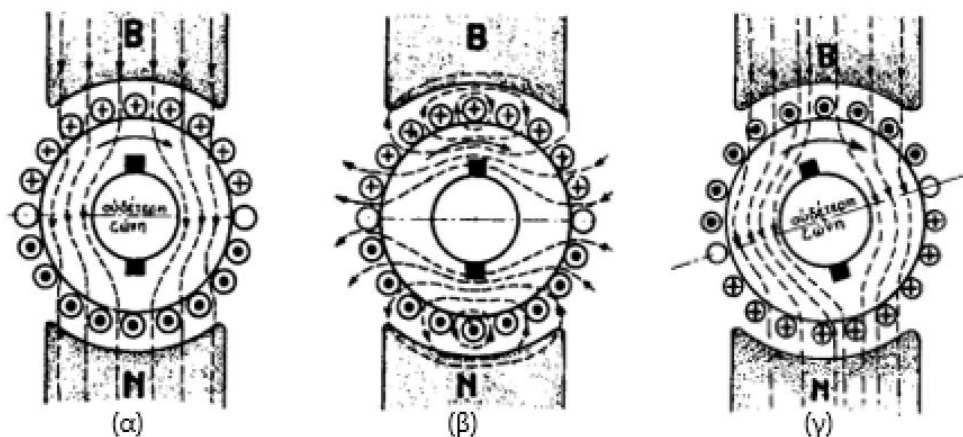


Εικόνα 2.10: Σύνδεση κυματοτυλίγματος στους τομείς του συλλέκτη.

2.6 Αντίδραση επαγωγικού τυμπάνου

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από τους πόλους της μηχανής και η μορφή του φαίνεται στην εικόνα 2.11α. Το πεδίο αυτό καλείται και κύριο μαγνητικό πεδίο, ενώ οι αντίστοιχοι πόλοι ονομάζονται κύριοι μαγνητικοί πόλοι. Στην ίδια εικόνα σημειώνονται και οι διευθύνσεις των δυναμικών γραμμών του πεδίου διεγέρσεως, καθώς και οι ψύκτρες οι οποίες τοποθετούνται στους άξονες των πόλων. (Βασιλακόπουλος Σ. Ν., 1977)

Όταν η μηχανή τροφοδοτηθεί, το τυλίγμα του τυμπάνου θα αρχίσει να διαρρέεται από ρεύμα. Έτσι λοιπόν, οι αγωγοί του τυμπάνου θα δημιουργήσουν ένα δεύτερο μαγνητικό πεδίο, του οποίου οι μαγνητικές γραμμές θα διευθύνονται σύμφωνα με την εικόνα 2.11β. Τα δύο αυτά πεδία αθροίζονται γεωμετρικά και σχηματίζουν ένα συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο δεν μηδενίζεται στις θέσεις των ουδέτερων ζωνών, αλλά σε νέες θέσεις οι οποίες καθυστερούν κατά την φορά περιστροφής του επαγωγικού τυμπάνου (σχ. 2.11γ). Δηλαδή, η ουδέτερη ζώνη υφίσταται μια μετατόπιση αντίθετα της φοράς περιστροφής, η οποία είναι ανάλογη της αύξησης του ρεύματος τυμπάνου. Η επίδραση αυτή του επαγωγικού τυμπάνου στο μαγνητικό πεδίο της μηχανής και κατ' επέκταση στην ουδέτερη ζώνη, ονομάζεται αντίδραση τυμπάνου. (Βασιλακόπουλος Σ. Ν., 1977)



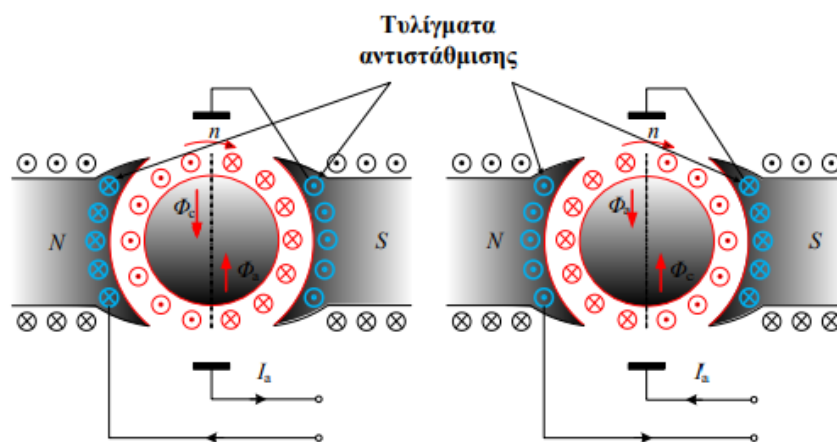
Εικόνα 2.11: (α) Κύριο μαγνητικό πεδίο, (β) Μαγνητικό πεδίο οπλισμού και (γ) Μετατόπιση ουδέτερης ζώνης

Η μετατόπιση της ουδέτερης ζώνης του μαγνητικού πεδίου έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του ολικού μαγνητικού πεδίου του κινητήρα και επομένως τη μείωση της μαγνητικής ροής που διαπερνά το διάκενο της μηχανής. Λόγο αυτού, η μετατόπιση οδηγεί στην μείωση της ΑΗΕΔ και της ροπής του κινητήρα, καθώς όπως θα δούμε στη συνέχεια, είναι μεγέθη ανάλογα της μαγνητικής ροής. Επιπλέον, λόγω της μετατόπισης, οι ψήκτρες βραχυκυκλώνουν ομάδες του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου που βρίσκονται σε τάση, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σπινθηρισμοί μεταξύ αυτών και του συλλέκτη. Αποτέλεσμα, αυτού είναι η ανάπτυξη απωλειών ενέργειας, η εμφάνιση μεγάλων θερμοκρασιών στο συλλέκτη και η πρόωρη καταστροφή των ψηκτρών. (Τουλόγλου Σ. & Στεργίου Β., 1999)

Τα αποτελέσματα του φαινομένου αντιδράσεως τυμπάνου αντιμετωπίζονται με την μετακίνηση των ψηκτρών στη θέση της ουδέτερης ζώνης. Όμως, αυτή δεν είναι σταθερή. Όταν μεταβάλλεται το φορτίο, ταυτόχρονα μεταβάλλεται η ένταση του τυλίγματος επαγωγικού τυμπάνου και επομένως το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο επηρεάζει την ουδέτερη ζώνη. Κάθε φορά που αυτή αλλάζει, θα πρέπει να μετακινούνται κατάλληλα και οι ψήκτρες. Η μετακίνηση των ψηκτρών δεν είναι πρακτικά εύκολη διαδικασία και επί πλέον δεν λύνει το πρόβλημα της μείωσης της συνολικής μαγνητικής ροής. Για να αντιμετωπίσουμε την αντίδραση του τυμπάνου μπορούμε, είτε να τοποθετήσουμε βοηθητικούς πόλους, είτε μαγνητικούς πόλους με τύλιγμα αντιστάθμισης, είτε και συνδυασμό των δύο. (Βλάχου Α. Γ., 2018)

2.7 Μαγνητικοί πόλοι με τυλίγματα αντιστάθμισης

Για να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις που επιφέρει η αντίδραση του τυμπάνου, τοποθετούνται τυλίγματα αντιστάθμισης μέσα σε αυλάκια που βρίσκονται στα πέδιλα των κύριων πόλων της μηχανής, απέναντι από τους αγωγούς του δρομέα. Τα τυλίγματα αντιστάθμισης συνδέονται σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου με κατάλληλο τρόπο, ώστε κάθε αγωγός του τυλίγματος αντιστάθμισης να διαρρέεται κάθε στιγμή από ίσο και αντίθετης φοράς ρεύμα, από εκείνο του γειτονικού αγωγού του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου. Αν τα δύο τυλίγματα έχουν τον ίδιο αριθμό αμπερελιγμάτων, επειδή συνδέονται σε σειρά και διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, δημιουργούν μαγνητικά πεδία ίσης έντασης αλλά αντίθετης φοράς, τα οποία αλληλοεξουδετερώνονται, με αποτέλεσμα να κυριαρχεί το κύριο μαγνητικό πεδίο της μηχανής. Ταυτόχρονα εξαλείφονται και οι σπινθηρισμοί, καθώς η ουδέτερη ζώνη δεν μετακινείται από την αφόρτιστη θέση. Οι μαγνητικοί πόλοι με τυλίγματα αντιστάθμισης αποτελούν μια στοχευμένη λύση για την αντιμετώπιση της αντίδρασης τυμπάνου αλλά ταυτόχρονα απαιτούν μεγάλη δαπάνη για την κατασκευή τους. (Μαλατέστας Π. Β., 2019)

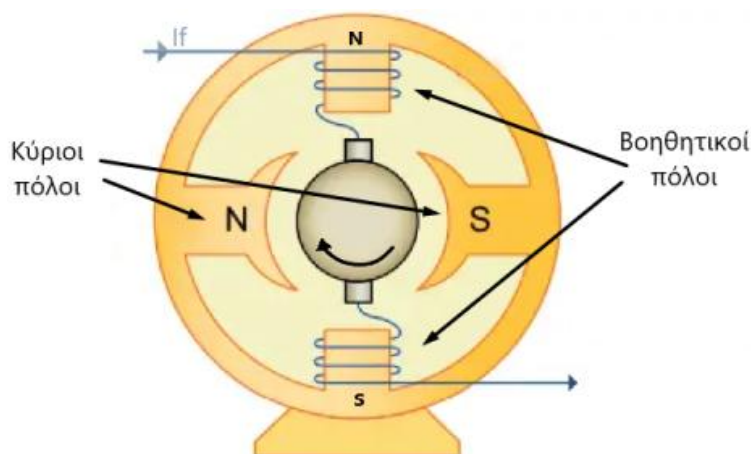


Εικόνα 2.12: Τυλίγματα αντιστάθμισης διπολικής μηχανής.

2.8 Βοηθητικοί πόλοι

Οι βοηθητικοί πόλοι είναι μικροί πόλοι, οι οποίοι τοποθετούνται στο στάτη, μεταξύ των κύριων πόλων της μηχανής. Όπως οι κύριοι πόλοι, έτσι και αυτοί, αποτελούνται από το πυρήνα και το τύλιγμα τους που καλείται βοηθητικό τύλιγμα, το οποίο συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του

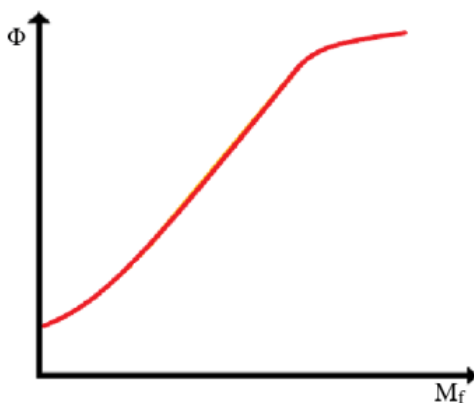
τυμπάνου. Οι βοηθητικοί πόλοι δημιουργούν ένα βοηθητικό μαγνητικό πεδίο, το οποίο εξασφαλίζει ότι στις ομάδες που υφίστανται μεταγωγή, η επαγόμενη τάση είναι μηδενική. Αυτό σημαίνει την πλήρη εξάλειψη των σπινθηρισμών. Όμως, το μαγνητικό πεδίο των βοηθητικών πόλων επιδρά μόνο τοπικά, στις ομάδες που υφίστανται τη μεταγωγή. Έτσι, οι βοηθητικοί πόλοι δεν εξαλείφουν το πρόβλημα της μείωσης της ολικής ροής. Στους ηλεκτρικούς κινητήρες, οι βοηθητικοί πόλοι έχουν συγκεκριμένη πολικότητα κατά την οποία, κινούμενοι κατά τη φορά περιστροφής, μετά από ένα κύριο μαγνητικό πόλο ακολουθεί ένας βοηθητικός μαγνητικός πόλος της ίδιας πολικότητας. Συνοψίζοντας οι βοηθητικοί πόλοι συμβάλλουν στην εξάλειψη των σπινθηρισμών με μικρό κόστος, με επακόλουθο την μείωση των απωλειών και την επέκταση της διάρκειας ζωής των ψυκτών, όμως η εξασθένηση της μαγνητικής ροής εξακολουθεί να υπάρχει. (Τζόγια Χ. Κ., n.d. & Θέμελης Δ., 2015)



Εικόνα 2.13: Διπολικός κινητήρας με βοηθητικούς πόλους.

2.9 Καμπύλη μαγνήτισης

Οι ηλεκτρικές μηχανές χαρακτηρίζονται από μία καμπύλη μαγνήτισης, η οποία διαφέρει σε κάθε μηχανή και παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοσή της. Όπως έχει αναφερθεί, η καμπύλη μαγνήτισης των σιδηρομαγνητικών υλικών εκφράζεται από την χαρακτηριστική $B = f(H)$. Βέβαια, αυτή η χαρακτηριστική μπορεί να εκφραστεί και με παράγωγα μεγέθη, συνήθως με τη μεταβολή της μαγνητικής ροής ανά πόλο συναρτήσει τη μαγνητεγερτικής δύναμης του πεδίου διέγερσης.

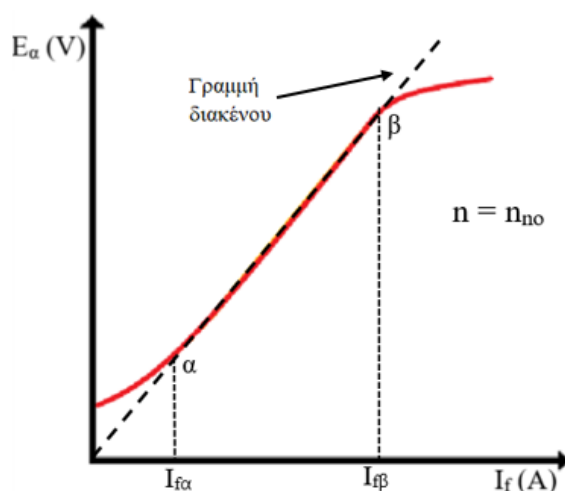


Εικόνα 2.14: Χαρακτηριστική καμπύλη μαγνήτισης μηχανής Σ.Ρ.

Επειδή όμως η μέτρηση της μαγνητικής ροής είναι μία δύσκολη διαδικασία, προτιμάται η μέτρηση της επαγόμενης ΗΕΔ στο τυλίγμα τυμπάνου, όπου σύμφωνα με την (2.3) είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής, με την προϋπόθεση ότι η μηχανή περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Έτσι λοιπόν η έκφραση της καμπύλης μαγνήτισης παίρνει την εξής μορφή:

$$\mathbf{E}_\alpha = \mathbf{f}(\mathbf{I}_f), \mathbf{I}_\alpha = \mathbf{0} \text{ και } \mathbf{n} = \text{σταθ.} \quad \#(2.6)$$

Πρόκειται για μία καμπύλη μαγνήτισης που εκφράζεται από τη μεταβολή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος του τυλίγματος τυμπάνου συναρτήσει του ρεύματος διέγερσης, για σταθερές στροφές και συνήθως ίσες με τις ονομαστικές. Η καμπύλη αυτή είναι γνωστή σαν χαρακτηριστική κενού φορτίου και η μορφή της φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 2.15: Χαρακτηριστική καμπύλη κενού φορτίου.

