



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τομέας Ηλεκτρομαγνητικών Εφαρμογών Ηλεκτροοπτικής και Ηλεκτρονικών Υλικών

Ανάλυση και Οδήγηση Βηματικού Κινητήρα

Διπλωματική Εργασία

ΠΑΠΠΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

EVAN PAPPAS

Επιβλέπων Καθηγητής

Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τομέας Ηλεκτρομαγνητικών Εφαρμογών Ηλεκτροοπτικής και Ηλεκτρονικών Υλικών

Ανάλυση και Οδήγηση Βηματικού Κινητήρα

Διπλωματική Εργασία

Παππάς Ευάγγελος

Επιβλέπων Καθηγητής

Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18^η Μαρτίου 2021

.....
Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Ηλίας Γλύτσης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Χριστοφόρου Ευάγγελος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Παππάς Ευάγγελος

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

Copyright © Παππάς Ευάγγελος, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All Rights reserved.

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

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

Περίληψη

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των βηματικών κινητήρων και η εξέταση των κατηγοριών τους.

Αρχικά πραγματοποιείται μια παρουσίαση της ιστορικής αναδρομής των βηματικών κινητήρων. Στην συνέχεια κάνουμε μία συνοπτική παρουσίαση των κατηγοριών των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος και συνεχούς ρεύματος των ειδικών ηλεκτρικών κινητήρων καθώς και της διέγερσης τους. Παρουσιάζουμε δηλαδή την δομή των βηματικών κινητήρων καθώς και τις χαρακτηριστικές τους παραστάσεις ενώ ταυτόχρονα αναφέρουμε τα πλεονεκτήματα τους και τα μειονεκτήματα τους, όπως και τις λειτουργίες και τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται.

Εν συνέχεια ασχολούμαστε με τις κατηγορίες των βηματικών κινητήρων και κάνουμε ανάλυση τους. Παρουσιάζουμε τις εξισώσεις οι οποίες χαρακτηρίζουν τους βηματικούς κινητήρες παραθέτοντας τα στοιχεία μελέτης τους και εξετάζουμε τους βηματισμούς τους οποίους μπορούμε να επιτύχουμε. Παραθέτουμε τρόπους επίλυσης προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν λόγω της μέσης τιμής συχνότητας συντονισμού και πλεονεκτήματα του κάθε βηματισμού ή μειονεκτήματα τους.

Στο 6^ο κεφάλαιο μελετάμε μία θεωρητική προσέγγιση της οδήγησης των βηματικών κινητήρων. Αναφέρουμε την πολικότητα τους και συγκεκριμένα κάνουμε μία πιο εκτενή αναφορά στους υβριδικούς βηματικούς κινητήρες και του τρόπου λειτουργίας τους αλλά και οδήγησης τους. Το μεγαλύτερο μέρος της διπλωματικής αυτής εργασίας αναφέρεται στους βηματικούς κινητήρες και στον τρόπο λειτουργίας τους με το τελευταίο τμήμα της να αφορά μία συγκεκριμένη κατηγορία τους και τον βέλτιστο τρόπο οδήγησης του.

Εν κατακλείδι, στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τμήματα από οδηγούς που χρησιμοποιούνται και έχουν χρησιμοποιηθεί για την οδήγηση των βηματικών μοτέρ.

Λέξεις-κλειδιά

Βηματικός κινητήρας, Βηματισμός, Χαρακτηριστικές βηματικού κινητήρα, μικροβηματισμός, υβριδικό βηματικό μοτέρ

Abstract

The stepper motor, a DC motor, is a relatively new technology in the field of motors. Functionally, it is similar to servomotors that have the ability to control the movement at specific degrees through drivers. Many industrial systems that operated until then with cams and switches on their axis as well as sometimes pneumatic systems. On the other hand, new devices required precise position shifting such as the 3D printer. However, despite the common functionality of servomotors and stepper motors, there are significant differences. In this dissertation we dealt with the stepper motor which is the best in applications that need precision that touches not be visible to the eye. The main difference with servomotors is that usually we do not use them in applications on their axis we have a large load. The interest in the study of the construction of the stepper motor came mainly from our joint decision to deal with the motor sector and this issue combined the movement through multiple control methods that are related to electrical, electronic and programming character.

The companion of the stepper motor is its driver and its controller which functions as a pulse generator.

Our dissertation has as a structural element the theoretical analysis concerning the stepper motors and as a second part which is the last chapter, an analysis and description of the construction. Theoretical reports were made on the basic elements of DC motors, the theoretical analysis of stepper motors, the types of stepper motors and their principle of operation, the types of drivers, the analysis of stepping methods and their characteristics.

Keywords

stepping motor, stepper motor, hybrid stepper motor, characteristics, Microstepping

Εισαγωγή

Ο βηματικός κινητήρας, είναι ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος και αποτελεί μια σχετικά νέα τεχνολογία στο τομέα των μηχανών. Λειτουργικά είναι παρόμοιος με τους σερβοκινητήρες που έχουν την δυνατότητα έλεγχου της κίνησης σε συγκεκριμένες μοίρες μέσα από drivers. Η ανάγκη της βιομηχανίας να έχει ακριβή έλεγχο της κίνησης για απόλυτη αυτοματοποίηση έφερε την επανάσταση σε νέους κινητήρες που θα ελέγχονται μέσω εντολών από κάποιο οδηγό. Αυτό, από την μία πλευρά αντικατέστησε πολλά συστήματα της βιομηχανίας που λειτουργούσαν ως τότε με έκκεντρα και διακόπτες στο άξονα τους ενώ από την άλλη νέες συσκευές απαιτούσαν την ακριβή μετακίνηση θέσης όπως για παράδειγμα ο 3D printer, μπόρεσαν να υλοποιηθούν. Παρά την κοινή λειτουργικότητα των σερβοκινητήρων και των βηματικών κινητήρων υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Στην παρούσα διπλωματική ασχοληθήκαμε με τον βηματικό κινητήρα ο οποίος υπερτερεί των υπόλοιπων σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Το ενδιαφέρον για την μελέτη και την κατασκευή του βηματικού κινητήρα προήρθε κυρίως από την κοινή μας απόφαση να ασχοληθούμε με τον τομέα των κινητήρων και το θέμα αυτό συνδύαζε την κίνηση μέσα από πολλαπλές μεθόδους έλεγχου που συσχετίζονται με ηλεκτρολογικό, ηλεκτρονικό και προγραμματιστικό χαρακτήρα.

Σύντροφος του βηματικού κινητήρα είναι ο οδηγός του (driver) και ο ελεγκτής του που λειτουργεί σαν παλμογεννήτρια.

Η διπλωματική εργασία μας έχει ως δομικό στοιχείο την θεωρητική ανάλυση που αφορούν τους βηματικούς κινητήρες και σαν δεύτερο σκέλος που είναι και το τελευταίο κεφάλαιο, μια ανάλυση και περιγραφή της κατασκευής. Θεωρητικές αναφορές έγιναν πάνω στα βασικά στοιχεία των μηχανών συνεχούς ρεύματος, την θεωρητική ανάλυση των βηματικών κινητήρων, στα είδη των βηματικών κινητήρων και την αρχή λειτουργίας τους, τα είδη των οδηγών (drivers), την ανάλυση των μεθόδων βηματισμού και τα χαρακτηριστικά τους.

Ευχαριστίες

Η συγγραφή μίας διπλωματικής εργασίας αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο μίας δύσκολης αλλά και εποικοδομητικής πορείας ακαδημαϊκού κύκλου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην περάτωση του ακαδημαϊκού μου κύκλου.

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου Κ. Πολιτόπουλο για την βοήθεια τις γνώσεις και την καθοδήγηση που μου παρείχε για την περάτωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ευχαριστώ την οικογένεια μου, την μητέρα μου για την στήριξη και τις αξίες που μου μετέδωσε καθώς και την σύντροφο μου που με στηρίζει να ολοκληρώσω τους στόχους μου και τα όνειρα μου.

Περιεχόμενα

Παππάς Ευάγγελος.....	0
Copyright © Παππάς Ευάγγελος, 2021	0
Περίληψη	Error! Bookmark not defined.
Εισαγωγή.....	Error! Bookmark not defined.
Abstract	2
Ευχαριστίες	4
Περιεχόμενα	6
Κατάλογος σχημάτων	8
1. Ιστορική αναδρομή.....	10
1.1 Γενικά	10
1.2 Αντικείμενο διπλωματικής.....	10
2. Βασικές έννοιες	11
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC).....	11
2.2.1 Σύγχρονες Μηχανές.....	11
2.4 Ασύγχρονες Μηχανές.....	12
2.5 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC)	13
2.5.1	17
2.6 Ειδικοί ηλεκτρικοί κινητήρες	17
2.7 Χρήσεις ειδικών ηλεκτρικών κινητήρων	18
2.8 Βαθμίδες συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης	18
2.9 Σύνοψη	20
3. Βηματικοί κινητήρες	20
3.1 Εισαγωγή.....	20
3.2 Δομή και αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα	21
3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα βηματικών κινητήρων	26
3.4 Χαρακτηριστικές βηματικών κινητήρων	26
3.4.1 Βηματική γωνία και ακρίβεια	26
3.4.2 Βήματα/περιστροφή	27
3.4.3 Στατικές χαρακτηριστικές.....	28
3.4.4 Δυναμικές χαρακτηριστικές	31
4. Είδη βηματικών κινητήρων.....	34
4.1 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.....	35
4.1.1 Παράδειγμα βηματικού κινητήρα τεσσάρων τυλιγμάτων	41
4.2 Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (Variable Reluctance Motors).....	43
4.3 Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες	47
5. Βηματισμός και διέγερση βηματικού κινητήρα	51
5.1 Πλήρες βήμα	51
5.2 Μισό βήμα (half stepping)	52
5.3 Μικροβηματισμός (Microstepping)	53
5.4 Σύγκριση βηματισμών βηματικού κινητήρα	57
5.5 Δομικά χαρακτηριστικά βηματικού κινητήρα	61

6. Οδήγηση βηματικού κινητήρα.....	67
6.1 Εισαγωγή	67
6.2 Διπολική και μονοπολική οδήγηση βηματικού κινητήρα	68
6.3 Λειτουργία mosfet Τρανζίστορ ως διακόπτης	69
6.4 Ρεύμα αποκοπής.....	74
6.5 Ιστορική αναδρομή και χρήση των οδηγών των stepper motor.....	77
Βιβλιογραφία.....	84