Στην καμπύλη αυτή φαίνεται ότι για μικρό ρεύμα διέγερσης, επάγεται μία πολύ μικρή τάση στο τύλιγμα του τυμπάνου και οφείλεται στον παραμένοντα μαγνητισμό των σιδηρομαγνητικών υλικών. Στην περίπτωση που το σιδηρομαγνητικό κύκλωμα μαγνητίζεται για πρώτη φορά και το ρεύμα διέγερσης είναι μηδενικό, η καμπύλη θα διέρχεται από την αρχή των αξόνων:

$$\mathbf{E}_{\alpha,rm} = \mathbf{K}_g \cdot \Phi(\mathbf{I}_f = \mathbf{0}) \cdot \mathbf{n}_{no}(\mathbf{I}_f = \mathbf{0}) = \mathbf{K}_g \cdot \Phi \cdot \mathbf{n}_{no} \quad (\mathbf{V}) \quad \#(2.7)$$

Η χαρακτηριστική έχει ένα γραμμικό τμήμα, την περιοχή $\alpha - \beta$ ($I_{fa} < I_f < I_{fb}$). Πέραν αυτής (δηλαδή $I_f > I_{fb}$), το σιδηρομαγνητικό υλικό της μηχανής εισέρχεται στην περιοχή κορεσμού, όπου για μικρές μεταβολές της ΗΕΔ, το ρεύμα διέγερσης μεταβάλλεται κατά πολύ. Η επέκταση της γραμμικής περιοχής που δείχνεται με διακεκομμένη γραμμή είναι γνωστή ως γραμμή διακένου. Οι περισσότεροι κινητήρες λειτουργούν κοντά στο σημείο κορεσμού (σημείο β) της καμπύλης μαγνήτισης, ώστε να έχουν την βέλτιστη αξιοποίηση του μαγνητικού κυκλώματος και τη μέγιστη παραγωγή ροπής. Όταν λειτουργούν στη γραμμική περιοχή με σταθερές στροφές, η (2.6) παίρνει τη μορφή:

$$\mathbf{E}_\alpha = \mathbf{K} \cdot \mathbf{I}_f \quad (\mathbf{V}) \quad \#(2.8)$$

όπου: $\mathbf{K} = \frac{\Delta E_\alpha}{\Delta I_f}$, η κλίση της γραμμής διακένου.

2.10 Απώλειες ισχύος και βαθμός απόδοσης

Η μελέτη και η κατανόηση των παραγόντων που επιδρούν στην ανάπτυξη απωλειών στους ηλεκτρικούς κινητήρες είναι βασικής σημασίας, καθώς έτσι διαμορφώνεται ο βαθμός απόδοσης και επομένως το κόστος λειτουργίας τους. Ο βαθμός απόδοσης μπορεί να βρεθεί με απευθείας μέτρηση της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος στην είσοδο και της αποδιδόμενης μηχανικής ισχύος στην έξοδο της μηχανής κάτω από συγκεκριμένες λειτουργικές συνθήκες. Ένας άλλος τρόπος είναι υπολογίζοντας τις διάφορες απώλειες ισχύος που υπεισέρχονται κάτω από λειτουργικές συνθήκες φόρτισης. Η μέθοδος αυτή προτιμάται σε μηχανές μέσης και μεγάλης ισχύος όπου η αναπαράσταση των αντιπροσωπευτικών συνθηκών φόρτισης είναι δύσκολη και επιπλέον το κόστος μέτρησης είναι υψηλό. (Μαλατέστας, 2019) Έτσι λοιπόν ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \quad \#(2.9)$$

$$\eta(\%) = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \cdot 100 \quad \#(2.10)$$

όπου:

- P_{in} είναι η ηλεκτρική ισχύς εισόδου, σε (W),
- P_{out} είναι η μηχανική ισχύς εξόδου, σε (W),
- P_{loss} είναι οι συνολικές απώλειες, σε (W).

Η απώλειες που παρουσιάζονται, οφείλονται σε παράγοντες που σχετίζονται με αγωγούς που διαρρέονται από ρεύματα δημιουργώντας ηλεκτρικές απώλειες, σιδηρομαγνητικά υλικά που δρουν κάτω από μεταβαλλόμενες μαγνητικές ροές εμφανίζοντας μαγνητικές απώλειες καθώς και κινούμενα μηχανικά μέρη που παρουσιάζουν μηχανικές απώλειες. Όλες οι απώλειες εμφανίζονται με μορφή θερμότητας, η οποία θερμαίνει τη μηχανή. (Μαλατέστας, 2019) Οι απώλειες που δημιουργούνται όταν η μηχανή λειτουργεί με σταθερή τάση και σταθερή ταχύτητα περιστροφής διακρίνονται σε:

- Σταθερές απώλειες που είναι ανεξάρτητες του φορτίου
- Μεταβλητές απώλειες που μεταβάλλονται από το φορτίο.

Στις σταθερές απώλειες κατατάσσονται οι μηχανικές απώλειες που οφείλονται σε απώλειες τριβής του δρομέα με τα έδρανα του στάτη, των ψυκτρών με το συλλέκτη, καθώς και τις αεροδυναμικές απώλειες κατά την περιστροφή του δρομέα και του ανεμιστήρα της μηχανής. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν και οι απώλειες πυρήνα η οποίες χωρίζονται στις απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων. Οι απώλειες υστέρησης οφείλονται σε διαδοχικές μεταβολές της μαγνήτισης του πυρήνα του τυμπάνου κατά την περιστροφή του μέσα στο μαγνητικό πεδίο της μηχανής, ενώ οι απώλειες δινορευμάτων εμφανίζονται λόγω της ανάπτυξης ρευμάτων εσωτερικά του πυρήνα, που οφείλονται πάλι στην περιστροφή του τυμπάνου μέσα στο μαγνητικό πεδίο των πόλων. (Μαλατέστας, 2019) Οι σταθερές απώλειες που είναι γνωστές και ως απώλειες περιστροφής, υπολογίζονται από τη σχέση:

$$P_r = P_c + P_m \quad (W) \quad \#(2.11)$$

όπου:

- P_r είναι οι απώλειες περιστροφής, σε (W),
- P_c είναι οι μαγνητικές απώλειες πυρήνα (υστέρησης και δινορευμάτων), σε (W),

- P_m είναι οι μηχανικές απώλειες, σε (W).

Οι μεταβλητές απώλειες είναι ηλεκτρικές απώλειες που εμφανίζονται στα διάφορα κυκλώματα της μηχανής και οφείλονται στην θερμότητα που παράγεται λόγω του ρεύματος που τα διαρρέει. Τέτοιες απώλειες είναι οι απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων του τυμπάνου και της διέγερσης, οι απώλειες επαφής των ψηκτρών με το συλλέκτη, καθώς και οι απώλειες που οφείλονται στο επιδερμικό φαινόμενο των αγωγών όλων των κυκλωμάτων που συνθέτουν τη μηχανή. (Μαλατέστας, 2019) Οι ηλεκτρικές απώλειες υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{el} = P_{cu} + P_s + P_b \quad (W) \quad \#(2.12)$$

όπου:

- P_{el} είναι οι ηλεκτρικές απώλειες, σε (W),
- P_{cu} είναι οι απώλειες χαλκού, σε (W),
- P_s είναι οι απώλειες λόγω επιδερμικού φαινομένου, σε (W),
- P_b είναι οι απώλειες επαφής των ψηκτρών, σε (W).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι απώλειες χαλκού είναι θερμικές απώλειες των τυλιγμάτων του επαγωγικού τυμπάνου και της διέγερσης, όπου υπολογίζονται από τις αντίστοιχες σχέσεις:

$$P_a = I_a^2 \cdot R_a \quad (W) \quad \#(2.13)$$

$$P_f = I_f^2 \cdot R_f \quad (W) \quad \#(2.14)$$

όπου:

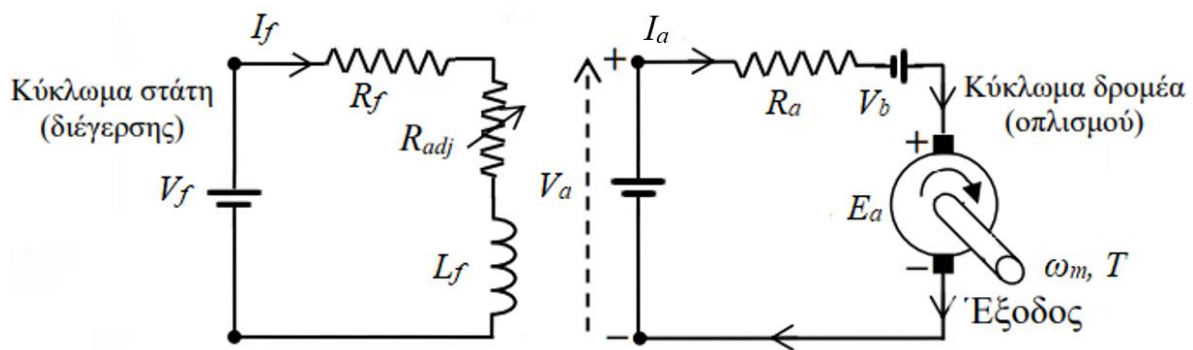
- I_a και I_f είναι η ένταση ρεύματος του τυλίγματος τυμπάνου και διέγερσης αντίστοιχα, σε (A),
- R_a και R_f είναι η αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου και διέγερσης αντίστοιχα, σε (Ω).

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΞΕΝΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα

Το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα ξένης διέγερσης αποτελείται από δύο μικρότερα κυκλώματα, το κύκλωμα της διέγερσης και το κύκλωμα του οπλισμού (εικ. 3.1).

Το κύκλωμα της διέγερσης είναι υπεύθυνο για την παραγωγή της μαγνητικής ροής του κινητήρα και αποτελείται από τα τυλίγματα διέγερσης, τα οποία αναπαρίστανται από την συνολική αυτεπαγωγή L_f και την ωμική αντίσταση R_f . Το τύλιγμα τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς τάσης V_f και περιλαμβάνει μία εξωτερική μεταβλητή αντίσταση R_{adj} , που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ποσότητας του ρεύματος διέγερσης της μηχανής.

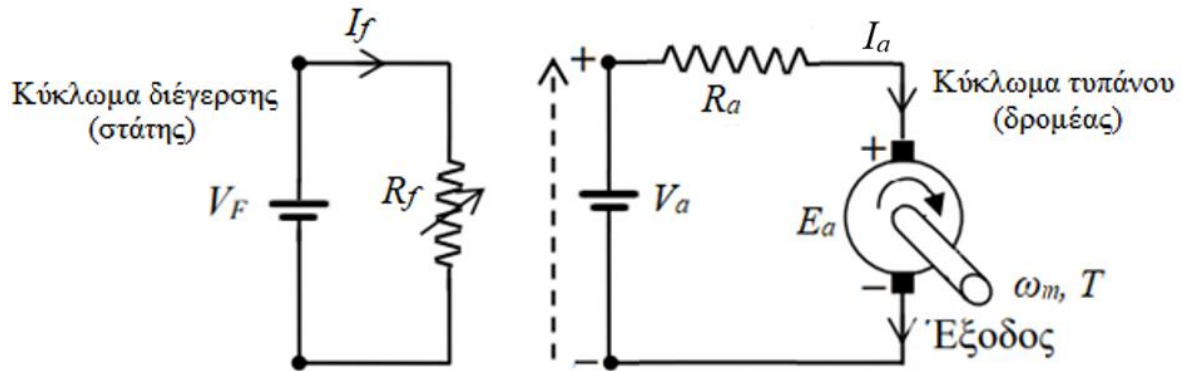


Εικόνα 3.1: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα με ξένη διέγερση.

Το κύκλωμα του οπλισμού περιλαμβάνει την αναπτυσσόμενη εξ επαγωγής τάση (ΑΗΕΔ) της μηχανής, η οποία παριστάνεται με μια ιδανική πηγή τάσης E_a και την ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου η οποία απεικονίζεται με μια αντίσταση R_a . Επιπλέον περιλαμβάνει μία μικρή πηγή συνεχούς τάσης, αντίθετης πολικότητας του ρεύματος τυμπάνου, η οποία αντιπροσωπεύει την πτώση τάσης V_b στις ψύκτρες του συλλέκτη.

Η πτώση τάσης στις ψήκτρες είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό της εφαρμοζόμενης τάσης στα άκρα του κινητήρα. Σε περιπτώσεις που δεν είναι σημαντική ποσότητα, μπορεί να μην ληφθεί υπόψιν ή να περιληφθεί κατά προσέγγιση στην τιμή της αντίστασης R_a . Επιπλέον, η ωμική αντίσταση των

τυλιγμάτων διέγερσης, μπορεί να συμπεριληφθεί στην τιμή της εξωτερικής μεταβλητής αντίστασης R_{adj} . (Βασιλακόπουλος Σ. Ν., 1977) Έτσι, το παραπάνω κύκλωμα μπορεί να απλοποιηθεί και να πάρει την μορφή που φαίνεται στην εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα με ξένη διέγερση.

Το συνολικό ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο είναι ίσο με το άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων των τυλιγμάτων τυμπάνου και διέγερσης.

$$I = I_f + I_a \quad (\text{A}) \#(3.1)$$

όπου:

- I_f είναι το ρεύμα του τυλίγματος διέγερσης, σε (A),
- I_a είναι το ρεύμα του τυλίγματος τυμπάνου, σε (A).

Η τάση στο τύλιγμα διέγερσης είναι ίση με την πτώση τάσεως στην ωμική αντίσταση του τυλίγματος, ενώ η τάση τροφοδοσίας στο τύλιγμα του τυμπάνου είναι ίση με το άθροισμα της επαγόμενης ΑΗΕΔ και της πτώση τάσης στα άκρα της ωμικής αντίστασης του τυλίγματος, όπου υπολογίζονται αντίστοιχα:

$$V_f = I_f \cdot R_f \quad (\text{V}) \#(3.2)$$

$$V_a = E_a + I_a \cdot R_a \quad (\text{V}) \#(3.3)$$

όπου:

- R_a και R_f είναι η ωμική αντίσταση τυλίγματος τυμπάνου και διέγερσης αντίστοιχα, σε (Ω),
- E_a είναι η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη, σε (V).

Σε ένα κινητήρα, ο αριθμός ζευγών των πόλων του στάτη, των στοιχείων του τυλίγματος τυμπάνου, των αγωγών κάθε στοιχείου αλλά και το πλήθος των παράλληλων κλάδων, είναι σταθερά μεγέθη. Για σταθερό ρεύμα διέγερσης, παραμένει σταθερή και η ροή των πόλων. Από την (2.3) προκύπτει ότι η επαγόμενη ΑΗΕΔ εξαρτάται από τη ταχύτητα περιστροφής. (Μαλατέστας, 2019)

$$E_a = K_m \cdot \Phi \cdot \omega_m = K_g \cdot \Phi \cdot n \quad \#(3.4)$$

όπου:

$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60} \quad \left(\frac{rad}{s}\right) \quad \#(3.5)$$

και

- Φ είναι η μαγνητική ροή ανά πόλο του πεδίου διέγερσης, σε (Wb),
- K_g, K_m είναι κατασκευαστικές σταθερές του κινητήρα,
- n είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, σε (rpm),
- ω_m είναι η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, σε (rad/s).

Στους κινητήρες ξένης διέγερσης, η ροή ανά πόλο του πεδίου διέγερσης παραμένει ανεπηρέαστη από το ρεύμα τυμπάνου και επομένως θεωρείται σταθερή, για σταθερό ρεύμα διέγερσης. Έτσι, για σταθερή ροή, υπάρχει αναλογία μεταξύ της παραγόμενης ροπής και του ρεύματος τυμπάνου καθώς ισχύει ότι:

$$T = K_m \cdot \Phi \cdot I_a \quad (Nm) \quad \#(3.6)$$

Από τις σχέσεις (3.3) και (3.4) προκύπτει:

$$\omega_m = \frac{E_a}{K_m \cdot \Phi} = \frac{V_a - I_a \cdot R_a}{K_m \cdot \Phi} \quad \left(\frac{rad}{s}\right) \quad \#(3.7)$$

3.2 Χαρακτηριστική φορτίου

Χαρακτηριστική φορτίου ενός κινητήρα είναι η γραφική παράσταση μεταξύ των ποσοτήτων εξόδου. Στον κινητήρα, η έξοδος είναι η αναπτυσσόμενη ροπή στον άξονα του και η γωνιακή ταχύτητα

περιστροφής του. Για το λόγο αυτό η χαρακτηριστική φορτίου συχνά καλείται και χαρακτηριστική ροπής – στροφών. Πρόκειται για μία γραφική της μορφής $\omega_m = f(T)$. Η μαθηματική έκφραση της χαρακτηριστική φορτίου προκύπτει από τον συνδυασμό των σχέσεων (3.6) και (3.7).

$$\omega_m = \frac{V_a}{K_m \cdot \Phi} - \frac{R_a}{(K_m \cdot \Phi)^2} \cdot T \quad \left(\frac{rad}{s}\right) \#(3.8)$$

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, το τύλιγμα της διέγερσης τροφοδοτείται ανεξάρτητα από εκείνο του τυμπάνου. (Μαλατέστας, 2019) Επομένως, για σταθερή τάση τροφοδοσίας στο τύλιγμα του πεδίου, η μαγνητική ροή στους πόλους παραμένει σταθερή και η σχέση (3.8) παίρνει τη μορφή:

$$\omega_m = A - B \cdot T \#(3.9)$$

όπου A, B σταθερές.

Η εξίσωση (3.9) σε ένα γράφημα της μορφής $\omega_m = f(T)$, παριστάνεται από μια ευθεία γραμμή. Σε αυτό το γράφημα η σταθερά A ορίζει τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα σε συνθήκες χωρίς φόρτιση ($T = 0$).

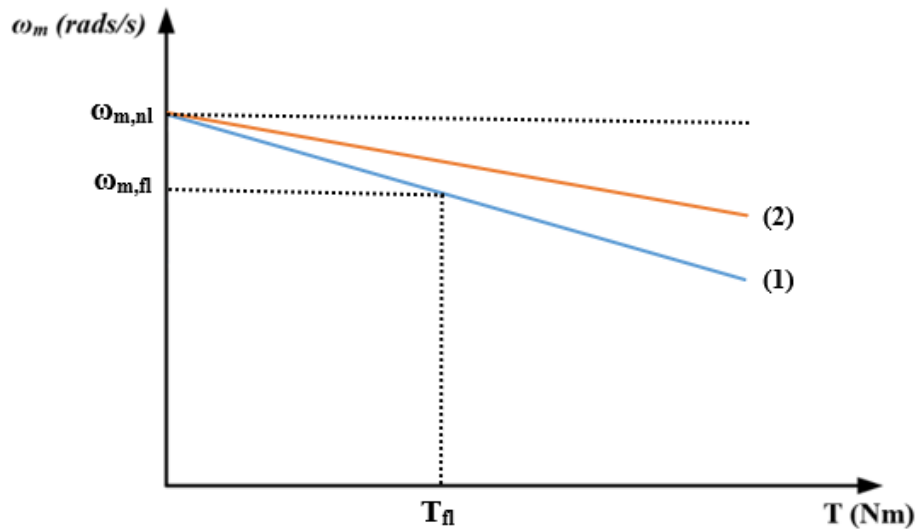
$$A = \omega_m(T = 0) = \omega_{m,nl} = \frac{V_a}{K_m \cdot \Phi} \#(3.10)$$

Ενώ η σταθερά B καθορίζει την κλίση της ευθείας, η οποία προκύπτει από τη σχέση:

$$B = - \frac{R_a}{(K_m \cdot \Phi)^2} \#(3.11)$$

Όπως φαίνεται από την (3.11), η κλίση της χαρακτηριστικής φορτίου είναι ένα αρνητική. Αυτό σημαίνει ότι, όταν κινητήρας στρέφεται με κάποιο αρχικό φορτίο σε ένα συγκεκριμένο αριθμό στροφών, αν επέλθει μια απότομη αύξηση του τρέχοντος φορτίου, θα προκαλέσει την ελάττωση των στροφών του και επομένως θα μειώσει την επαγόμενη ΑΗΕΔ. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση του ρεύματος στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου και επομένως της αναπτυσσόμενης ροπής στον άξονα του κινητήρα. Σε μία τέτοια περίπτωση υπάρχει γραμμική εξάρτηση της χαρακτηριστικής φορτίου, η οποία φαίνεται στην καμπύλη (1) της εικόνας 3.3. (Μαλατέστας, 2019)

Σε κινητήρες οι οποίοι δεν διαθέτουν τυλίγματα αντιστάθμισης και βοηθητικών πόλων, λόγω της αντίδρασης τυμπάνου που εμφανίζεται, η μαγνητική ροή του κινητήρα εξασθενεί και η μείωση των στροφών που προκαλείται για ίδια φόρτιση είναι μικρότερη. Η χαρακτηριστική αυτών των κινητήρων φαίνεται από την καμπύλη (2) της εικόνας 3.3. (Μαλατέστας, 2019)



Εικόνα 3.3: Χαρακτηριστική γωνιακής ταχύτητας - ροπής.

Το μεγάλο πλεονέκτημα που εμφανίζουν αυτοί οι κινητήρες, είναι ότι παρέχουν τη δυνατότητα μεταβολής του ρεύματος διέγερσης ανεξάρτητα από την τάση οπλισμού, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη απόδοση της μηχανής, καθώς οι απώλειες χαλκού δεν ρυθμίζονται ανάλογα με το εκάστοτε φορτίο. (Βασιλακόπουλος Σ. Ν., 1977)

3.3 Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής

Ο έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση, μπορεί να γίνει μέσα από τα μεγέθη τα οποία επηρεάζουν τη γωνιακή του ταχύτητα. Από σχέση (3.8), φαίνεται η εξάρτηση της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα από την τάση και την ωμική αντίσταση του οπλισμού, τη μαγνητική ροή του πεδίου και τη ροπή του φορτίου.

$$\omega_m = f(V_a, \Phi, R_a, T) \quad (3.12)$$

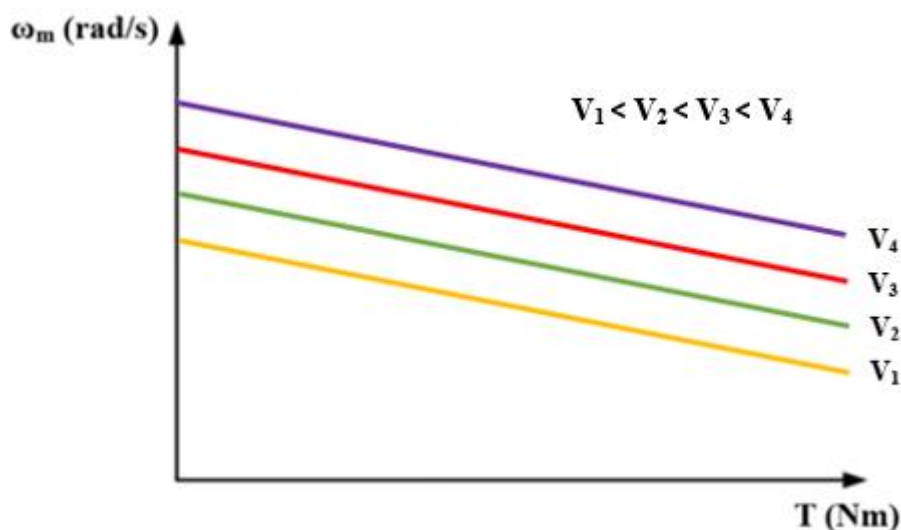
Δεδομένου ότι στο φορτίο είναι επιθυμητό να παρέχεται η μέγιστη δυνατή ροπή, ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής γίνεται με τις εξής μεθόδους:

- Με μεταβολή της τάσης στο τύλιγμα του τυμπάνου (V_a).
- Με μεταβολή της μαγνητικής ροής του πεδίου (Φ) μέσω του ρεύματος διεγέρσεως (I_f).
- Με μεταβολή της αντίστασης στο τύλιγμα του τυμπάνου (R_a).

3.3.1 Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής με μεταβολή της τάσης τυμπάνου (V_a)

Ο έλεγχος των στροφών του κινητήρα με μεταβολή της τάσης στο τύλιγμα του τυμπάνου (οπλισμός), αφορά τη μεταβολή των στροφών στην περιοχή από μηδενική ταχύτητα έως και την ονομαστική ($0 < n < n_{nom}$). Κατά τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα με μεταβολή της τάσης στον οπλισμό του, η τάση στο πεδίο της μηχανής παραμένει σταθερή και ρυθμίζεται στη τιμή που εξασφαλίζει το ονομαστικό ρεύμα διέγερσης. Αυτή η ένταση ρεύματος είναι η μέγιστη που μπορεί να λειτουργήσει το τύλιγμα διέγερσης χωρίς να καταστραφεί, το οποίο συντελεί στη μέγιστη παραγόμενη ροπή του κινητήρα, αλλά και στο περιορισμό της παραμόρφωσης της ροή διάκενου. Η ωμική αντίσταση στο τύλιγμα τυμπάνου παραμένει σταθερή, ενώ η ρύθμιση της τάσης και επομένως το ρεύμα στον οπλισμό μπορεί να γίνει με ημieleγχόμενη ή πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα ή μέσω Σ.Ρ./Σ.Ρ. μετατροπέα. (Μαλατέστας, 2019)

Αν αμεληθεί η αντίδραση τυμπάνου και η ωμική αντίσταση στο κύκλωμα του οπλισμού καθώς και η μαγνητική ροή στο κύκλωμα του πεδίου παραμείνουν σταθερές, η μεταβολή της τάσης τυμπάνου έχει σαν αποτέλεσμα την παράλληλη μετατόπιση των χαρακτηριστικών φορτίου.



Εικόνα 3.4: Επίδραση της μεταβολής της τάσης τυλίγματος τυμπάνου στη χαρακτηριστική φορτίου.

Προκύπτει από τα παραπάνω ότι, αυτός ο τρόπος ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής, εξασφαλίζει την ομαλή μεταβολή των στροφών σε μία ευρεία περιοχή λειτουργίας, η οποία αρχίζει από τις

μηδενικές στροφές και φτάνει μέχρι και τις ονομαστικές. Σε εφαρμογές που απαιτείται έλεγχος άνω των ονομαστικών στροφών, προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα υπερφόρτισης του κινητήρα, συνίσταται ο έλεγχος των στροφών μέσω του ρεύματος διεγέρσεως. (Μαλατέστας, 2019)

3.3.2 Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής με μεταβολή του ρεύματος διεγέρσεως (I_f)

Σε αυτή τη μέθοδο, επιχειρείται ο έλεγχος της ταχύτητας μέσω της μαγνητικής ροής του πεδίου, μεταβάλλοντας το ρεύμα στο τύλιγμα διεγέρσεως. Η τάση τροφοδοσίας και η ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου διατηρούνται σταθερά, ενώ ο έλεγχος του ρεύματος διεγέρσεως επιτυγχάνεται με την παρεμβολή εξωτερικής ωμικής αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα της διέγερσης. Αγνοώντας τον κορεσμό του σιδηρομαγνητικού υλικού στο πεδίο, η μαγνητική ροή συνδέεται γραμμικά με το ρεύμα διεγέρσεως από την εξής σχέση:

$$\Phi = K \cdot I_f \quad \#(3.13)$$

όπου:

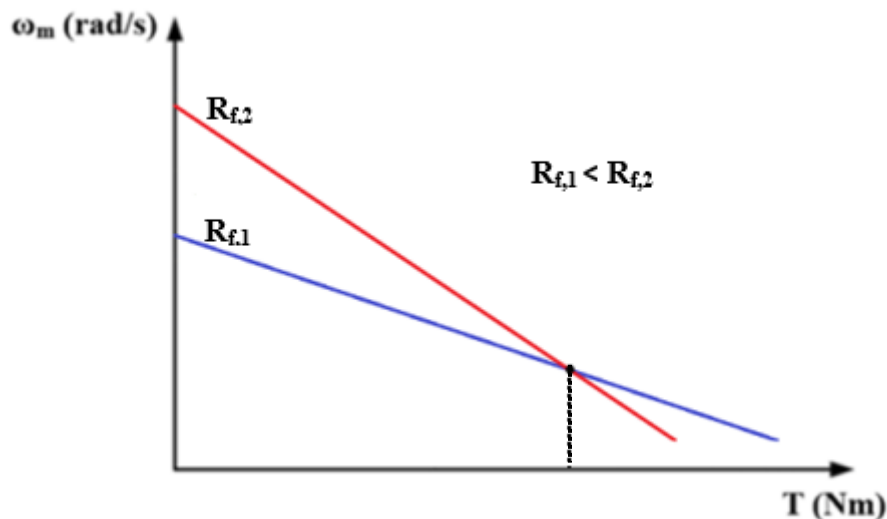
$$K = \frac{K_f}{K_m} \quad \#(3.14)$$

Από το συνδυασμό των παραπάνω σχέσεων, η (3.8) παίρνει τη μορφή:

$$\omega_m = \frac{V_a}{K_f \cdot I_f} - \frac{R_a}{(K_f \cdot I_f)^2} \cdot T \quad \#(3.15)$$

όπου σύμφωνα με αυτή, για σταθερή τάση και αντίσταση στο τύλιγμα του τυμπάνου, η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα του ρεύματος διεγέρσεως. Η αύξηση της ωμικής αντίστασης στο τύλιγμα της διέγερσης με τη παρεμβολή της εξωτερικής αντίστασης, επιδρά στην ελάττωση του ρεύματος στο πεδίο του κινητήρα και επομένως στην παραγόμενη μαγνητική ροή. Συνέπεια αυτού είναι η μείωση της επαγόμενης ΑΗΕΔ και η ταυτόχρονη αύξηση του ρεύματος στον οπλισμό. Όμως, η συγκεκριμένη αύξηση του ρεύματος είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση της μαγνητικής ροής και επομένως η επαγόμενη ροπή συνολικά αυξάνεται, ξεπερνώντας τη ροπή του φορτίου. Τότε, ο κινητήρας επιταχύνει και περιστρέφεται ταχύτερα από πριν, γεγονός που συμβάλει στη αύξηση της ΑΗΕΔ και τη μείωση του ρεύματος στον οπλισμό του, μέχρι που η παραγόμενη ροπή εξισώνεται με εκείνη του φορτίου, σε μια ταχύτητα περιστροφής μεγαλύτερη από την αρχική.