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2.1	Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα DC κινητήρα	14
Σχήμα 2.1	Σύστημα ελέγχου ηλεκτρικής κίνησης	19
Σχήμα 3.1	Απεικόνιση απλοποιημένης κίνησης βηματικού κινητήρα κατά 90°	21
Σχήμα 3.2	Ηλεκτρικό διάγραμμα βηματικού κινητήρα	22
Σχήμα 3.3	Παράδειγμα βηματικού κινητήρα με μισό βήμα	24
Σχήμα 3.4	Παράδειγμα βηματικού με ζεύγη πόλων	25
Σχήμα 3.5	παράδειγμα σύνδεσης μίας φάσης βηματικών μοτέρ	25
Σχήμα 3.6	ακρίβεια θέσης	28
Σχήμα 3.7	χαρακτηριστική ροπής – γωνίας	29
Σχήμα 3.8	Χαρακτηριστική ροπής στρέψης	29
Σχήμα 3.9	Χαρακτηριστική Ροπής-ρεύματος	30
Σχήμα 3.10	Χαρακτηριστικές ροπής στροφών βηματικού κινητήρα	31
Σχήμα 3.11	Καμπύλη συντονισμού μέσης συχνότητας	32
Σχήμα 4.6	Οι οδοντώσεις του ρότορα είναι κατασκευασμένοι ώστε όταν ευθυγραμμίζονται με μια φάση τότε να είναι ευθυγραμμισμένοι μεταξύ τους.	44
Σχήμα 4.7	Παράδειγμα βηματισμού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης	44
Σχήμα 4.8	Ηλεκτρικό διάγραμμα και κυματομορφή βηματικού κινητήρα μαγνητικής αντίστασης	45
Σχήμα 4.9	Υβριδικός βηματικός κινητήρας	48
Σχήμα 4.10	Δομή ρότορα υβριδικού βηματικού κινητήρα	49
Σχήμα 4.11	Υβριδικός βηματικός κινητήρας προσανατολισμός ρότορα/στάτη	50
.....	50
Σχήμα 4.12	Δομή στάτη Υβριδικού βηματικού κινητήρα	50
Σχήμα 5.1	πλήρες βήμα διπολικού βηματικού κινητήρα	51
Πίνακας 1	Διέγερση μίας φάσης πλήρους βήματος	52
Πίνακας 2	Διέγερση δύο φάσεων πλήρους βήματος	52
Πίνακας 3	Διέγερση μισού βήματος	53
Σχήμα 5.2	Λειτουργία μισού βήματος διπολικού βηματικού κινητήρα	53
Σχήμα 5.3	Κυματομορφή Λειτουργίας πλήρους βήματος	55
Σχήμα 5.4	Κυματομορφή 4 ^{ων} μικροβηματίων	56
Σχήμα 5.5	Συγκριτικό διάγραμμα λειτουργίας των 3 ^{ων} διεγέρσεων του βηματικού κινητήρα	57
Γράφημα 5.6	χαρακτηριστικές Ιφασικού τάσης ανά χρόνο ενός κύκλου βηματικού κινητήρα για πλήρες βήμα, μισό βήμα και μικροβηματισμό αντίστοιχα	57
Εικόνα 2	Υβριδικό βηματικό μοτέρ NEMA 17	61
Εικόνα 3	Στάτης υβριδικού βηματικού μοτέρ	62
Εικόνα 4	ρότορας βηματικού μοτέρ NEMA 17	63
Εικόνα 5	ολοκληρωμένο σύστημα υβριδικού βηματικού κινητήρα	64
Εικόνα 6	Ευθυγραμμισμός οδόντων ρότορα – στάτη	65
Εικόνα 7	σύνδεση και δήλωση φάσεων	65
Σχήμα 6.1	Ισοδύναμο κύκλωμα βηματικού κινητήρα	67
Σχήμα 6.2	Διπολικό κύκλωμα οδήγησης πλήρους γέφυρας	68
Σχήμα 6.3	Οδήγηση L/R	70
Σχήμα 6.4	Χαρακτηριστική λειτουργίας mosfet τρανζίστορ	71
Σχήμα 6.5	Λειτουργία περιοχής αποκοπής	72
Σχήμα 6.6	Λειτουργία κορεσμού	73
Σχήμα 6.7	Χαρακτηριστική τάσης ρεύματος με λειτουργία αποκοπής	75
Σχήμα 6.8	Διάγραμμα αποκοπής ρεύματος βηματικού κινητήρα	76
Σχήμα 6.9	Χαρακτηριστική ρεύματος αποκοπής, L/R, L/nR	77

Σχήμα 6.10 Block diagram L298.....	78
Πίνακας 1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά οδηγού L298.....	79
Σχήμα 6.11 Κύκλωμα οδήγησης διπολικού βηματικού κινητήρα	80
Σχήμα 6.12 mosfet driver block diagram	81
Σχήμα 6.13 Ημιτονοειδές και παλμικό σήμα	82
Σχήμα 6.14 Χαρακτηριστικές mosfet driver	83

1. Ιστορική αναδρομή

1.1 Γενικά

Ο βηματικός κινητήρας ορίζεται ως μία συσκευή ηλεκτρομηχανικής κίνησης η οποία μετατρέπει το ψηφιακό εισαγωγικό σήμα που δέχεται σε μηχανική κίνηση. Αποτελεί μία ειδική έκδοση μίας σύγχρονης μηχανής, όπου ο ρότορας είναι ένας μόνιμος μαγνήτης και ο στάτης αποτελείται από τυλίγματα. Σε αντίθεση με τους σύγχρονους κινητήρες, οι βηματικοί έχουν μεγάλο αριθμό ζευγών πόλων. Οι βηματικοί κινητήρες είναι νέοι στην κατηγορία κινητήρων οι οποίοι ξεκίνησαν να γίνονται πιο ζητούμενοι κατά τις αρχές του 19^{ου} αιώνα. Αρχικά σχεδιάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν ως μία εναλλακτική λύση των σερβομοτέρ σε ακριβές εφαρμογές και διαδόθηκαν σε περιφερειακές εφαρμογές από την βιομηχανία των υπολογιστών. Ο 1^{ος} βηματικός κινητήρας ήταν bidirectional variable reluctance type και αναπτύχθηκε το 1933 για χρήση του Βρετανικού πολεμικού ναυτικού. Είχε χρησιμοποιηθεί πυξίδα και όπλο με δείκτη κατεύθυνσης. Λόγο σταθερής και μικρής ταχύτητας περιστροφής η αποτελεσματικότητά του ήταν άψογη. Εν συνεχεία χρησιμοποιήθηκε σε περιορισμένο αριθμό ψηφιακών συστημάτων ελέγχου κατά το 1950. Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος DC είχε επικρατήσει προγενέστερα και ο βηματικός κινητήρας τον είχε ξεπεράσει για όλα τα απαιτούμενα με ακρίβεια ψηφιακά συστήματα.

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής είναι η παράθεση λειτουργίας των βηματικών κινητήρων κυρίως σε θεωρητικό επίπεδο. Η απόδοση των συστημάτων των βηματικών κινητήρων και ο τρόπος λειτουργίας τους υπό οδήγηση. Οι δυνατότητες των βηματικών κινητήρων, τα χαρακτηριστικά τους, οι τύποι τους, τα κατασκευαστικά τους στοιχεία και οι τοπολογίες οδήγησης τους.

2. Βασικές έννοιες

2.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες συναντώνται στην καθημερινότητα και παίζουν μεγάλο ρόλο σε αυτή. Η κίνηση και λειτουργία κάθε συσκευής βοηθάει στην καθημερινότητα μας μέσω της ηλεκτρικής ενέργειας. Υπολογιστές, σκληροί δίσκοι, είδη σπιτιού είναι λίγα από τα παραδείγματα κίνησης παραγόμενης από ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία πίσω από τους ηλεκτρικούς κινητήρες είναι η ικανότητα να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική.

Υπάρχουν πολλά είδη ηλεκτρικών κινητήρων. Η βασική τους κατηγοριοποίηση είναι η εξής. Κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC), βηματικοί κινητήρες και σερβοκινητήρες.

2.2 Κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC)

Η τροφοδοσία των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος γίνεται από μονοφασικό ή τριφασικό δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης με συχνότητα 50 ή 60 Hz. Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος καλύπτουν ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών. Διακρίνονται σε πολλά είδη μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος με διαφορετικά χαρακτηριστικά και τρόπους λειτουργίας. Χωρίζονται σε μονοφασικές, διφασικές, τριφασικές και πολυφασικές, ανάλογα με τον αριθμό των εναλλασσόμενων ημιτονοειδών τάσεων τροφοδοσίας. Έχουμε επίσης διάκριση σε σύγχρονες και ασύγχρονες αναλόγως με την ταχύτητα περιστροφής τους κατά την κανονική λειτουργία. Γενικότερα όμως όσων αφορά τις πρακτικές εφαρμογές μεγάλης ισχύος χρησιμοποιούνται τριφασικές μηχανές που δέχονται συμμετρική τριφασική ημιτονοειδή τροφοδοσία. Όπως είναι ευνόητο η διαφορά φάσεως των τάσεων τροφοδοσίας στην περίπτωση αυτή είναι 120° μοίρες. Οποιαδήποτε στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή μπορεί να λειτουργήσει είτε σαν γεννήτρια είτε σαν κινητήρας. Κι αυτό γιατί σε κάθε περιστρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή αναπτύσσεται ταυτόχρονα τόσο ηλεκτρεγερτική δύναμη, όσο και ροπή. Κατά την λειτουργία κινητήρα παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια στο κύριο τύλιγμα της μηχανής, το οποίο ονομάζεται τύλιγμα τυμπάνου, ενώ αποδίδεται μηχανική ενέργεια σε μία περιστρεφόμενη άτρακτο, η οποία κινεί το μηχανικό φορτίο. Οι επόμενες παράγραφοι μας κάνουν μία σύντομη αναφορά στις κατηγορίες εναλλασσόμενου ρεύματος.

2.2.1 Σύγχρονες Μηχανές

Οι σύγχρονες μηχανές, περιστρέφονται με την ίδια συχνότητα της επιβαλλόμενης τάσης. Έχουμε αλληλεπίδραση δύο πεδίων όσων αφορά την λειτουργία τους: **α) του πεδίου διεγέρσεως και β) του πεδίου τυμπάνου**. Όσων αφορά το πεδίο τυμπάνου δημιουργείται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στον στάτη το οποίο είναι ημιτονοειδές και ομοιόμορφο από τα

σταθερά τυλίγματα του στάτη τα οποία μπορεί να είναι και τριφασικά. Εν συνέχεια το πεδίο διεγέρσεως βρίσκεται συνήθως στον δρομέα, χωρίς όμως να είναι απαραίτητο. Καθώς η τεχνολογία και η έρευνα εξελίσσεται έχουν προκύψει μόνιμοι μαγνήτες με μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση (μέχρι 1,2T) και υψηλή συνεχούσα δύναμη (μέχρι 1000kA/m), όπως π.χ. κράματα Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου που τοποθετούνται επιφανειακά στον δρομέα. Οι κινητήρες αυτοί ονομάζονται σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών και έχουν συγκεντρώσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, ενώ ήδη χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές με πολύ καλά αποτελέσματα. Είναι πιο απλοί, αξιόπιστοι και εμφανίζουν μικρότερες απώλειες, άρα και καλύτερη απόδοση, από τους αντίστοιχους σύγχρονους κινητήρες τυλιγμένου δρομέα. Ένα άλλο είδος σύγχρονων κινητήρων που παρουσιάζει ενδιαφέρον, για ειδικές όμως εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης είναι οι σύγχρονοι κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.

Στον στάτη τους υπάρχουν και πάλι τα τριφασικά τυλίγματα των σύγχρονων κινητήρων που περιγράψαμε παραπάνω. Ο δρομέας τους όμως που αποτελείται είτε από μόνιμους μαγνήτες είτε από ηλεκτρομαγνήτες κατασκευάζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παρουσιάζει μικρό διάκενο κατά τον άξονα του ρότορα (d) και μεγάλο κατά τον εγκάρσιο άξονα (q) (δηλαδή μικρή και μεγάλη μαγνητική αντίσταση αντίστοιχα). Η ύπαρξη του μεταβλητού διακένου και συνακόλουθα μεταβλητής μαγνητικής επαγωγής οδηγεί στην ανάπτυξη δυνάμεων που στρέφουν το δρομέα προς τη θέση ελάχιστης μαγνητικής ενέργειας. Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας των κινητήρων αυτών. Όπως προαναφέρθηκε προορίζονται για ειδικές εφαρμογές.

2.4 Ασύγχρονες Μηχανές

Οι ασύγχρονες μηχανές ή μηχανές επαγωγής, όπως φανερώνει και το όνομά τους στρέφονται γενικά με ταχύτητα διαφορετική σε σχέση με την συχνότητα της επιβαλλόμενης τάσης. Ο στάτης των μηχανών αυτών είναι ίδιος με τον στάτη των σύγχρονων μηχανών και διαθέτει τριφασικά σταθερά τυλίγματα που δημιουργούν ένα ομοιόμορφο στρεφόμενο και ημιτονοειδές κατανομημένο στο στάτη μαγνητικό πεδίο το οποίο στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Για τη διαμόρφωση του δρομέα των ασύγχρονων μηχανών υπάρχουν δύο δυνατότητες. Είτε ο τυλιγμένος δρομέας, ο οποίος διαθέτει τριφασικό τύλιγμα όμοιο με του στάτη και δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης με κάποιο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα μέσω ψηκτρών είτε ο δρομέας τύπου κλωβού που είναι και η συνηθέστερη επιλογή. Ο δρομέας τύπου κλωβού αποτελείται από έναν κλωβό από αγωγίμο υλικό ο οποίος συνίσταται από διαμήκειες ράβδους που ενώνονται με δύο μεταλλικούς δακτυλίους στα άκρα τους. Δεν απαιτεί καμία εξωτερική τροφοδοσία ενώ στις ράβδους του αναπτύσσονται ρεύματα εξ επαγωγής με πολύ μικρή συχνότητα (εξ' ου και η ονομασία κινητήρας επαγωγής). Και τα δύο παραπάνω είδη κινητήρων, όπως αναφέραμε, εμφανίζουν γενικά ασύγχρονη λειτουργία. Αν παρατηρήσουμε το δρομέα μιας ασύγχρονης μηχανής σε σχέση με το σύγχρονα στρεφόμενο πεδίο θα δούμε ότι ο δρομέας ολισθαίνει ελαφρώς ως προς αυτό, λόγω της διαφοράς στην ταχύτητα περιστροφής. Ορίζεται λοιπόν ένα νέο μέγεθος, η ανά μονάδα ολίσθηση που συμβολίζεται με s και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (1)$$

όπου ω_s η σύγχρονη κυκλική συχνότητα και ω η πραγματική κυκλική συχνότητα περιστροφής της μηχανής. Όπως είναι φανερό η ολίσθηση μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές (για λειτουργία γεννήτριας) ενώ τυπικές τιμές της είναι 0,01-0,05.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος ή κινητήρες επαγωγής παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως υψηλή αξιοπιστία και απόδοση, μεγάλη διάρκεια ζωής χωρίς ιδιαίτερες ανάγκες συντήρησης και μικρό βάρος και όγκο. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με την ιδιαίτερη τροφοδοσία μεταβλητής συχνότητας η οποία δημιουργείται με αναστροφείς (inverters) και τις προηγμένες τεχνικές ελέγχου τους καθιστούν την ιδανική επιλογή για τα περισσότερα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης. Ήδη υπάρχει η τάση αντικατάστασης των κινητήρων συνεχούς ρεύματος σε βιομηχανικό επίπεδο από τους πιο οικονομικούς και αξιόπιστους κινητήρες επαγωγής ενώ το ενδιαφέρον και για νέες εφαρμογές είναι αυξημένο.

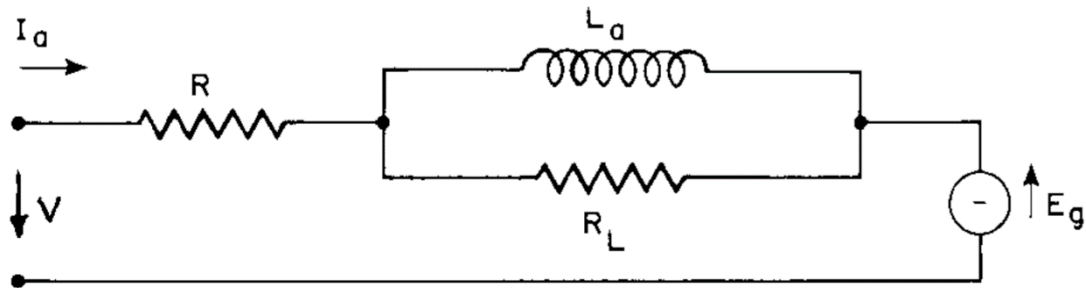
2.5 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC)

Ιστορικά οι μηχανές συνεχούς ρεύματος προηγούνται των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος. Η δυνατότητα που παρέχουν για εύκολο έλεγχο ταχύτητας και ροπής τις είχε καταστήσει για δεκαετίες τη μοναδική επιλογή για συστήματα ηλεκτρικής κίνησης που απαιτούσαν μεταβλητή ταχύτητα λειτουργίας. Η ευκολία του ελέγχου έγκειται στο ότι γενικά σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος η ταχύτητα περιστροφής είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης τάσης στο τύμπανο και η αναπτυσσόμενη ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος τυμπάνου (αυτό ισχύει επακριβώς μόνο για τους κινητήρες συνεχούς ξένης διέγερσης). Συνεπώς, όπως ήδη θα είναι φανερό, είναι αρκετά απλός ο έλεγχος ενός τέτοιου κινητήρα (λ.χ. μέσω ενός μετατροπέα συνεχούς σε συνεχές – DC to DC Converter). Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος έχουν χρησιμοποιηθεί για πάρα πολλά χρόνια σε συστήματα ηλεκτρικής κίνησης και θεωρούνταν αναντικατάστατοι σε εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής. Μόνο τα τελευταία είκοσι χρόνια δόθηκε η δυνατότητα αντικατάστασής τους από τους ασύγχρονους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (κινητήρες επαγωγής) που οδηγούνται με προηγμένες τεχνικές ελέγχου.

Η λειτουργία του κλασσικού ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος βασίζεται στην αλληλεπίδραση δύο μαγνητικών πεδίων. Το πρώτο πεδίο δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες (διέγερση) που βρίσκονται συνήθως σταθερά προσαρμοσμένοι στον στάτη της μηχανής. Το δεύτερο πεδίο δημιουργείται στον δρομέα της μηχανής από το περιστρεφόμενο τύλιγμα τυμπάνου, που συνιστά έναν ηλεκτρομαγνήτη. Βασικό ρόλο στη λειτουργία της μηχανής συνεχούς ρεύματος παίζει ο συλλέκτης. Ο ρόλος του συλλέκτη είναι να αντιστρέφει τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος του τυμπάνου δύο φορές σε κάθε κύκλο, έτσι ώστε να αντιστρέφεται η πολικότητα του ηλεκτρομαγνήτη τυμπάνου την κατάλληλη χρονική στιγμή (όταν οι δύο αντίθετοι μαγνητικοί πόλοι βρίσκονται απέναντι) και τελικά να αλληλοεπιδρούν εις το διηνεκές μαγνητικά τα δύο πεδία. Αυτό είναι αναγκαίο αφού το τύλιγμα τυμπάνου είναι περιστρεφόμενο και χωρίς το συλλέκτη η μηχανή θα σταματούσε άμεσα την πρώτη φορά που δύο αντίθετοι πόλοι θα βρίσκονταν απέναντι.

Το πρώτο χαρακτηριστικό που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η σύνθετη αντίσταση του κινητήρα. Ο καλύτερος τρόπος για να προσδιοριστεί αυτό είναι με άμεσες μετρήσεις. Κλειδωμά του άξονα του κινητήρα σε σταθερή θέση και εφαρμόζοντας την ημιτονοειδή τάση σε ποικιλία συχνοτήτων, μπορεί κανείς να μετρήσει το προκύπτουν ρεύμα και να αξιολογήσει τη σύνθετη αντίσταση ως λόγο της τάσης προς το ρεύμα.