Από τη σχέση (3.14) φαίνεται ότι η γωνιακή ταχύτητα στην εν κενό λειτουργία είναι αντιστρόφως ανάλογη του ρεύματος διέγερσης και η κλίση της χαρακτηριστικής φορτίου αντιστρόφως ανάλογη του τετράγωνου του ρεύματος διέγερσης. Έτσι, η ελάττωση του ρεύματος διέγερσης με τη παρεμβολή της εξωτερικής αντίστασης, έχει σαν αποτέλεσμα την μετατόπιση των χαρακτηριστικών φορτίου προς τα πάνω αλλά και την ταυτόχρονη αύξηση της κλίσης τους. Στην εικόνα 3.5 φαίνεται ότι, η αύξηση της πρόσθετης αντίστασης προκαλεί την αύξηση της ταχύτητας στις υψηλές στροφές, όπως αναφέρεται παραπάνω, όμως στην περιοχή των χαμηλών στροφών προκαλεί περεταίρω μείωση της ταχύτητας. Αυτό συμβαίνει διότι, στις πολύ χαμηλές ταχύτητες, η μείωση της επαγόμενης ΑΗΕΔ προκαλεί αύξηση στο ρεύμα τυμπάνου, η οποία δεν είναι αρκετή ώστε να αντισταθμίσει τη μεταβολή της ροπής που οφείλεται στην εξασθένηση της μαγνητικής ροής.

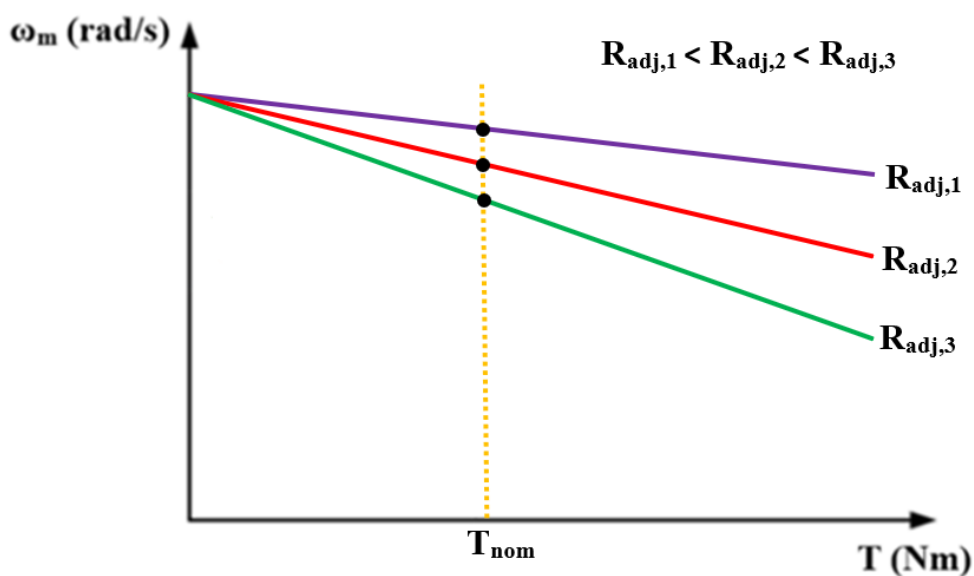


Εικόνα 3.5: Επίδραση της μεταβολής του ρεύματος διέγερσης σε όλο το φάσμα στροφών της χαρακτηριστικής φορτίου.

Ο έλεγχος των στροφών με παρεμβολή εξωτερικής ωμικής αντίστασης σε σειρά με το τυλίγμα διέγερσης, αξιοποιείται για την ελάττωση του ρεύματος διέγερσης που συνοδεύεται από αύξηση της ταχύτητας, επιτυγχάνοντας ταχύτητες μεγαλύτερες από την ονομαστική, η οποία επιτυγχάνεται όταν το ρεύμα διέγερσης παίρνει τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή του. Περαιτέρω αύξηση του I_f θα προκαλέσει προβλήματα υπερθέρμανσης και πιθανή καταστροφή του τυλίγματος διέγερσης.

3.3.3 Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής με μεταβολή της αντίστασης τυμπάνου (R_a)

Για τον έλεγχο τη ταχύτητας από την αντίσταση τυμπάνου, παρεμβάλλεται σε σειρά με τύλιγμα του οπλισμού μία μεταβλητή αντίσταση R_{adj} , ώστε να ελέγχεται η συνολική αντίσταση του τυλίγματος, ενώ η τάση στον οπλισμό και το ρεύμα στο πεδίο παραμένουν σταθερά. Από τη σχέση (3.8) φαίνεται ότι η μεταβολή της αντίστασης τυμπάνου επηρεάζει μόνο την κλήση της χαρακτηριστικής φορτίου, αφήνοντας ανεπηρέαστη τη ταχύτητα του κινητήρα στην εν κενό λειτουργία. Στην εικόνα 3.5 φαίνεται ότι, η αύξηση της πρόσθετης αντίστασης ενισχύει την κλήση της χαρακτηριστικής φορτίου και επομένως η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται, όταν λειτουργεί υπό φορτίο. (Μαλατέστας, 2019)

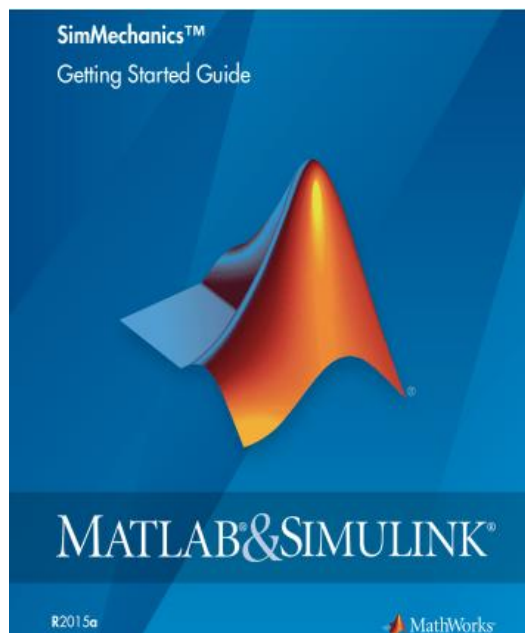


Εικόνα 3.6: Επίδραση της παρεμβολής εξωτερικής αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου.

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται σπάνια, διότι αποτελεί μια μέθοδο ελέγχου της ταχύτητας με αρκετά υψηλό κόστος, καθώς εμφανίζει μεγάλες απώλειες χαλκού στην αντίσταση ρύθμισης λόγω του υψηλού ρεύματος που ρέει το κύκλωμα του οπλισμού. Ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι η ανικανότητα ελέγχου του κινητήρα όταν εκείνος εργάζεται χωρίς φορτίο. Η μέθοδος αυτή, συνήθως χρησιμοποιείται για μικρά χρονικά διαστήματα, κατά την διαδικασία εκκίνησης με σκοπό τον περιορισμό του ρεύματος οπλισμού ή σε περιπτώσεις όπου ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός εναλλακτικού τρόπου ελέγχου της ταχύτητας, είναι οικονομικά ασύμφορος. (S. J. Chapman, 2019)

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MATLAB

4.1 Εισαγωγή στα Matlab και Simulink



Εικόνα 4.1: Λογισμικό Matlab & Simulink.

Το όνομα του λογισμικού **Matlab** είναι σύνθετη λέξη και προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Matrix και Laboratory. Πρόκειται για ένα διαδραστικό λογισμικό, ικανό να εκτελεί αριθμητικούς υπολογισμούς, αλλά και να κατασκευάζει κάθε είδους γραφήματα. Επιπλέον, παρέχει την δυνατότητα προγραμματισμού στις γλώσσες C και C++, δίνοντας του ισχυρό πλεονέκτημα έναντι όμοιων λογισμικών. Είναι ειδικά σχεδιασμένο για υπολογισμούς με πίνακες, όπως επίλυση γραμμικών συστημάτων, εύρεση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων κλπ., καθώς επίσης παρέχεται η δυνατότητα επίλυσης μη γραμμικών συστημάτων και προβλημάτων με διαφορικές εξισώσεις.

Το λογισμικό **Simulink** είναι επέκταση του ίδιου λογισμικού Matlab. Σε αυτό παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης και μοντελοποίησης κάθε είδους συστήματος (φυσικό, μηχανικό, ηλεκτρικό κ.ά.). Χαρακτηρίζεται από το εύκολο γραφικό περιβάλλον που διαθέτει, καθιστώντας το εύκολο στη χρήση και ικανό να χρησιμοποιηθεί από κάποιον ο οποίος δεν είναι απαραίτητα γνώστης του λογισμικού Matlab. Επάνω σε αυτό το λογισμικό (Simulink) θα γίνει η μοντελοποίηση και η μελέτη της λειτουργίας του κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης.

4.2 Περιγραφή της μελέτης

Για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως ήδη προαναφέρθηκε, απαιτείται η χρήση του λογισμικού Simulink. Σε αυτό, πραγματοποιείται η μοντελοποίηση και η προσομοίωση ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση. Αρχικά, γίνεται η σχεδίαση του μοντέλου σε περιβάλλον Simulink. Στην συνέχεια, προσομοιώνεται το μοντέλο και εξάγονται οι γραφικές ταχύτητας, ροπής, ρεύματος πεδίου και οπλισμού συναρτήσεως του χρόνου, καθώς και η χαρακτηριστική ροπής - στροφών του κινητήρα. Τέλος, πραγματοποιείται έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα με μεταβολή της τάσης στον οπλισμό του και μελετάται πως επηρεάζονται οι παραπάνω γραφικές.

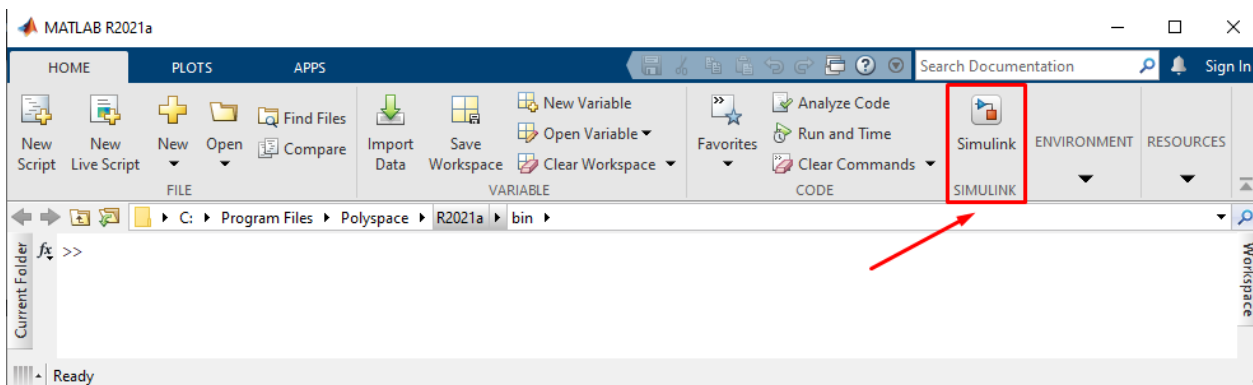
Ο κινητήρας που επιλέχθηκε για την υλοποίηση του μοντέλου έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 1

DC Κινητήρας ξένης διέγερσης	
Ονομαστική ισχύς:	5 HP
Ονομαστική τάση:	240 V
Ονομαστική ταχύτητα:	1750 rpm
Τάση διεγέρσεως:	300 V
Αντίσταση οπλισμού:	2,581 Ω
Αυτεπαγωγή οπλισμού:	0,028 Ω
Αντίσταση πεδίου:	281,2 Ω
Αυτεπαγωγή πεδίου:	156 Ω

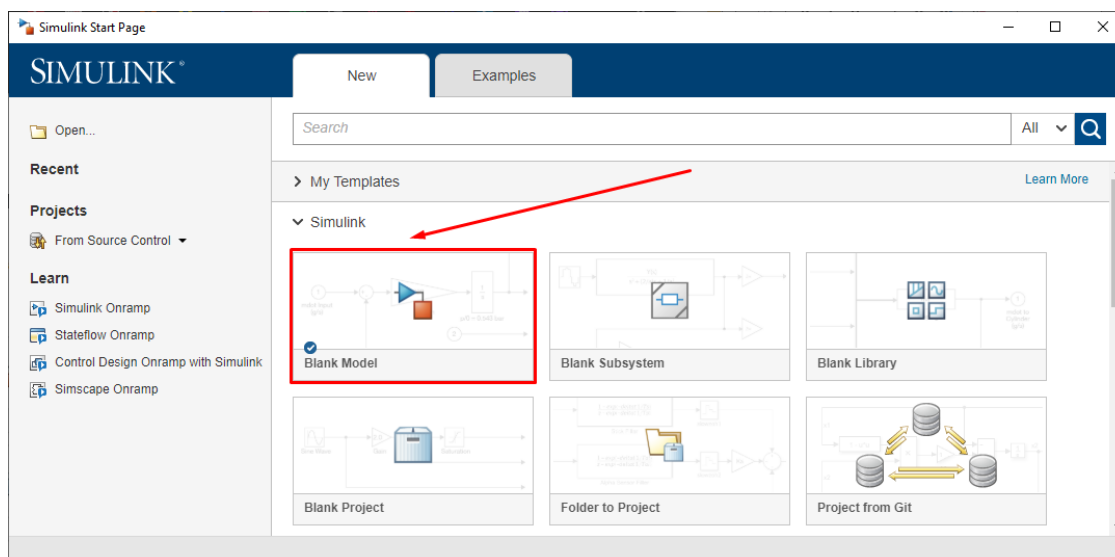
4.3 Επεξήγηση του λογισμικού Simulink

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την σχεδίαση του μοντέλου θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό Simulink το οποίο έχει ως πυρήνα το περιβάλλον του λογισμικού Matlab. Για να εισέλθει ο χρήστης στο περιβάλλον του Simulink θα πρέπει, είτε να πληκτρολογήσει στην γραμμή εντολών του Matlab την εντολή “Simulink”, είτε να επιλέξει το αντίστοιχο εικονίδιο (εικόνα 4.2) που βρίσκεται στην γραμμή εργαλείων του Matlab.