Όταν γίνει αυτό φαίνεται ότι η σύνθετη αντίσταση του κινητήρα ισούται με την αντίσταση R σε σειρά με έναν παράλληλο συνδυασμό με μία επαγωγή L , και μία άλλη αντίσταση R_L . Όταν ο κινητήρας περιστρέφεται, ο οπλισμός των πηνίων κινούνται στο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Το επαγόμενο ρεύμα εμφανίζεται σε όλο τον οπλισμό τερματικά ως εσωτερικά παραγόμενη τάση E_g . Επομένως το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του κινητήρα είναι:



Σχήμα 2.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα DC κινητήρα

Από το συγκεκριμένο μοντέλο προκύπτει ότι η αντίσταση R_L είναι συνήθως μεγαλύτερη από την R οπότε η επίδραση της στην λειτουργία του κινητήρα είναι σχεδόν ασήμαντη. Έστω λοιπόν ότι η τάση V και το ρεύμα I . Η σχέση μεταξύ των μεταβλητών δίνεται από την σχέση:

$$V = L_a \frac{dI_a}{dt} + RI_a + E_g \quad (2)$$

Όπου E_g , η εσωτερική παραγόμενη τάση, η οποία είναι ανάλογη με την ταχύτητα του κινητήρα ω .

$$E_g = K_E \omega \quad (3)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις έχουμε την ηλεκτρική εξίσωση κινητήρων:

$$V = L_a \frac{dI_a}{dt} + RI_a + K_E \omega \quad (4)$$

Έστω τώρα ότι το μαγνητικό πεδίο του κινητήρα είναι σταθερό. Το ρεύμα προκαλεί μία παραγόμενη ροπή:

$$T_g = K_T I_a \quad (5)$$

Θέτοντας ότι η αδράνεια του κινητήρα είναι J_m και ότι T_f είναι η σταθερή ροπή τριβής του κινητήρα. Τότε η αντίθετη ροπή του κινητήρα T δίνεται από:

$$T_m = T_f + D\omega$$

Όπου:

- T_m ,

(6)

Η σχέση μεταξύ ροπών και ταχύτητας είναι:

$$T_g = (J_m + J_L) \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_f + T_L \quad (7)$$

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα η μηχανή συνεχούς ρεύματος να μην διαθέτει μόνιμους μαγνήτες στον στάτη αλλά τύλιγμα ηλεκτρομαγνήτη (ως διέγερση), που αποτελεί και τη συνηθέστερη πρακτική σε μηχανές μεγάλης ιπποδύναμης. Η μηχανή αυτή ονομάζεται μηχανή συνεχούς ρεύματος με τύλιγμα πεδίου. Έτσι μεταβάλλοντας το ρεύμα που διέρχεται από τον ηλεκτρομαγνήτη (που ονομάζεται εναλλακτικά τύλιγμα πεδίου ή τύλιγμα διεγέρσεως) μπορούμε να μεταβάλλουμε την χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής του κινητήρα. Υπάρχουν οι εξής κατηγορίες μηχανών συνεχούς ρεύματος με τύλιγμα πεδίου ανάλογα με τον τρόπο τροφοδοσίας του τυλίγματος διέγερσης:

➤ **Ξένης Διέγερσης:**

Το τύλιγμα πεδίου τροφοδοτείται από ανεξάρτητη πηγή τάσης/ρεύματος δίνοντας τη δυνατότητα για πολύ εύκολο έλεγχο του πεδίου διέγερσης με ισχύουσες σχέσεις:

$$I_F = \frac{V_F}{R_F} \quad (8)$$

$$V_T = E_A + I_A R_A \quad (9)$$

$$I_L = I_A \quad (10)$$

➤ **Διέγερσης Σειράς:**

Το τύλιγμα πεδίου τροφοδοτείται σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου δίνοντας τη δυνατότητα για κατασκευή κινητήρων υψηλής ροπής σε μικρές ταχύτητες με ισχύουσες σχέσεις:

$$I_A = I_S = I_L \quad (11)$$

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \quad (12)$$

➤ **Παράλληλης Διέγερσης:**

Το τύλιγμα πεδίου τροφοδοτείται παράλληλα με το τύλιγμα τυμπάνου δίνοντας τη δυνατότητα για κατασκευή κινητήρων υψηλών ταχυτήτων με τις εξής ισχύουσες σχέσεις:

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad (13)$$

$$V_T = E_A + I_A R_A \quad (14)$$

$$I_L = I_A + I_F \quad (15)$$

➤ **Σύνθετης Διέγερσης:**

Το τύλιγμα πεδίου τροφοδοτείται εν μέρει σε σειρά και εν μέρει παράλληλα με το τύλιγμα τυμπάνου δίνοντας τη δυνατότητα για κατασκευή κινητήρων περίπου σταθερής ταχύτητας παρά τις μεταβολές της ροπής με τις εξής ισχύουσες σχέσεις:

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \quad (16)$$

$$I_A = I_L - I_F \quad (17)$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad (18)$$

Υπάρχει η δυνατότητα του να μειώσουμε το ρεύμα του τυλίγματος πεδίου άρα και την ένταση του μαγνητικού πεδίου που αυτό προκαλεί, ώστε να περάσουμε σε λειτουργία «εξασθένισης πεδίου». Η κατάσταση αυτή επιτρέπει την επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων από την ονομαστική με ανάλογη μείωση της ικανότητας ανάπτυξης ροπής. Οι μηχανές συνεχούς

ρεύματος παρουσιάζουν και αρκετά μειονεκτήματα όπως τακτική συντήρηση του συλλέκτη, μεγάλο βάρος του δρομέα, σχετικά χαμηλή μέγιστη ταχύτητα λόγω μηχανικής καταπόνησης του συλλέκτη και υψηλό κόστος κατασκευής. Έτσι η αντικατάστασή τους είναι επιθυμητή και αναγκαία, όπου αυτό είναι φυσικά δυνατόν, με τους πιο αξιόπιστους ασύγχρονους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.

2.5.1

Τύπου DC είναι και οι βηματικοί κινητήρες για εφαρμογές ελέγχου θέσης. Επίσης υπάρχουν κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες για εφαρμογές ελέγχου της ταχύτητας. Στην κατηγορία των ειδικών κινητήρων κατατάσσονται οι κινητήρες χαμηλής ισχύος για εφαρμογές γενικής χρήσης και για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας όπως: γενικοί κινητήρες (universal), βηματικοί κινητήρες, σερβοκινητήρες. Συμπληρώνοντας υπάρχουν ειδικοί ηλεκτρικοί κινητήρες οι οποίοι στηρίζονται σε διαφορετικά φυσικά φαινόμενα όπως πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες, κινητήρες που δημιουργούν περιστροφή με πεπιεσμένο αέρα κ.α. Στο αυτοκίνητο επίσης χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός κινητήρων DC που τροφοδοτούνται από τη μπαταρία. Ωστόσο, στο ίδιο αυτοκίνητο χρησιμοποιούνται και βηματικοί κινητήρες με ηλεκτρονικά κυκλώματα ελέγχου και τροφοδοσίας. Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών, των ψηφιακών συστημάτων και των μικροεπεξεργαστών, επέτρεψαν την ανάπτυξη μοντέρνων τεχνικών ελέγχου, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη της περιοχής των ελεγχόμενων συστημάτων ειδικών ηλεκτρικών κινητήρων. Συνεχίζοντας αναφερόμαστε στους ειδικούς ηλεκτρικούς κινητήρες και κάποια χαρακτηριστικά τους.

2.6 Ειδικοί ηλεκτρικοί κινητήρες

Η προτίμηση των ειδικών ηλεκτρικών κινητήρων οφείλεται στα πλεονεκτήματά τους, σε σχέση με άλλα συστήματα κίνησης όπως τα μηχανικά ή τα υδραυλικά. Τα πλεονεκτήματα αυτά παρουσιάζονται ως εξής:

- Υπάρχουν για ευρεία περιοχή ισχύος: Από ισχύς μικρότερη του 1W (ηλεκτρονικά ρολόγια) μέχρι ισχύς μερικών ίππων.
- Προσφέρουν ευρεία περιοχή ταχυτήτων: από μηδέν μέχρι 100.000 ΣΑΛ.(τουρμποκινητήρας – αερορότορ)
- Προσαρμόζονται σε διάφορες λειτουργικές καταστάσεις όπως, σε κλειστά περιβάλλοντα, χωρίς αερισμό, με υγρασία, σε εκρηκτικά, σε ραδιενεργά. Επίσης δεν χρειάζονται καύσιμα, δεν εκπέμπουν καυσαέρια και ο θόρυβος που δημιουργούν είναι χαμηλότερος από άλλα συστήματα.
- Τα συστήματα κίνησης μπορούν να φορτιστούν αμέσως, δεν χρειάζονται προθέρμανση, έχουν χαμηλές απώλειες, υψηλή απόδοση και έχουν τη δυνατότητα προσωρινής υπερφόρτισης.
- Τα συστήματα κίνησης είναι ελεγχόμενα, οι χαρακτηριστικές μόνιμης κατάστασης μπορούν να αλλάζουν εάν χρειάζεται και έχουν καλή δυναμική επίδοση η οποία επιτυγχάνεται με ηλεκτρονικό έλεγχο.
- Κατασκευάζονται σε μεγάλη ποικιλία σχεδίων κατά εφαρμογή. Βέβαια, τα ηλεκτρικά συστήματα κίνησης παρουσιάζουν και μειονεκτήματα, μερικά από τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια:

- Η εξάρτηση από την ηλεκτρική πηγή τροφοδότησης δημιουργεί δυσκολίες προπαντός στα αυτοκίνητα. Έτσι, μία πηγή ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να βρίσκεται πάντα μέσα στο αυτοκίνητο.
- Η ύπαρξη του φαινομένου του μαγνητικού κορεσμού και η ανάγκη ψύξης είναι η αιτία για την οποία έχουν χαμηλότερο λόγο ισχύος προς βάρος μηχανής από τα υδραυλικά συστήματα κίνησης. Αυτό είναι σημαντικό στα συστήματα ελέγχου θέσης στα αεροπλάνα.

2.7 Χρήσεις ειδικών ηλεκτρικών κινητήρων

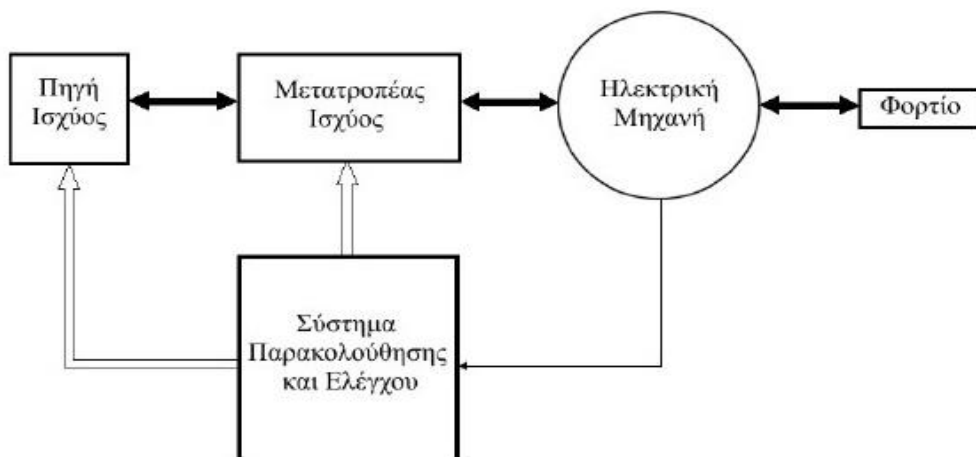
Με την πάροδο του χρόνου οι ηλεκτρικοί κινητήρες κατέκλυσαν την καθημερινότητα μας και συνεχίζουν να προστίθενται με ποικιλία τρόπων και απαιτήσεων σε αυτή. Όπως είναι ευρέως γνωστό, η χρήση των ηλεκτρικών κινητήρων παρέχει την πλέον άνετη δυνατότητα κίνησης. Ο σύγχρονος τρόπος ζωής βασίζεται στην χρησιμοποίηση μεγάλου αριθμού κινητήρων, εκ των οποίων οι περισσότεροι είναι χαμηλής ισχύος. Οι μικροί αυτοί κινητήρες δεν είναι πάντα του ίδιου τύπου με τους μεγάλους που λειτουργούν στη βιομηχανία. Τους συναντάμε στην καθημερινότητα μας σαν οικιακές συσκευές όπως ψυγείο, μίξερ, πλυντήριο πιάτων, σκούπα ηλεκτρική, πιστολάκι μαλλιών, σε εξοπλισμό γραφείου όπως υπολογιστής εκτυπωτής, φαξ, ακόμα και σε ηλεκτρικά εργαλεία όπως τρυπάνι ραπτομηχανή κλπ.

2.8 Βαθμίδες συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης

Ένας ειδικός κινητήρας λειτουργεί πάντα με ένα σύστημα ελέγχου το οποίο αποτελείται από περισσότερες ηλεκτρικές μονάδες οι οποίες συνιστούν ολοκληρωμένα ηλεκτρομηχανικά σύστημα που αποτελούνται από τις παρακάτω κύριες βαθμίδες:

- Πηγή Ισχύος
- Μετατροπέας Ισχύος
- Ηλεκτρική Μηχανή
- Φορτίο
- Σύστημα Παρακολούθησης και Ελέγχου

Διαγραμματικά στο παρακάτω σχήμα 2.1 παρατηρούμε και την διασύνδεση αυτών των βαθμίδων:



Σχήμα 2.1 Σύστημα ελέγχου ηλεκτρικής κίνησης

Οι παραπάνω βαθμίδες διαίρονται σε δύο επιμέρους υποσύνολα:

- Το Κύκλωμα Ισχύος, που περιλαμβάνει τις βαθμίδες της Πηγής Ισχύος, του Μετατροπέα Ισχύος, της Ηλεκτρικής Μηχανής και του Φορτίου.
- Το Κύκλωμα Ελέγχου, που περιλαμβάνει τη βαθμίδα του Συστήματος Παρακολούθησης και Ελέγχου.

Στο σχήμα 2.1 παρατηρούμε ότι οι βαθμίδες του κυκλώματος ισχύος διασυνδέονται με αμφίδρομα μαύρα βέλη. Αυτός ο συμβολισμός αντιπροσωπεύει αφενός ότι μέσω του κυκλώματος ισχύος έχουμε ροή μεγάλης ποσότητας ενέργειας (συγκριτικά με αυτή στο κύκλωμα ελέγχου) και αφ' ετέρου ότι η ροή της ενέργειας αυτής είναι δυνατόν να είναι αμφίδρομη. Είναι δηλαδή δυνατόν είτε ηλεκτρική ενέργεια να μετατρέπεται και να μεταφέρεται προς την ηλεκτρική μηχανή, η οποία τώρα λειτουργεί ως ηλεκτρικός κινητήρας, και να αποδίδεται ως μηχανική στο φορτίο είτε περίσσεια μηχανικής ενέργειας που διαθέτει το φορτίο να μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της ηλεκτρικής μηχανής, η οποία τώρα λειτουργεί ως ηλεκτρική γεννήτρια, και να επιστρέφει μέσω του μετατροπέα προς την πηγή ηλεκτρικής ισχύος.

Το κύκλωμα ελέγχου από την άλλη, περιλαμβάνει όλο εκείνο το υλικό και το λογισμικό που είναι απαραίτητο για την παρακολούθηση και τις δράσεις ελέγχου του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης. Το κύκλωμα ελέγχου λαμβάνει μετρήσεις (αναδράσεις) από κατάλληλα αισθητήρια (λ.χ. για τα ρεύματα ή τις τάσεις των φάσεων, την ταχύτητα του δρομέα, την μαγνητική ροή εντός της μηχανής κ.α.), παρατηρεί, συγκρίνει και εκτιμά χαρακτηριστικά και κρίσιμα μεγέθη του συστήματος και μέσω ενός αλγόριθμου ελέγχου τροποποιεί, μέσω κατάλληλης παλμοδότησης των ηλεκτρονικών ισχύος, το πλάτος και τη συχνότητα της τάσης εισόδου της ηλεκτρικής μηχανής ώστε το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης να έχει την επιθυμητή απόκριση. Η κάθε μια από τις παραπάνω βαθμίδες απαιτείται να λειτουργεί με τη μέγιστη δυνατή απόδοση και την καλύτερη δυνατή συνεργασία με τις υπόλοιπες βαθμίδες έτσι ώστε το συνολικό σύστημα να λειτουργεί βέλτιστα. Η σύγχρονη τάση μάλιστα για συστήματα ηλεκτρικής κίνησης υψηλών απαιτήσεων προστάζει το συνολικό σχεδιασμό και

βελτιστοποίηση του συστήματος μετατροπέα–μηχανής–συστήματος ελέγχου, έτσι ώστε η αλληλεπίδρασή τους κατά τη λειτουργία να δίνει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

2.9 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό δόθηκε μια συνοπτική περιγραφή των πιο απαιτούμενων στην πράξη συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης. Όπως έγινε φανερό υπάρχουν πολλές και διαφορετικές δυνατότητες σχεδιασμού και ελέγχου ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης τις οποίες πρέπει να γνωρίζουμε στο αντικείμενο μας, ώστε να επιλεγεί πάντοτε εκείνη που είναι καταλληλότερη για την εκάστοτε εφαρμογή.

Ο σχεδιασμός ενός ολοκληρωμένου συστήματος ηλεκτρικής κίνησης ξεκινάει με την εξέταση του τύπου του φορτίου. Ακολούθως επιλέγεται ο κατάλληλης ισχύος και ροπής κινητήρας ανάλογα με το είδος της εφαρμογής και άλλους οικονομοτεχνικούς παράγοντες. Με βάση το είδος του κινητήρα και την ισχύ του επιλέγεται ο σωστός μετατροπέας και το κατάλληλο σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου για τον μετατροπέα αυτόν. Με τον όρο σύστημα ελέγχου αναφερόμαστε πλέον και στο υλικό και στο λογισμικό (αλγόριθμους) που αυτό περιέχει. Τέλος μετά τον σχεδιασμό έρχεται η υλοποίηση του συστήματος το οποίο θα πρέπει τελικά να λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές με τις οποίες σχεδιάστηκε.

Τα όσα αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής για τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης είναι ιδιαίτερα συνοπτικά και δόθηκαν για λόγους πληρότητας και για να αποκτήσει ο αναγνώστης μια γενική αίσθηση πάνω στο αντικείμενο.