Εικόνα 4.2: Επιλογή του εικονιδίου “Simulink”.

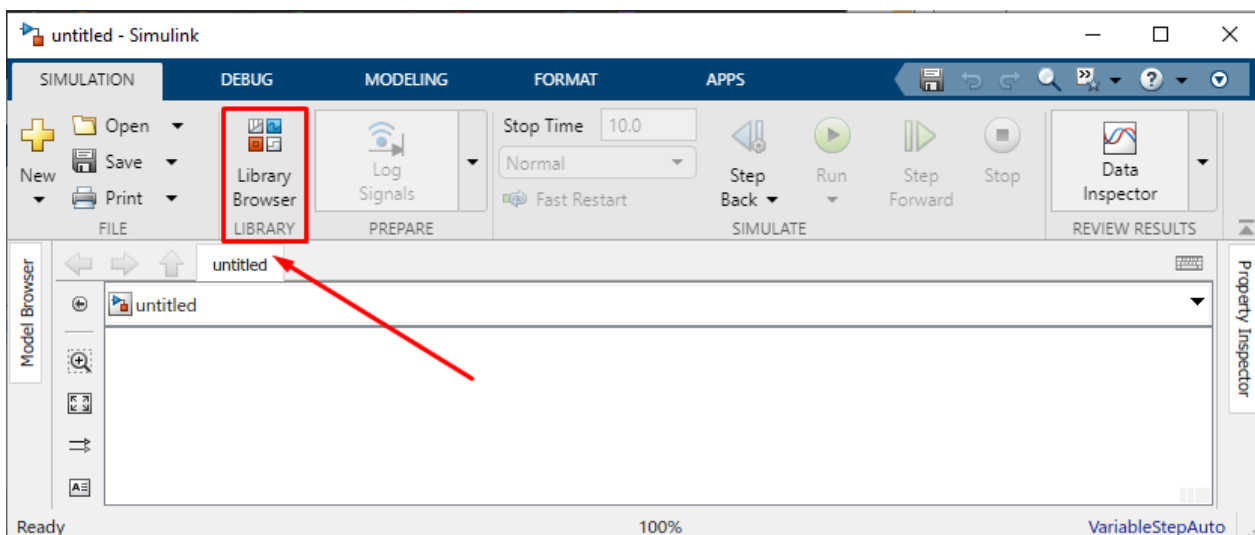
Στο επόμενο παράθυρο που εμφανίζεται, ο χρήστης καλείται να επιλέξει το αντικείμενο με το οποίο θα ασχοληθεί. Το λογισμικό δίνει την δυνατότητα σχεδίασης κάποιου μοντέλου, project, βιβλιοθήκης κ.ά. Επιλέγοντας το εικονίδιο “Blank Model” (εικόνα 4.3), γίνεται η εκκίνηση του Simulink και ανοίγει η επιφάνεια εργασίας του, πάνω στην οποία ο χρήστης μπορεί να τοποθετήσει τα διαφορά μπλοκ, ώστε να σχεδιάσει το μοντέλο που επιθυμεί.



Εικόνα 4.3: Επιλογή του εικονιδίου “Blank Model”.

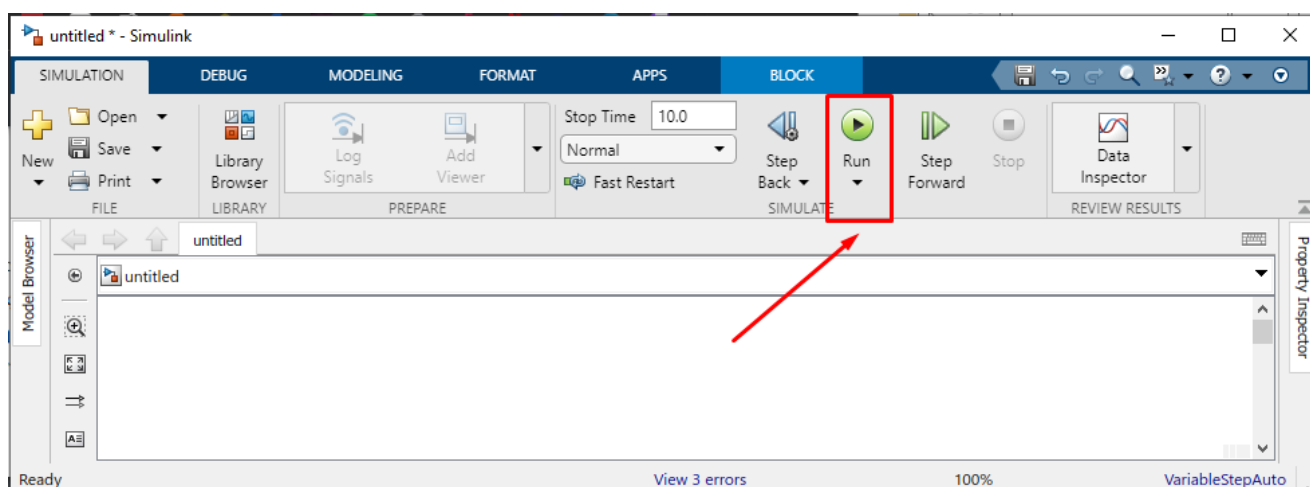
Το Simulink διαθέτει έτοιμες βιβλιοθήκες οι οποίες αποτελούνται από διάφορα σύνολα γραφικών μπλοκ, τα οποία βρίσκονται κατάλληλα ταξινομημένα σε κατηγορίες, με τον τίτλο τους να περιγράφει τον σκοπό και την ειδίκευση τους. Η ενεργοποίηση της, μπορεί να γίνει πολύ εύκολα

επιλέγοντας το εικονίδιο “Library Browser” (εικόνα 4.4), ενώ μέσα σε αυτή παρέχεται η δυνατότητα γρήγορης αναζήτησης του μπλοκ που επιθυμεί ο χρήσης.



Εικόνα 4.4: Επιλογή του εικονιδίου “Library Browser”.

Ο χρήστης αφού εντοπίσει το μπλοκ που επιθυμεί, μπορεί να το τοποθετήσει στην επιφάνεια εργασίας του Simulink σέρνοντας το από την βιβλιοθήκη, επάνω σε αυτήν. Όταν ολοκληρώσει τη σχεδίαση του μοντέλου, μπορεί να εκκινήσει την προσομοίωση επιλέγοντας το εικονίδιο “Run” (εικόνα 4.5) που βρίσκεται στην γραμμή εργαλείων του Simulink και να λάβει τα αποτελέσματα στο επόμενο παράθυρο που θα εμφανιστεί.



Εικόνα 4.5: Επιλογή του εικονιδίου “Run”.

4.4 Ανάλυση των μπλοκ που απαρτίζουν το μοντέλο του κινητήρα.

Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο σχεδιασμός του μοντέλου, είναι απαραίτητο να έχει προηγηθεί η κατανόηση της λειτουργίας αλλά και η χρησιμότητα των μπλοκ που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου. Όλα τα μπλοκ που απαιτούνται για την κατασκευή του μοντέλου βρίσκονται στις βιβλιοθήκες “Simulink” και “Simscape Electrical”. Παρακάτω αναλύεται το κάθε μπλοκ ξεχωριστά.

4.4.1 Powergui

Απαραίτητη προϋπόθεση για να λειτουργήσει οποιοδήποτε μοντέλο έχει σχεδιαστεί με διάφορα μπλοκ από την βιβλιοθήκη “Simscape Electrical”, αποτελεί η εισαγωγή του μπλοκ *Powergui* στο μοντέλο που σχεδιάζεται. Το μπλοκ αυτό, παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον που επιτρέπει τη ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου, αλλά και την εύκολη εκτέλεση πολύπλοκων αναλύσεων και λειτουργιών όταν εκείνες απαιτούνται (π.χ. Fourier, Laplace).

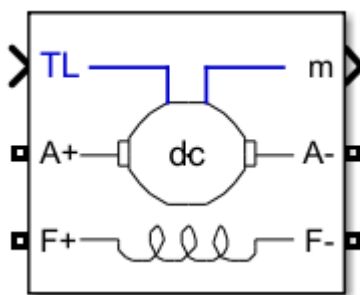


Εικόνα 4.6: Powergui

4.4.2 DC Machine

Πρόκειται για το βασικότερο μπλοκ που απαιτείται για την μοντελοποίηση του κινητήρα και είναι το μπλοκ μηχανής συνεχούς ρεύματος (*DC Machine*). Δίνει την δυνατότητα λειτουργίας του, είτε σαν μηχανή με μόνιμους μαγνήτες, είτε σαν μηχανή με τύλιγμα διέγερσης. Επιπλέον, μπορεί να καθοριστεί η λειτουργία του, είτε σαν κινητήρας, είτε σαν γεννήτρια. Ο ακροδέκτης εισόδου είναι αυτός που καθορίζει το είδος λειτουργίας της μηχανής (κινητήρας ή γεννήτρια). Αν στην είσοδο εφαρμοστεί η ροπή του φορτίου (TL), το μπλοκ θα λειτουργήσει ως κινητήρας, ενώ αν εφαρμοστεί ταχύτητα θα λειτουργήσει σαν γεννήτρια. Επιλέγοντας το μπλοκ με διπλό κλικ, δίνεται πρόσβαση στις ρυθμίσεις των παραμέτρων της μηχανής καθώς επίσης και σε έτοιμα προκαθορισμένα μοντέλα

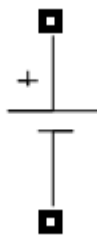
μηχανής. Ο ακροδέκτης m του μπλοκ είναι η έξοδος του και είναι τύπου bus. Από εκεί λαμβάνονται τα μετρούμενα μεγέθη της μηχανής τα οποία είναι τα ρεύματα πεδίου και οπλισμού της, η γωνιακή ταχύτητα και η ροπή της. Τέλος, το μπλοκ διαθέτει άλλους τέσσερις ακροδέκτες που αφορούν τα τυλίγματα του. Πιο συγκεκριμένα, οι ακροδέκτες $F+$ και $F-$ αντιστοιχούν στο τύλιγμα του πεδίου, το οποίο ανάλογα με τη σύνδεσή του καθορίζει και το είδος διέγερσης της μηχανής. Αντίθετα, οι ακροδέκτες $A+$ και $A-$ αντιστοιχούν στο τύλιγμα οπλισμού της. Κάθε ένα από αυτά, αποτελείται από μία αυτεπαγωγή L_a και μια ωμική αντίσταση R_a σε σειρά, ώστε να εμφανίζει τα χαρακτηριστικά ενός πραγματικού τυλίγματος.



Εικόνα 4.7: DC Machine.

4.4.3 DC Voltage Source

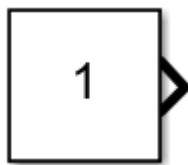
Το μπλοκ “*DC Voltage Source*” αντιστοιχεί σε μία πηγή τάσης, συνεχούς ρεύματος και αντιπροσωπεύει μια ιδανική πηγή τάσης που είναι αρκετά ισχυρή, ώστε να διατηρεί την καθορισμένη τάση στους ακροδέκτες της, ανεξάρτητα από το ρεύμα που τη διαρρέει. Διαθέτει δύο ακροδέκτες (+) και (-), οι οποίοι αντιστοιχούν στον θετικό και αρνητικό πόλο της πηγής συνεχούς τάσης. Το ρεύμα είναι θετικό εάν ρέει από θετικό σε αρνητικό πόλο, ενώ η τάση στην πηγή μπορεί να ρυθμιστεί επιλέγοντας την με διπλό κλικ και ρυθμίζοντας την επιθυμητή τιμή στο παράθυρο παραμέτρων που εμφανίζεται.



Εικόνα 4.8: DC Voltage Source

4.4.4 Constant

Αυτό το μπλοκ χρησιμοποιείται για παρέχει μια πραγματική ή πολύπλοκη σταθερή είσοδο σήματος σε άλλα μπλοκ. Έχει την ικανότητα να δημιουργεί βαθμωτή, διανυσματική ή ακόμη και μήτρα έξοδο, με την τιμή της να παραμένει αμετάβλητη καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Η τιμή εξόδου του *Constant* αλλά και το είδος της, καθορίζεται από παράθυρο παραμέτρων του μπλοκ το οποίο εμφανίζεται αφότου έχει επιλεγεί με διπλό κλικ.



Εικόνα 4.9: Constant

4.4.5 Bus Selector

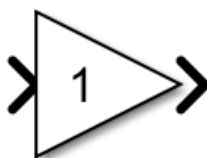
Το μπλοκ αυτό παρέχει την δυνατότητα στο χρήστη να εξάγει από το δίαυλο (bus) εξόδου κάπου άλλου μπλοκ συγκεκριμένα στοιχεία, ώστε να τα μελετήσει χωριστά. Όταν το μπλοκ εξάγει ξεχωριστά τα επιλεγμένα στοιχεία, κάθε στοιχείο αντιστοιχίζεται σε μια θύρα εξόδου του Bus Selector. Μέσα από το παράθυρο παραμέτρων του, ο χρήστης μπορεί να δει όλα τα διαθέσιμα στοιχεία που παρέχει ο δίαυλος που συνδέεται στην είσοδο του *Bus Selector* και να επιλέξει τα στοιχεία που θέλει να διαχωρήσει από αυτόν.



Εικόνα 4.10: Bus Selector

4.4.6 Gain

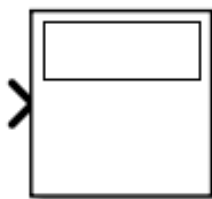
Πρόκειται για έναν ενισχυτή σήματος. Πολλαπλασιάζει το σήμα εισόδου του με ένα κέρδος το οποίο μπορεί να είναι, είτε βαθμωτό, είτε διάνυσμα, είτε πίνακας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση του σήματος που λαμβάνει στην είσοδο του, αλλά και για την μετατροπή σε κάποιο άλλο. Το κέρδος ενίσχυσης μπορεί να καθοριστεί από τις παραμέτρους του μπλοκ σύμφωνα με τις προτιμήσεις του χρήστη.



Εικόνα 4.11: Gain

4.4.7 Display

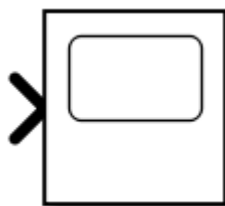
Χρησιμοποιείται για την αριθμητική απεικόνιση των δεδομένων εισόδου που λαμβάνει. Μέσα από τους παραμέτρους του μπλοκ μπορεί να επιλεγθεί ο τύπος και μορφή εμφάνισης των δεδομένων, καθώς και η ακρίβεια σε δεκαδικά ψηφία.