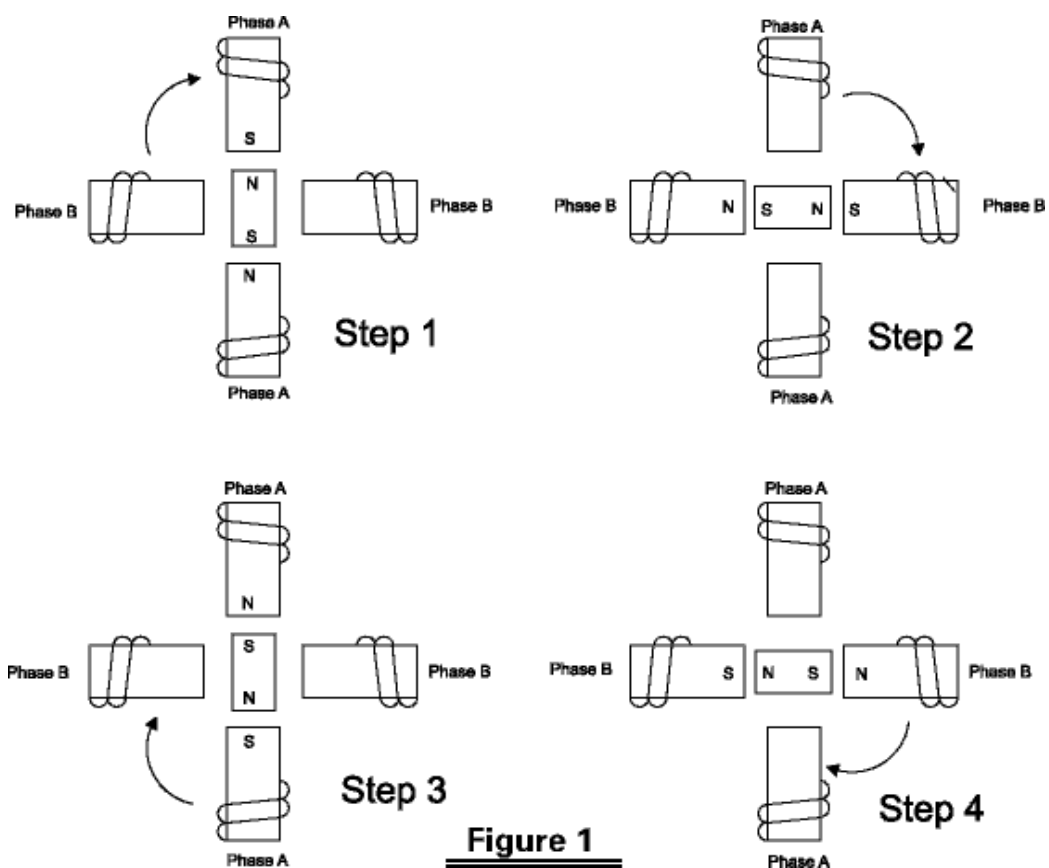
3. Βηματικοί κινητήρες

3.1 Εισαγωγή

Ο βηματικός κινητήρας ή αλλιώς παλμικός κινητήρας ,stepper motor, αποτελεί μία συσκευή ηλεκτρομηχανικής κίνησης η οποία μετατρέπει ψηφιακό σήμα σε μηχανική μετατόπιση - περιστροφή. Στην ουσία περιστρέφεται κατά μια διακριτή γωνία, βήμα, όταν ενεργοποιείται ηλεκτρικά. Ο ρότορας είναι ένας μόνιμος μαγνήτης και ο στάτης αποτελείται από τυλίγματα. Έχουν μεγάλο αριθμό ζευγών πόλων σε αντίθεση με τους άλλους κινητήρες. Η περιστροφική ροπή του ορίζεται από τη μαγνητική ενέργεια και είναι ανάλογη με τον αριθμό των «δοντιών» του ρότορα. Η κύρια διαφορά του μεταξύ ενός σύγχρονου κινητήρα είναι ότι ο βηματικός τροφοδοτείται μόνο από σταθερή τάση. Επιδεικνύει εξαιρετικές λειτουργίες όπως ακριβή οδήγηση, γρήγορη διακοπή και γρήγορη εκκίνηση. Παρέχει ελεγχόμενη ταχύτητα ή θέση και κινείται με παλμικό σήμα. Παρακάτω θα θέσουμε πιο αναλυτικά τι χαρακτηριστικά και τον τρόπο λειτουργίας που έχει ένα βηματικό μοτέρ.

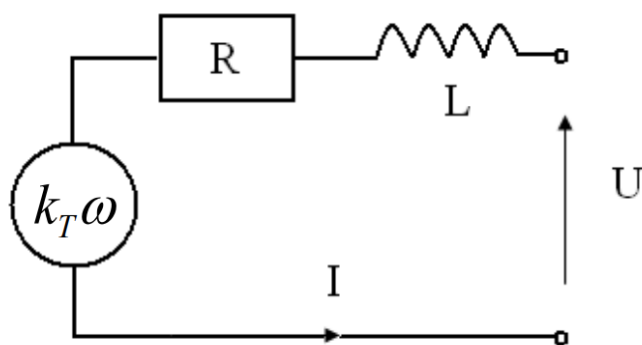
3.2 Δομή και αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα

Το βηματικό μοτέρ αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο άξονα με μόνιμους μαγνήτες, που ονομάζεται ρότορας και τους ηλεκτρομαγνήτες στο σταθερό τμήμα που περιβάλλει τον κινητήρα, που το ονομάζουμε στάτη. Ο ρότορας είναι είτε ένας μόνιμος μαγνήτης είτε ένας οδοντωτός κύλινδρος μαλακού μαγνητικού υλικού(παίρνοντας υπόψιν τις μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης). Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μία απλοποιημένη περιστροφή ενός βηματικού κινητήρα. Έχοντας υπόψιν μας το σχήμα 3.2 στην θέση 1, μπορούμε να διακρίνουμε ότι ο ρότορας ξεκινά στον άνω ηλεκτρομαγνήτη, ο οποίος είναι επί του παρόντος ενεργός (έχει εφαρμοστεί τάση σε αυτόν). Για να μετακινηθεί ο ρότορας δεξιόστροφα, ο επάνω μαγνήτης απενεργοποιείται και ενεργοποιείται ο επόμενος ηλεκτρομαγνήτης με αποτέλεσμα ο ρότορας να κινείται 90° δεξιόστροφα. Ευθυγραμμισμένος με τον ενεργό μαγνήτη. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο ακριβώς στους νότιους και δυτικούς ηλεκτρομαγνήτες μέχρι να επανέλθει στην αρχική του θέση.



Σχήμα 3.1 Απεικόνιση απλοποιημένης κίνησης βηματικού κινητήρα κατά 90°

Για να μπορέσουμε να καταλάβουμε τις κύριες παραμέτρους που διέπουν τους κινητήρες και τι τους επηρεάζει ακριβώς, είναι σημαντικό να έχουμε μία αρχική εικόνα της φυσικής που τους διέπει. Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε το ηλεκτρικό διάγραμμα ενός βηματικού κινητήρα που αντιπροσωπεύεται από έναν συντελεστή ταχύτητας ροπής $k_T\omega$, μια ηλεκτρική αντίσταση R , και μία αυτεπαγωγή L . Η εφαρμοζόμενη τάση U καθώς και το ρεύμα τυλίγματος I .



Σχήμα 3.2 Ηλεκτρικό διάγραμμα βηματικού κινητήρα

Ο κύριος τύπος που εκφράζει την συμπεριφορά του κινητήρα δίνεται από την εξίσωση[20]:

$$U = RI + k_T\omega(t) + L \frac{dI}{dt} \quad (19)$$

Όπου

- RI τάση κίνησης ρεύματος
- $k_T\omega(t)$ τάση αντιστάθμισης. Είναι η τάση που ανιχνεύεται όταν ο ρότορας κινείται σε ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο (k_T είναι η σταθερά ροπής και ω η γωνιακή ταχύτητα
- $L \frac{dI}{dt}$ τάση καθορισμού/ τροποποίησης του τρέχοντος ρεύματος

Η ροπή είναι άμεσα ανάλογη με το ρεύμα και μπορεί να εκφραστεί μέσω της εξίσωσης:

$$M = k_T I \quad (20)$$

Κατά συνέπεια το ρεύμα μπορεί να αφαιρεθεί από τον προηγούμενο τύπο και έτσι προκύπτει η εξίσωση:

$$I = \frac{U - k_T \omega(t) - L \frac{dI}{dt}}{R} \Rightarrow I = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-Rt/L} \right) - \frac{k_T \omega(t)}{R} \quad (21)$$

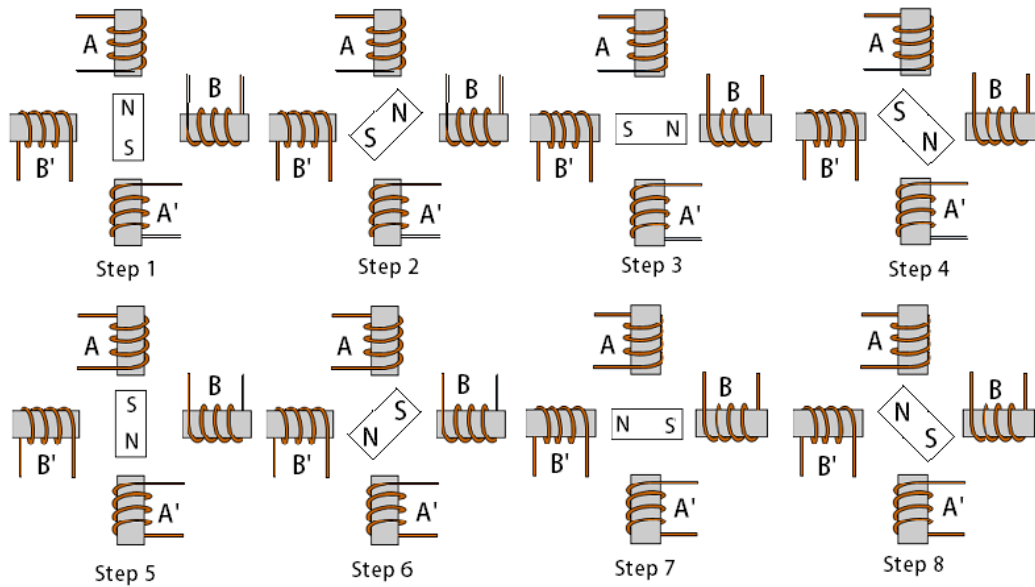
Στο συγκεκριμένο παράδειγμα χρησιμοποιήσαμε ένα κινητήρα με βήμα 90° μοιρών για σκοπό επίδειξης. Στην πραγματικότητα ο κινητήρας αυτός δεν θα ήταν αρκετά πρακτικός για το σύνολο των εφαρμογών. Η μέση ανάλυση ενός βηματικού κινητήρα, ο βαθμός περιστροφής του ανά παλμό, στην ουσία είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτό. Για παράδειγμα, ένας κινητήρας με ανάλυση 5° θα μετακινήσει τον δρομέα του 5° ανά βήμα απαιτώντας έτσι 72 παλμούς για να ολοκληρώσει μία πλήρη περιστροφή 360°. Για να επιτευχθεί το βήμα των 5° χρειάζεται στον ρότορα να έχουμε πολλούς μαγνήτες.

Μπορεί να διπλασιαστεί η ανάλυση ορισμένων κινητήρων με μία διαδικασία γνωστή ως half stepping. Αντί να ενεργοποιούμε τον επόμενο ηλεκτρομαγνήτη, ενεργοποιούνται δύο μαγνήτες προκαλώντας ισοδύναμη έλξη μεταξύ τους και ο ρότορας παραμένει στο μέσο αυτών των δύο μαγνητών οπότε διπλασιάζεται η ανάλυση. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και στο επόμενο σχήμα στην αρχική θέση, θέση Α, βλέπουμε ότι μόνο ο άνω ηλεκτρομαγνήτης είναι ενεργός και ο ρότορας τραβιέται πλήρως σε αυτόν. Στην επόμενη θέση, θέση Β, και οι δύο, βόρειος και δυτικός, ηλεκτρομαγνήτες είναι ενεργοί αναγκάζοντας τον ρότορα να τοποθετηθεί μεταξύ των 2 ενεργών πόλων. Τέλος στην θέση Α ο βόρειος ηλεκτρομαγνήτης απενεργοποιείται και ο ρότορας τραβιέται προς τα δυτικά. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί για μία πλήρη περιστροφή.