Εικόνα 4.12: Display

4.4.8 Scope

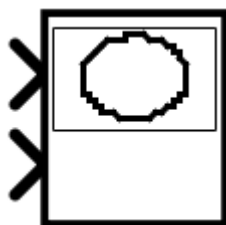
Πρόκειται για ένα εργαλείο που λειτουργεί σαν απεικονιστικό όργανο (παλμογράφος), το οποίο επιτρέπει την γραφική αναπαράσταση των σημάτων που λαμβάνει συναρτήσει του χρόνου. Από το παράθυρο παραμέτρων του *Scope* μπορεί να καθοριστεί το πλήθος των εισόδων του, να ρυθμιστεί διαφορετικός χρωματισμός στην περίπτωση που υπάρχουν πολλαπλά σήματα εισόδου, καθώς και να ρυθμιστεί η βαθμονόμηση των αξόνων.



Εικόνα 4.13: Scope

4.4.9 XY Graph

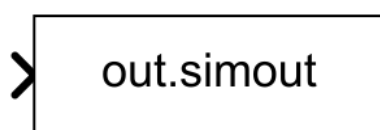
Είναι και αυτό ένα απεικονιστικό εργαλείο και η διαφορά του από το *Scope* είναι ότι μπορεί να απεικονίσει δύο σήματα σε μια γραφική παράσταση XY. Διαθέτει δύο ακροδέκτες εισόδου με τον πρώτο να παρέχει τα δεδομένα x για το διάγραμμα XY και τον δεύτερο τα δεδομένα y . Μέσα από το παράθυρο παραμέτρων του, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την βαθμονόμηση των αξόνων που επιθυμεί και να μορφοποιήσει το γράφημα όπως επιθυμεί.



Εικόνα 4.14: XY Graph

4.4.10 To Workspace

Πρόκειται για ένα εργαλείο που καταγράφει τα δεδομένα που συνδέονται στον ακροδέκτη εισόδου του και τα αποθηκεύει σε ένα χώρο εργασίας στο Matlab, αντιστοιχίζοντας τα με μία μεταβλητή. Χρησιμοποιείται συνήθως σαν βοηθητικό μπλοκ του *XY Graph*, ώστε να αποθηκεύσει δεδομένα από πολλές προσημειώσεις, ώστε στη συνέχεια να αναπαρασταθούν σε κοινούς άξονες. Μέσα από τις παραμέτρους, ο χρήστης μπορεί να ορίσει το όνομα της μεταβλητής που αποθηκεύονται τα δεδομένα και να επιλέξει τον τύπο δεδομένων της.



Εικόνα 4.15: To Workspace.

4.5 Σχεδίαση του μοντέλου

Το βασικότερο μπλοκ που απαιτείται για την μοντελοποίηση του κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης είναι το *DC Machine*, το οποίο προσομοιώνει την λειτουργία μηχανής συνεχούς ρεύματος. Από το παράθυρο παραμέτρων του, επιλέγεται το πρώτο προκαθορισμένο μοντέλο μηχανής, το οποίο έχει τα χαρακτηριστικά του πίνακα 4.1. Ως είσοδος επιλέγεται ροπή, ώστε η μηχανή να λειτουργήσει σαν κινητήρας και το πεδίο της ρυθμίζεται κατάλληλα, ώστε να περιλαμβάνει τύλιγμα διέγερσης.

Επιπλέον, τα τυλίγματα οπλισμού και πεδίου θα πρέπει τροφοδοτηθούν εξωτερικά με πηγές συνεχούς τάσης, καθώς αυτό δεν γίνεται αυτοματοποιημένα μέσα από το παράθυρο παραμέτρων του *DC Machine*. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ανάγκη σύνδεσης καθένα από τα τυλίγματα οπλισμού και πεδίου με ένα μπλοκ *DC Voltage Source* τιμής 240V και 300V αντίστοιχα.

Για να αποδώσει το μοντέλο του κινητήρα την ισχύ των 5 HP, θα πρέπει να λάβει την απαιτούμενη ροπή φορτίου (T_L) στη είσοδο του. Έτσι, μετατρέπεται η αποδιδόμενη ισχύς του κινητήρα σε Watt (W) και έπειτα υπολογίζεται η απαιτούμενη ροπή του φορτίου που πρέπει να λάβει στην είσοδο του *DC Machine*.

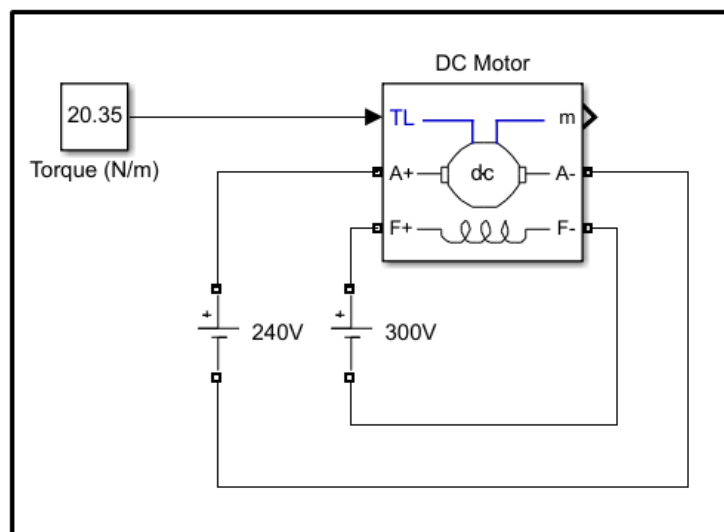
$$P_m = P_{nom} \cdot \frac{746 W}{HP} = 5 HP \cdot \frac{746 W}{HP} = 3730 W \#(4.1)$$

$$T_L = \frac{P_m}{\frac{2\pi \cdot n}{60}} = \frac{3730 W}{\frac{2\pi \cdot 1750 rpm}{60}} = 20,35 \frac{N}{m} \#(4.2)$$

όπου:

- P_m είναι η ονομαστική ισχύς του κινητήρα, σε (W),
- P_{nom} είναι η ονομαστική ισχύς του κινητήρα, σε (HP),
- n είναι η ονομαστικές στροφές του κινητήρα σε (rpm).
- T_L είναι η απαιτούμενη ροπή φορτίου στην είσοδο του *DC Machine*, σε (N/m),

Για να ολοκληρωθεί το τμήμα του μοντέλου που αντιστοιχεί στο κινητήρα, χρειάζεται να εισαχθεί στην είσοδο του η ροπή φορτίου που υπολογίστηκε παραπάνω. Αυτό γίνεται συνδέοντας στην είσοδο του *DC Machine* το μπλοκ *Constant* και ρυθμίζοντας το από το παράθυρο παραμέτρων του στην επιθυμητή τιμή. Η μορφή που έχει το τμήμα του μοντέλου που περιγράφεται παραπάνω, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.16.



Εικόνα 4.16: Τμήμα του μοντέλου που αφορά το κομμάτι του κινητήρα Σ.Ρ. ξένης διέγερσης

Επειδή η έξοδος του *DC Machine* είναι τύπου bus, είναι απαραίτητο να διαχωριστούν από αυτή, η ταχύτητα, η ροπή και τα ρεύματα οπλισμού και πεδίου του κινητήρα, προκειμένου να είναι εφικτή η

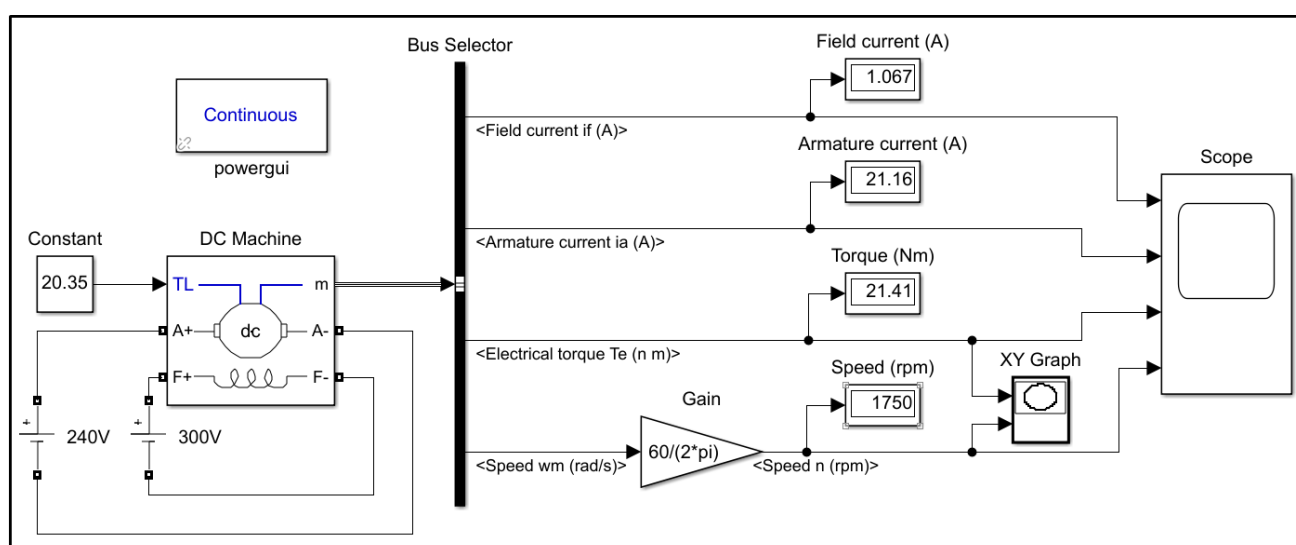
κατασκευή των απαιτούμενων γραφικών. Αυτό γίνεται παρεμβάλλοντας στην έξοδο του, ένα *Bus Selector* και μέσα από το παράθυρο παραμέτρων του, επιλέγονται τα στοιχεία που χρειάζεται να απομονωθούν από την έξοδο bus του *DC Machine*.

Στη συνέχεια, επειδή η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα στην έξοδο του *DC Machine* δίνεται σε $\left(\frac{rad}{sec}\right)$, για λόγους ευκολίας μετατρέπεται σε (rpm). Από τη σχέση (3.5) προκύπτει ότι συντελεστής μετατροπής είναι $\left(\frac{60}{2\pi}\right)$. Για να γίνει αυτό, παρεμβάλλεται το μπλοκ *Gain* στην αντίστοιχη έξοδο του *Bus Selector* και ρυθμίζεται η ενίσχυση του στην αντίστοιχη ποσότητα.

Έπειτα, στους ακροδέκτες εξόδου του *Bus Selector* που δίνονται η ροπή, τα ρεύματα πεδίου και οπλισμού, αλλά και στον ακροδέκτη εξόδου του *Gain* που μετατρέπεται η ταχύτητα σε rpm, τοποθετείται από ένα μπλοκ *Display* για την αριθμητική αναπαράσταση των μεγεθών, ενώ όλοι οι ακροδέκτες συνδέονται σε ένα *Scope* για την γραφική αναπαράστασή τους σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Τέλος, η έξοδος του *Bus Selector* που αντιστοιχεί στη ροπή και έξοδος του *Gain* που μετατρέπει την ταχύτητα σε (rpm), συνδέονται σε ένα *XY Graph* μπλοκ, στους ακροδέκτες x και y, αντίστοιχα.

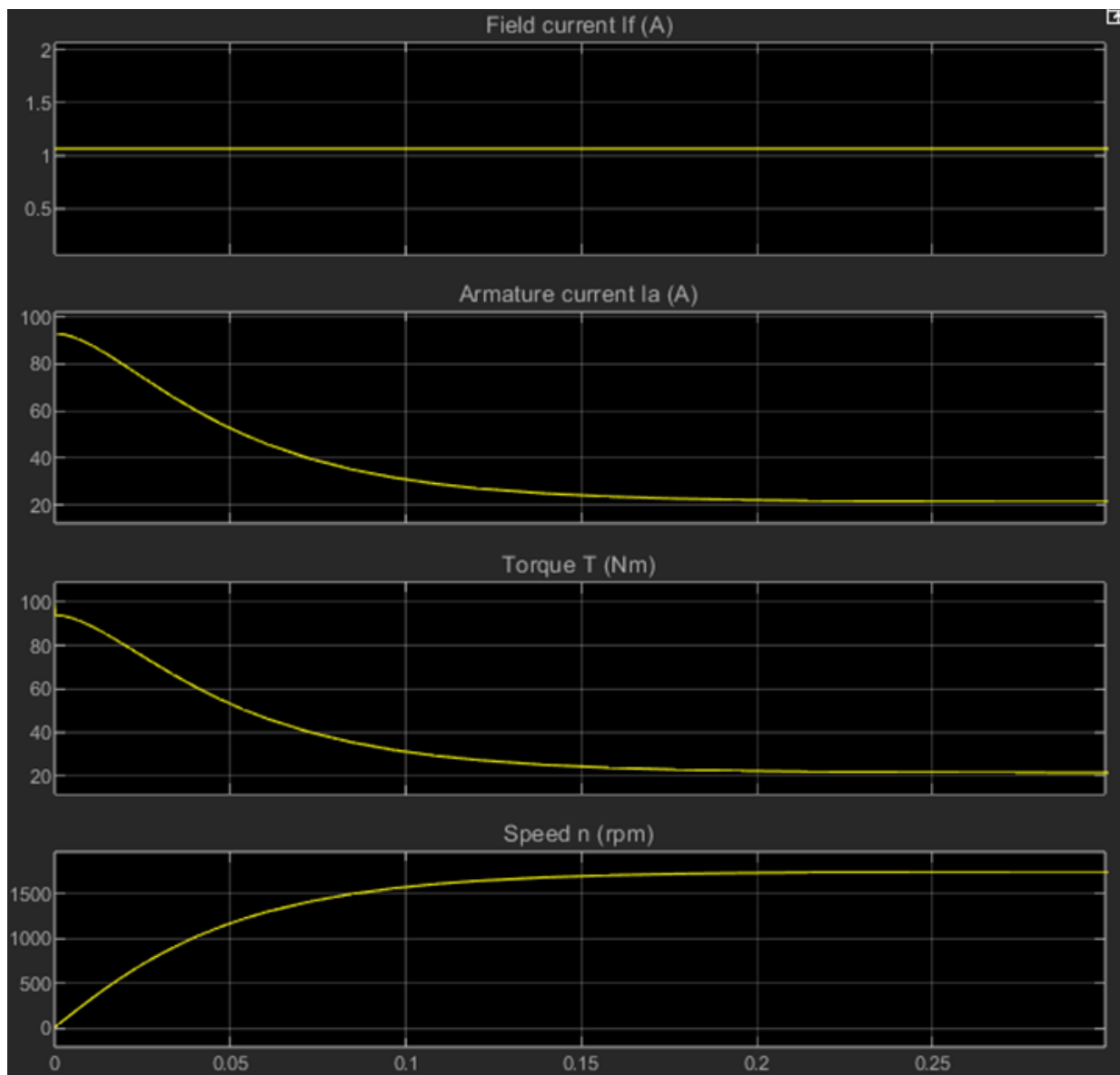
Το συνολικό μοντέλο που περιγράφεται παραπάνω και αντιστοιχεί σε κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.17.