Το γωνιακό βήμα δίνεται από την έκφραση:

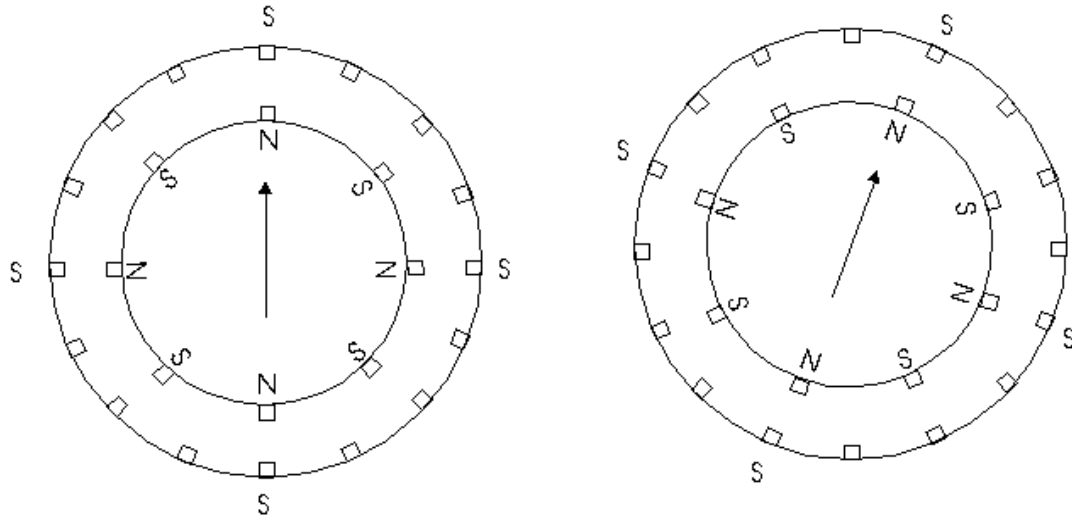
$$\text{Γωνιακό βήμα} = (360^\circ / \text{δόντια ρότορα}) * \text{αριθμός φάσεων στάτη}$$

Half Step Sequence

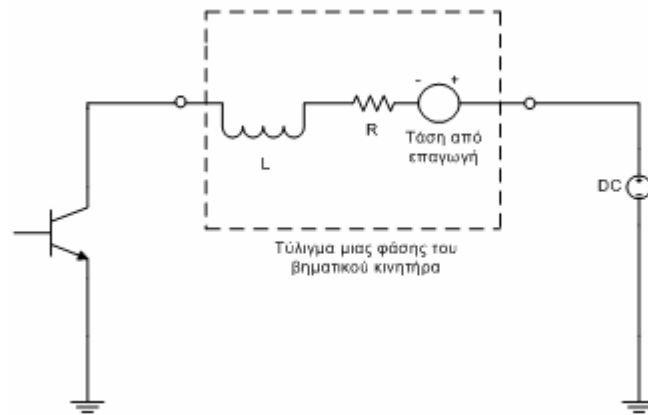


Σχήμα 3.3 Παράδειγμα βηματικού κινητήρα με μισό βήμα

Υπάρχουν διάφοροι τύποι βηματικών κινητήρων. Οι βηματικοί κινητήρες τεσσάρων ακροδεκτών περιέχουν μόνο 2 τυλίγματα τα οποία εναλλάσσονται δημιουργώντας έτσι πολλούς μαγνήτες διαφορετικών πόλων. Η λειτουργία τους χρειάζεται περισσότερο ηλεκτρονικά ούτως ώστε να αλλάξει η πολικότητα των μαγνητών. Επίσης υπάρχουν κινητήρες με έξι ακροδέκτες. Οι κινητήρες αυτοί είναι παρόμοιοι με τους προηγούμενους. Οι κινητήρες αυτοί έχουν διπλά τυλίγματα και με τον τρόπο αυτό τα ηλεκτρονικά κυκλώματα οδηγούν μία το ένα τύλιγμα μία το άλλο και με αυτόν τον τρόπο δεν χρειάζεται να αλλάξει η πολικότητα του ρεύματος στα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Αυτό προσφέρει μικρότερη πολυπλοκότητα στην διαδικασία οδήγησης τους. Η λειτουργία είναι ίδια με τον κινητήρα 90° που χρησιμοποιήθηκε στο 1^ο παράδειγμα. Ένα παράδειγμα ενός κινητήρα πολλαπλών πόλων φαίνεται στο επόμενο σχήμα - 3.4 . Στην θέση 1 ο βόρειος πόλος του μόνιμου μαγνήτη του ρότορα ευθυγραμμίζεται με τον νότιο πόλο του ηλεκτρομαγνήτη του στάτη. Σημειώνουμε ότι πολλές θέσεις ευθυγραμμίζονται ταυτόχρονα κατά την λειτουργία του κινητήρα. Στην θέση 2, ο άνω ηλεκτρομαγνήτης απενεργοποιείται και ο επόμενος στα αριστερά του ενεργοποιείται προκαλώντας την περιστροφή του ρότορα με ακρίβεια. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αφού ολοκληρωθούν 8 βήματα η ακολουθία επαναλαμβάνεται. Ο συγκεκριμένος κινητήρας που χρησιμοποιήσαμε στα παραδείγματα μας με 5° ανά βήμα έχει 6 καλώδια που βγαίνουν από το περίβλημά του. Αν ακολουθήσουμε το σχήμα 3.4 το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του βηματικού κινητήρα που παρουσιάζουμε, μπορούμε να δούμε ότι τα 3 καλώδια ακολουθούν το κάθε μισό των πηνίων και οι περιελίξεις των πηνίων συνδέονται σε ζεύγη. Αυτό ισχύει για όλους τους κινητήρες 4^{ov} φάσεων.



Σχήμα 3.4 Παράδειγμα βηματικού με ζεύγη πόλων.



Σχήμα 3.5 παράδειγμα σύνδεσης μίας φάσης βηματικών μοτέρ

3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα βηματικών κινητήρων

Οι χρήσιμες των βηματικών κινητήρων γενικότερα σε σχέση με τους σύγχρονους κινητήρες παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία παραθέτονται παρακάτω:

- Η ακρίβεια της κίνησης είναι υψηλή ακόμη και υπό έλεγχο ανοικτού βρόχου.
- Όταν χρησιμοποιείται σύστημα ανοικτού βρόχου η εξοικονόμηση στον αισθητήρα και στον ελεγκτή είναι μεγάλη.
- Είναι εύκολα προσαρμόσιμοι σε εφαρμογές ψηφιακού έλεγχου λόγω της αυξητικής φύσης, της εντολής και της κίνησης.
- Δεν υπάρχουν προβλήματα σταθερότητας ακόμη και υπό έλεγχο ανοικτού βρόχου.
- Η ροπή και οι απαιτήσεις ισχύος μπορούν να βελτιστοποιηθούν με την οδήγηση.
- Η απόκριση μπορεί να ελεγχθεί με ηλεκτρονική εναλλαγή.
- Προφανές πλεονέκτημα αποτελεί και η κατασκευή χωρίς ψήκτρες.

Παραθέτουμε εν συνεχεία και κάποια μειονεκτήματα των βηματικών κινητήρων όπως:

- Έχουν χαμηλή ροπή (συνήθως μικρότερη των 2.000 oz-in) σε σύγκριση με τους σύγχρονους κινητήρες συνεχούς ρεύματος.
- Έχουν περιορισμένη ταχύτητα, περιορίζεται λόγω της αδυναμίας υψηλής ροπής και προβλημάτων έλλειψης παλμών λόγω ελαττωματικών συστημάτων μεταγωγής και κυκλωμάτων οδήγησης.
- Μπορούν να δημιουργηθούν μεγάλα σφάλματα και μπορεί να προκύψουν ταλαντώσεις όταν χαθεί ένας παλμός σε ανοικτό βρόχο.
- Έχουν υψηλά επίπεδα δόνησης λόγω σταδιακής κίνησης.

3.4 Χαρακτηριστικές βηματικών κινητήρων

Το κεφάλαιο αυτό είναι αφιερωμένο στην μελέτη των χαρακτηριστικών των βηματικών μοτέρ οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε 2 κατηγορίες:

1. Στατικές
2. Δυναμικές

3.4.1 Βηματική γωνία και ακρίβεια

θ_s είναι η γωνία μέσω της οποίας ένας μη φορτωμένος βηματικός κινητήρας περιστρέφεται για κάθε βήμα της ενεργοποιημένης ακολουθίας. Καθορίζεται από τον αριθμό των «δοντιών» στον ρότορα και στον στάτη, καθώς επίσης και από τον αριθμό των βημάτων στην ενεργοποιημένη ακολουθία.

3.4.2 Βήματα/περιστροφή

Δίνεται από την σχέση:

$$Z = \frac{360^\circ}{\theta_s} \quad (22)$$

Για βηματικούς μόνιμου μαγνήτη ισχύει:

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{(N_r \cdot K_{ws})} = \frac{360^\circ}{Z} \quad (23)$$

Όπου

- N_r ο αριθμός οδοντών του ρότορα
- K_{ws} 4 στα 4 συχνότητα βημάτων (πχ για μονοφασικούς και διφασικούς), 8 στα 8 για μονοπολικούς ή διπολικούς υβριδικούς ακολουθία ενεργοποίησης ης περιέλιξης στου στάτη.

Για βηματικά μοτέρ μεταβλητής αντίστασης μονής στοίβας η γωνία βήματος εκφράζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$N_s = m \cdot p = N_r \pm p \quad (24)$$

$$Z = \frac{1}{\left| \left(\frac{1}{N_r} \right) - \left(\frac{1}{N_s} \right) \right|} = \frac{N_s \cdot N_r}{N_s + N_r} \quad (25)$$

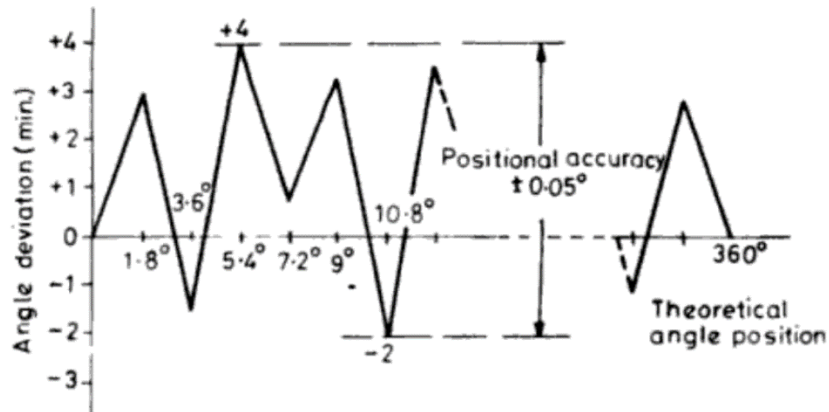
$$Z = p \cdot m(m - 1) \text{ για } N_s > N_r \quad (26)$$

$$p \cdot m(m + 1) \text{ για } N_s < N_r \quad (27)$$

όπου N_s ο αριθμός οδόντων του στάτη, m αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη γωνία βήματος.