Εικόνα 4.17: Μοντέλο κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση.

4.6 Σχεδίαση και μελέτη των χαρακτηριστικών

Αφού έχει σχεδιαστεί το μοντέλο της εικόνας 4.17, επιλέγεται το εργαλείο “Run” από την γραμμή εργαλείων του Simulink προκειμένου να εκκινήσει η προσημείωση του μοντέλου. Όταν αυτή ολοκληρωθεί, εμφανίζονται τα ονομαστικά μεγέθη της ταχύτητας, της ροπής και των ρευμάτων οπλισμού και πεδίου του κινητήρα στα αντίστοιχα στα μπλοκ *Display*, ενώ με την επιλογή του μπλοκ *Scope* εξάγονται οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές σε συνάρτηση με το χρόνο λειτουργίας του κινητήρα, οι οποίες παρουσιάζονται στην εικόνα 4.18.



Εικόνα 4.18: Χαρακτηριστικές ροπής, ταχύτητας, ρευμάτων οπλισμού και πεδίου σε συνάρτηση με το χρόνο.

Παρατηρείται ότι καθόλη την λειτουργία του κινητήρα, το ρεύμα πεδίου παραμένει σταθερό, καθώς το τύλιγμα πεδίου είναι ανεξάρτητο από εκείνο του οπλισμού και δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές που συμβαίνουν σε αυτό.

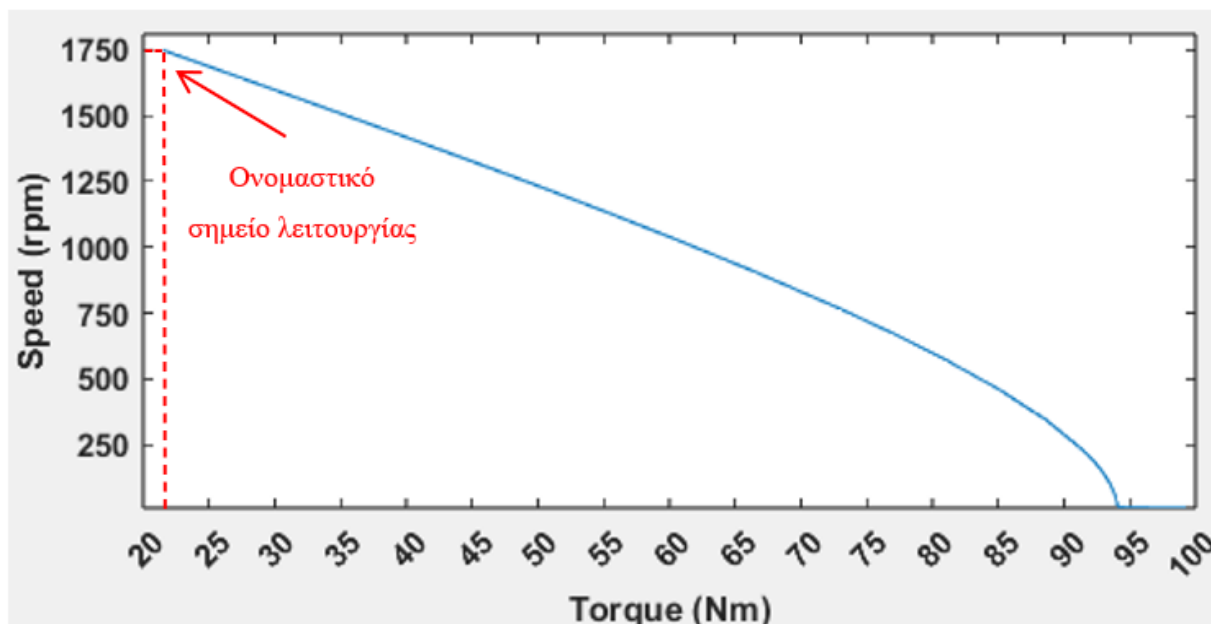
Αντίθετα, μεταβολή παρατηρείται στο ρεύμα οπλισμού το οποίο επηρεάζει άμεσα την ταχύτητα και τη ροπή του κινητήρα. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την εκκίνηση του κινητήρα ($n = 0$), η αναπτυσσόμενη ΑΗΕΔ είναι μηδενική ($E_a = 0$). Καθώς ο κινητήρας επιταχύνει, προκαλείται αύξηση της E_a , η οποία είναι ανάλογη της αύξησης της ταχύτητας (σχέση 3.4). Αποτέλεσμα της αυξανόμενης E_a είναι η ένταση ρεύματος στο τύλιγμα τυμπάνου να μειώνεται (σχέση 2.5) και επομένως να αυξάνεται η ροπή (σχέση 3.6) κατά την εκκίνηση. Έτσι λοιπόν φαίνεται ότι ο κινητήρας εκκινεί με υψηλό ρεύμα οπλισμού ($I_{a, εκ} = 93A$) το οποίο προκαλεί τη μεγάλη ροπή εκκίνησης ($T_{εκ} = 94 Nm$) και καθώς επιταχύνει πλησιάζοντας την ονομαστική του ταχύτητα ($n_{nom} = 1750 rpm$), η αυξανόμενη E_a που αναπτύσσεται, προκαλεί την ελάττωση του ρεύματος οπλισμού και της ροπής στις ονομαστικές τους τιμές. Έτσι λοιπόν ο κινητήρας στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στο πίνακα 2.

Πίνακας 2

Ονομαστικό σημείο λειτουργίας	
Ρεύμα πεδίου:	1,067 A
Ρεύμα οπλισμού:	21,16 A
Ροπή:	21,41 Nm
Ταχύτητα:	1750 rpm

Στη συνέχεια, επιλέγοντας το μπλοκ XY Graph, εξάγεται η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα, η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα 4.19.

Σε αυτή, διακρίνεται το ονομαστικό σημείο λειτουργίας του κινητήρα. Για πολύ μικρά φορτία, τα οποία απαιτούν ροπή μικρότερη από την ονομαστική του, ο κινητήρας λειτουργεί με τα ονομαστικά του μεγέθη. Όταν υπάρξει αύξηση φορτίου και η ζητούμενη ροπή ξεπεράσει την ονομαστική του κινητήρα, η ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται θα αρχίσει να μειώνεται με αποτέλεσμα την αύξηση της ροπής του, λόγω όσων αναφέρθηκαν παραπάνω. Η περεταίρω αύξηση του φορτίου θα ακινητοποιήσει το κινητήρα, ενώ ταυτόχρονα θα αυξηθεί σημαντικά το ρεύμα τυμπάνου, με αποτέλεσμα να υπάρξει κίνδυνος καταστροφής του.

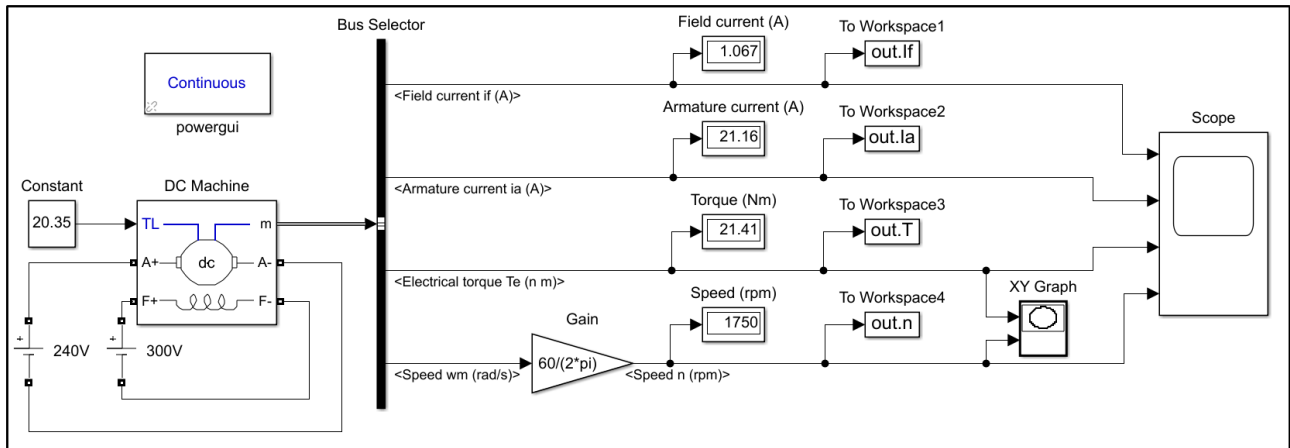


Εικόνα 4.19: Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας.

4.7 Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής με μεταβολή της τάσης οπλισμού (V_a)

Στη δεύτερη φάση της πειραματικής μελέτης, θα επιχειρηθεί ο έλεγχος των στροφών του κινητήρα με μεταβολή τους από μηδενική ταχύτητα έως και την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας, μεταβάλλοντας τη τάση στο τύλιγμα του τυμπάνου και θα εξεταστεί το πως επηρεάζονται οι χαρακτηριστικές του. Για να ερευνηθεί αυτό, προσημειώνεται κάθε φορά το μοντέλο για διάφορα επίπεδα τάσης, μεταβάλλοντας τη τάση στο *DC Voltage Source* που είναι συνδεδεμένο στα άκρα του οπλισμού του *DC Machine* και στη συνέχεια εξάγονται οι χαρακτηριστικές για κάθε επίπεδο τάσης σε κοινούς άξονες.

Για να γίνει η σχεδίαση των χαρακτηριστικών, είναι αναγκαίο να συνδεθεί σε κάθε έξοδο του *Bus Selector* από ένα μπλοκ *To Workspace*, ώστε να αποθηκεύονται τα δεδομένα που προκύπτουν από την προσομοίωση για κάθε επίπεδο τάσης και είναι εφικτή η ομαδοποίηση τους σε κοινούς άξονες. Έτσι το μοντέλο που σχεδιάστηκε προηγουμένως, παίρνει τη μορφή που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.20.



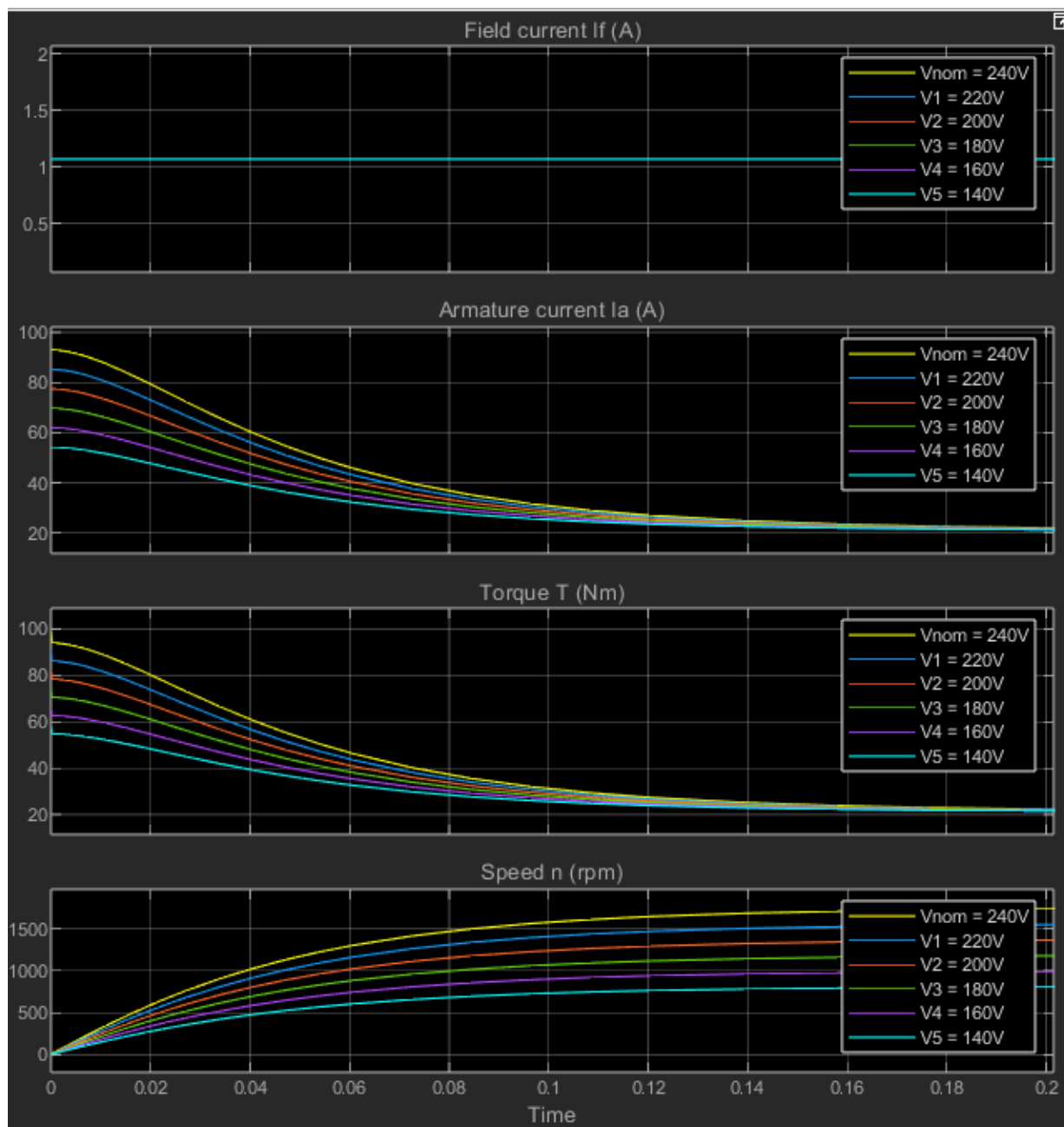
Εικόνα 4.20: Μοντέλο για την σχεδίαση γραφικών σε κοινούς άξονες.

Συγκεκριμένα επιλέγονται πέντε τάσεις δοκιμής οι οποίες παρουσιάζονται στο πίνακα 3.

Πίνακας 3

Τάσεις δοκιμής	
V_1	220 V
V_2	200 V
V_3	180 V
V_4	160 V
V_5	140 V

Όταν ολοκληρωθεί η προσομοίωση για κάθε επίπεδο τάσης, επιλέγεται το *Scope* και εξάγονται οι χαρακτηριστικές ρευμάτων πεδίου και οπλισμού, ροπής και ταχύτητας του κινητήρα συναντήσεως του χρόνου, οι οποίες παρουσιάζονται στην εικόνα 4.21.



Εικόνα 4.21: Χαρακτηριστικές του κινητήρα συναντήσει του χρόνου για διάφορα επίπεδα τάσης.

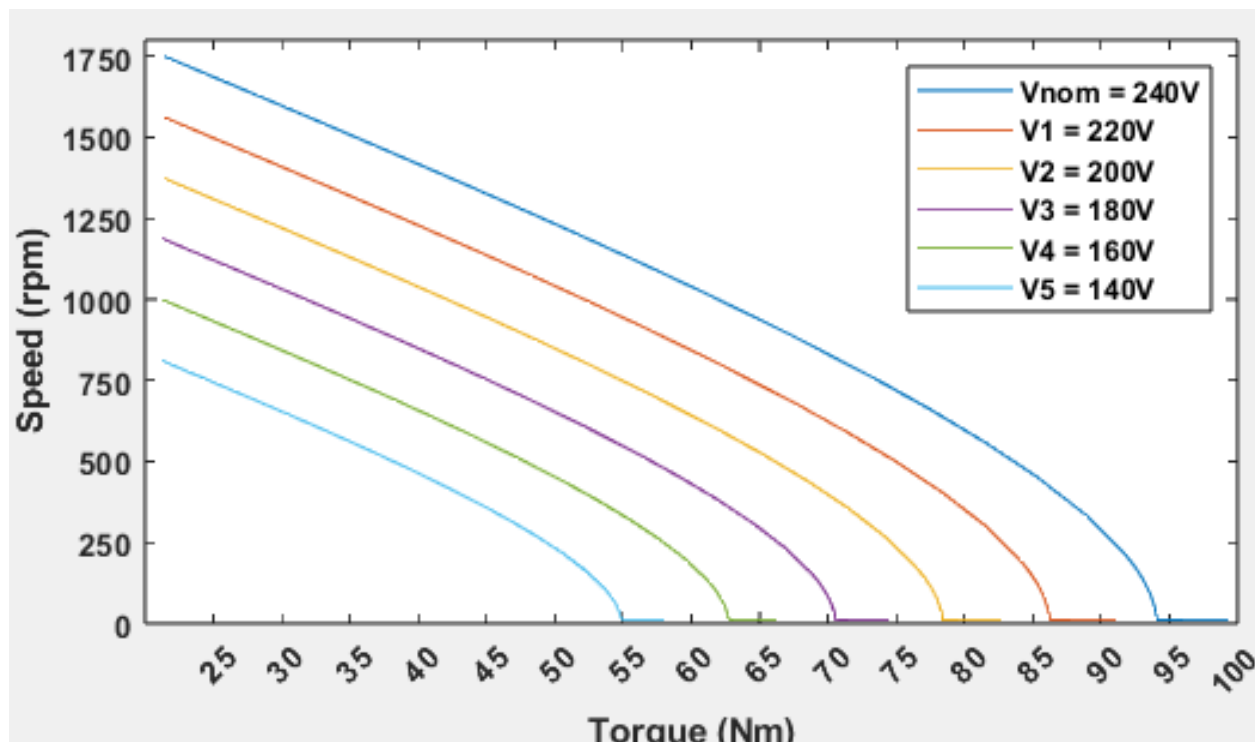
Όπως έχει αναφερθεί, στο κινητήρα ξένης διέγερσης, τα τυλίγματα οπλισμού και πεδίου είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Επομένως, η μεταβολή της τάσης στον οπλισμό δεν μπορεί να επηρεάσει το ρεύμα στο πεδίο. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί από τη χαρακτηριστική ρεύματος πεδίου συναρτήσει του χρόνου, στην εικόνα 4.21.

Αντίθετα, η μεταβολή της τάσης οπλισμού φαίνεται να επηρεάζει κατά την εκκίνηση του κινητήρα το ρεύμα οπλισμού και τη παραγόμενη ροπή, ενώ στη μόνιμη κατάσταση φαίνεται να επηρεάζεται μόνο η ταχύτητα του.

Αυτό συμβαίνει διότι, όταν ο κινητήρας τροφοδοτείται στον οπλισμό του με μια τάση μικρότερη από την ονομαστική του, κατά την εκκίνηση του προκαλείται ένα μικρότερο ρεύμα διαρροής στο τύλιγμα του τυμπάνου, και έτσι η επαγόμενη ροπή είναι μικρότερη της ονομαστικής ροπής φορτίου. Αποτέλεσμα αυτού είναι ο κινητήρας να επιβραδύνεται, με συνέπεια τη μείωση της E_a , στρέφοντας το ίδιο φορτίο με πριν. Το γεγονός αυτό αυξάνει το ρεύμα τυμπάνου με συνέπεια το περιορισμό της μείωσης της αναπτυσσομένης ροπής, μέχρι το σημείο που αυτή εξισώνεται με τη ροπή του φορτίου, σε μία ταχύτητα μικρότερη της ονομαστικής. Με αυτό τρόπο επιτυγχάνεται η μεταβολή της ταχύτητας του κινητήρα χωρίς να επηρεάζεται η ροπή του.

Το ρεύμα τυμπάνου και επομένως η παραγόμενη ροπή διατηρούνται σταθερά στις αντίστοιχες ονομαστικές τιμές τους, παρέχοντας την δυνατότητα λειτουργίας με ονομαστική ροπή σε όλο το εύρος ταχυτήτων, καθώς εάν υπήρχε εξάρτηση της ροπής από την ταχύτητα, ο κινητήρας δεν θα μπορούσε να οδηγήσει το ονομαστικό φορτίο με μειωμένες στροφές.

Στη συνέχεια, επιλέγεται το *XY Graph* και εξάγονται οι χαρακτηριστικές ροπής-στροφών για κάθε τάση δοκιμής σε κοινούς άξονες. Οι χαρακτηριστικές αυτές παρουσιάζονται στην εικόνα 4.22.



Εικόνα 4.22: Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας για διάφορες τάσεις οπλισμού.

Από τις χαρακτηριστικές φορτίου παρατηρείται ότι, η μεταβολή της τροφοδοσίας του τυλίγματος οπλισμού προκαλεί την παράλληλη μετατόπιση των χαρακτηριστικών ροπής-ταχύτητας. Έτσι, όταν η τάση στον οπλισμό μειώνεται, προκαλείται μείωση των στροφών, από την λειτουργία χωρίς φορτίο έως την λειτουργία υπό πλήρες φορτίο, ακόμα και μέχρι την πλήρη ακινητοποίηση του κινητήρα. Από τα παραπάνω προκύπτει πως, η συγκεκριμένη μέθοδος εξασφαλίζει μια ομαλή μεταβολή της ταχύτητας του κινητήρα σε ένα φάσμα στροφών το οποίο βρίσκεται μεταξύ μηδενικής και ονομαστικής ταχύτητας. Σε περιπτώσεις που απαιτείται να γίνει έλεγχος της ταχύτητας λειτουργίας του κινητήρα σε στροφές άνω των ονομαστικών, επιλέγεται διαφορετικός τρόπος ελέγχου, καθώς η αύξηση της ονομαστικής τάσης στο οπλισμό θα οδηγήσει σε φαινόμενα υπερφόρτισης με κίνδυνο την καταστροφή του.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτέλεσε η μελέτη της συμπεριφοράς του κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση, υπό την επίδραση μεταβαλλόμενης τάσης στο οπλισμό του και εξετάστηκε πως επιδρά η μείωση της στη λειτουργία του και ειδικότερα στη χαρακτηριστική φορτίου του. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε το μοντέλο του κινητήρα σε περιβάλλον Simulink, προσημειώθηκε για διάφορα επίπεδα τάσης στο τύλιγμα του τυμπάνου και σχεδιάστηκαν οι χαρακτηριστικές $I_f = f(t)$, $I_a = f(t)$, $n = f(t)$, $T = f(t)$ και $n = f(T)$.

Παρατηρήθηκε ότι, η μείωση της τάσης δεν επηρέασε το ρεύμα στο πεδίο του κινητήρα, καθώς είναι ανεξάρτητο από εκείνο του οπλισμού, στο οποίο έγινε μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας. Όμως, η μείωση της τάσης οπλισμού επηρέασε τα υπόλοιπα ηλεκτρικά μεγέθη του κινητήρα (I_a , n , T). Πιο συγκεκριμένα, κατά την εκκίνηση του κινητήρα, η μείωση της τάσης προκάλεσε τη μείωση του ρεύματος τυμπάνου (I_a) και επομένως της ροπής εκκίνησης ($T_{εκ}$), η οποία εξαρτάται άμεσα από εκείνο, χωρίς όμως να τα επηρεάζει στη μόνιμη λειτουργία, διατηρώντας τις ονομαστικές τιμές τους. Μια άλλη σημαντική παρατήρηση, ήταν η μείωση της ταχύτητας (n) περιστροφής του κινητήρα στην υπό φορτίο λειτουργία, η οποία ήταν ανάλογη της μείωσης της τάσης οπλισμού (V_a).

Σχεδιάζοντας τις χαρακτηριστικές φορτίου για τα διάφορα επίπεδα τάσης σε κοινούς άξονες παρατηρήθηκε ότι, η μείωση της τάσης προκάλεσε τη παράλληλη μετατόπιση τους προς τα κάτω, χωρίς να επηρεάζει την κλίση τους. Έτσι, εξασφαλίστηκε η ομαλή μεταβολή της ταχύτητας του κινητήρα σε ένα φάσμα στροφών, μικρότερο της ονομαστικής, διατηρώντας την ονομαστική του ροπή.

Από τα παραπάνω προέκυψε ότι, η συγκεκριμένη μέθοδος είναι κατάλληλη για έλεγχο των στροφών σε κινητήρες που διαθέτουν ξένη διέγερση, παρέχοντας την δυνατότητα εργασίας τους με ονομαστική ροπή καθόλη τη λειτουργία τους, καθιστώντας αυτούς του κινητήρες τους καταλληλότερους σε εφαρμογές που απαιτείται σταθερή ροπή.

Σημαντική παρατήρηση είναι ότι, αυτή η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας χρησιμοποιείται σε ένα φάσμα στροφών, το οποίο είναι μικρότερο των ονομαστικών. Στην αντίθετη περίπτωση, θα χρειαζόταν να αυξηθεί η τάση στον οπλισμό πάνω από την ονομαστική τιμή λειτουργίας του, πράγμα το οποίο θα οδηγούσε σε φαινόμενα υπερφόρτισης με κίνδυνο την καταστροφή του.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1]. Βλάχου Α. Γ., (2018), ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, 1ος Τόμος, Αθήνα, ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
- [2]. Βασιλακόπουλος Σ. Ν. (1977), Ηλεκτροτεχνία: Ηλεκτρικές μηχανές, 2ος τόμος, Αθήνα, Ίδρυμα Ευγενιδίου
- [3]. Βασιλακόπουλος Σ. Ν. (2006), Ηλεκτρικές μηχανές, Αθήνα, Ίδρυμα Ευγενιδίου
- Γιαννίκας Κ, Καλεσιάκης Κ, Ψωμιάδης Γ., (2011), Διατάξεις χαρακτηρισμού μαλακών φεριτών σε συχνότητες από 0.3 έως 5 Mhz, (Διπλωματική εργασία), ΑΠΘ, Ανακτήθηκε από <http://ikee.lib.auth.gr/record/291237/files/.pdf>
- [5]. Γλύτσης Ν., (n.d), Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Β, ΕΜΠ, Αθήνα, Ανακτήθηκε από http://users.ntua.gr/eglytsis/EM_B/Magnetic_Materials_.pdf
- [6]. Θεμέλης Δ. (2015), ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας, ΣΕΡΡΕΣ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ, Ανακτήθηκε από http://eclass.opencourses.teicm.gr/ec\lass/modules/document/file.php/TMA112/Hlektrikes_Michanes_S.R.pdf
- [7]. Θεοδουλίδης Θ. (Επιμ.), (2019), ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ
- [8]. Κανταρτζής Ν. Β., Τσιμπούκης Δ. Θ., (2017), Εφαρμοσμένος Ηλεκτρομαγνητισμός: Στοιχεία θεωρίας και ασκήσεις, UNIVERSITY STUDIO PRESS, Θεσσαλονίκη
- [9]. Κόκκοτας Π. Β., (2010), Φυσική, Τεύχος Α, Αθήνα, ΙΤΥΕ – ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ
- [10]. Μαλατέστας Π. Β., (2019), Ηλεκτρικές Μηχανές, Αθήνα, Εκδόσεις Τζιόλα
- [11]. Μανωλακάκης Γ., Δούνος Δ., (2006), Διερεύνηση της καταγραφής βρόχων υστέρησης μαλακών μαγνητικών υλικών με τη μέθοδο του ροομετρητή, (Διπλωματική Εργασία), ΑΠΘ, Ανακτήθηκε από <http://ikee.lib.auth.gr/record/291067/files/B1.pdf>
- [12]. Παρασκευόπουλος Δ., (2018), Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, ΕΚΠΑ, Ανακτήθηκε <https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/.pdf>

- [13]. Πέλλης Σ., (2015), Δύναμη Lorentz, Ανακτήθηκε από <http://physiclessons.blogspot.com/2015/04/lorentz.html>
- [14]. Πέλλης Σ., (2013), Ηλεκτροκινητήρας, Ανακτήθηκε από http://physiclessons.blogspot.com/2013/03/blog-post_3505.html
- [15]. Πηλακούτα Μ., (n.d), Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικών υλικών, Ανακτήθηκε από <http://ikaros.teipir.gr/phyche/Subjects/Varsamis/ergastiria/fisiki2/askisi7.pdf>
- [16]. Σιαμαντούρας Δ., (2011), Οι εξισώσεις Maxwell, Ανακτήθηκε από <https://physicsgg.me/2011/04/17/maxwell/laws>
- [17]. Τουλόγλου Σ., Στεργίου Β., (1999), ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ Συνεχούς και Εναλλασσομένου Ρεύματος, ΙΩΝ
- [18]. Τζόγια Χ. Κ. (n.d.), Ηλεκτρικές Μηχανές Ι, Ενότητα 3: Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος, Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα Πανεπιστημίου Πατρών, Ανακτήθηκε από <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/201.pdf>
- [19]. Chodos A., (2001), September 4, 1821 and August 29, 1831: Faraday and Electromagnetism, APSNews, Available from <https://www.aps.org/publications/apsnews/200108/history.cfm>
- [20]. Collins D., (2018), Hysteresis loss and eddy current loss: What's the difference?, Available from <https://www.motioncontroltips.com/hysteresis-loss/>
- [21]. Henry A., (2021), What is Magnetic Field, Definition, Explanation, Available from <https://www.theengineeringknowledge.com/what-is-magnetic-field-definition-explanation/>
- [22]. Mallet A., (2016), Magnetic Force between Two Wires Carrying Current, Charles University of Prague
- [23]. Nelson J., (n.d.), Force on Conducting Wires in Magnetic Fields, Available from <https://www.nagwa.com/en/explainers/592151310860/>
- [24]. Serway R. A., Jewett J. W. Jr, (2010), Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, (eighth edition), Los Angeles
- [25]. S. J. Chapman, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019