Η ακρίβεια της γωνίας είναι περίπου $\pm 5\%$ του θ_s . Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να έχουμε και $\pm 3\%$. Η ακρίβεια καθορίζεται από τις ανοχές κατασκευής και τις ιδιότητες των μαγνητικών και άλλων υλικών που χρησιμοποιούνται.

Η τυπική καμπύλη ακρίβειας ενός βηματικού φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. Παρατηρούμε ότι το σφάλμα εντοπισμού δεν είναι αθροιστικό. Κατά συνέπεια, το σφάλμα τοποθέτησης στο τέλος του βήματος N θα είναι το ίδιο με αυτό για ένα μόνο βήμα $\pi\chi$ $\pm 5\%$ του θ_s . Περαιτέρω καθώς φορτώνεται ο κινητήρας, αυξάνεται το σφάλμα θέσης.



Σχήμα 3.6 ακρίβεια θέσης

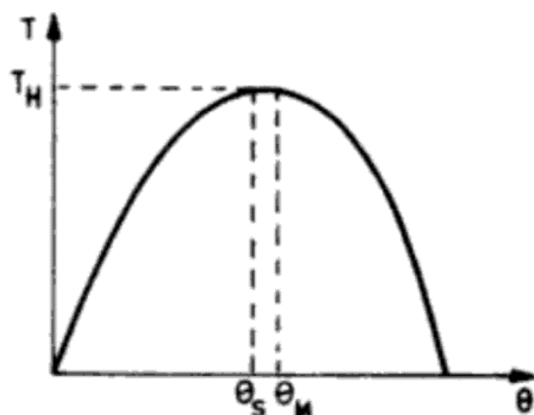
3.4.3 Στατικές χαρακτηριστικές

Δύο ενδιαφέρουσες χαρακτηριστικές που μπορούν να παρουσιαστούν είναι:

A) ροπής - καμπύλη γωνίας

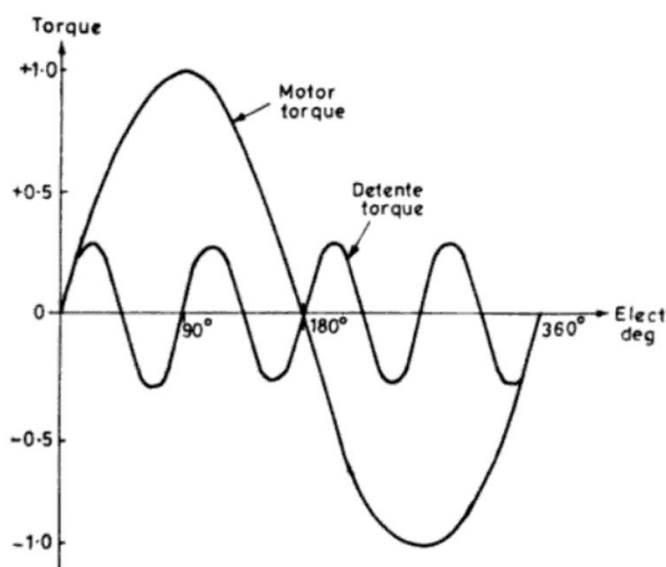
Διακρίνουμε από το σχήμα ότι η ροπή αυξάνεται, σχεδόν ημιτονοειδώς, με γωνία θ , από την θέση ισορροπίας.

Ροπή συγκράτησης T_H , είναι η μέγιστη ροπή φορτίου την οποία μπορεί να αντέξει ο κινητήρας όταν λειτουργεί χωρίς να χάσει την θέση ισορροπίας του. Σε περίπτωση υπέρβασης της συγκράτησης, ο κινητήρας γλιστρά από την παρούσα θέση ισορροπίας και πηγαίνει στην επόμενη.



Σχήμα 3.7 χαρακτηριστική ροπής – γωνίας

Ροπή στρέψης T_D , είναι η μέγιστη ροπή φορτίου που μπορεί να αντέξει ο κινητήρας όταν δεν λειτουργεί χωρίς ολίσθηση. Η ροπή στρέψης οφείλεται στον υπολειπόμενο μαγνητισμό και ως εκ τούτου διατίθεται σε κινητήρες μόνιμου μαγνήτη ή υβριδικούς. Είναι περίπου το 5 – 10%, της ροπής συγκράτησης και είναι μία τυπική τέταρτη αρμονική ροπή όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. Αλλιώς γνωστή ως βαρύνουσα ροπή στρέψης.

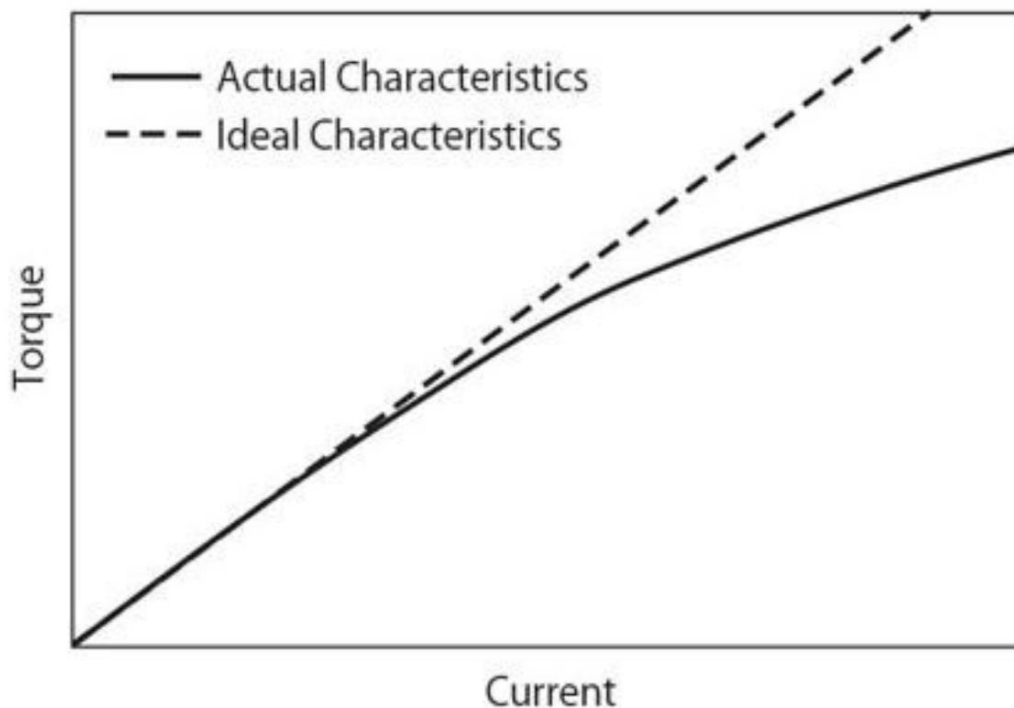


Σχήμα 3.8 Χαρακτηριστική ροπής στρέψης

Οι βηματικοί κινητήρες είναι πρακτικά φθηνοί λόγω του ότι ο ρότορας δεν περιέχει δακτυλίους ολίσθησης περιέλιξης ή μεταγωγέα. Ο ρότορας είναι ένα κυλινδρικό στερεό το οποίο μπορεί να έχει είτε προεξέχοντες πόλους είτε λεπτά «δόντια». Τις περισσότερες φορές ο ρότορας είναι ένας μόνιμος μαγνήτης. Τα πηνία του κινητήρα τυλίγονται μέσα σε πολυστρωματικό στάτη. Μπορεί να υπάρχουν 2 φάσεις περιέλιξης ή έως και 5. Αυτές χωρίζονται συχνά σε ζεύγη. Έτσι, ένας τετραπολικός βηματικός κινητήρας μπορεί να έχει 2 φάσεις που αποτελούνται από ζεύγη πόλων σε απόσταση 90° . Μπορεί επίσης να υπάρχουν πολλαπλά ζεύγη πόλων ανά φάση όπως είδαμε και σε προηγούμενα παραδείγματα. Για παράδειγμα ένας δωδεκαπολικός βηματικός κινητήρας έχει 6 ζεύγη πόλων 3 ζεύγη ανά φάση.

Επειδή οι βηματικοί κινητήρες δε περιστρέφονται απαραίτητα συνεχώς δεν υπάρχει βαθμολόγηση ιπποδύναμης. Ακόμα και αν δεχθούμε ότι περιστρέφονται δεν φθάνουν σε κλάσμα ίππου. Είναι πραγματικά μικρές συσκευές χαμηλής ισχύος σε σύγκριση με άλλους κινητήρες. Παραδείγματος χάριν υπάρχει ροπή τάξεως 1.000 oz-in ή 10 Nm σε έναν βηματικό κινητήρα 4^{ov} κιλών. Ένα μικρό βηματικό μοτέρ έχει ροπή ενός εκατοστού του Νιουτόμετρου. Τα περισσότερα βηματικά μοτέρ έχουν διάμετρο μερικές ίντσες. Η ροπή που διατίθεται είναι συνάρτησής της ταχύτητας του κινητήρα, της αδράνειας φορτίου, της ροπής φορτίου και των ηλεκτρονικών κίνησης όπως μπορούμε να δούμε και στην καμπύλη του σχήματος 3.9. Σε ένα σημείο βήματος η ροπή συγκράτησης έχει σχετικά υψηλή τιμή. Η ροπή συγκράτησης μειώνεται τείνοντας προς το μηδέν αυξάνοντας την ταχύτητα. Η μέγιστη ταχύτητα δεν επιτυγχάνεται συχνά λόγω μηχανικού συντονισμού που μπορεί να προκληθεί στον κινητήρα.

Η χαρακτηριστική της ροπής και του ρεύματος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Είναι μία τυπική καμπύλη ροπής ρεύματος και όπως παρατηρούμε η καμπύλη είναι αρχικά γραμμική, αλλά αργότερα, η κλίση της μειώνεται προοδευτικά καθώς το μαγνητικό κύκλωμα του κινητήρα φτάνει σε κορεσμό.



Σχήμα 3.9 Χαρακτηριστική Ροπής-ρεύματος

3.4.4 Δυναμικές χαρακτηριστικές

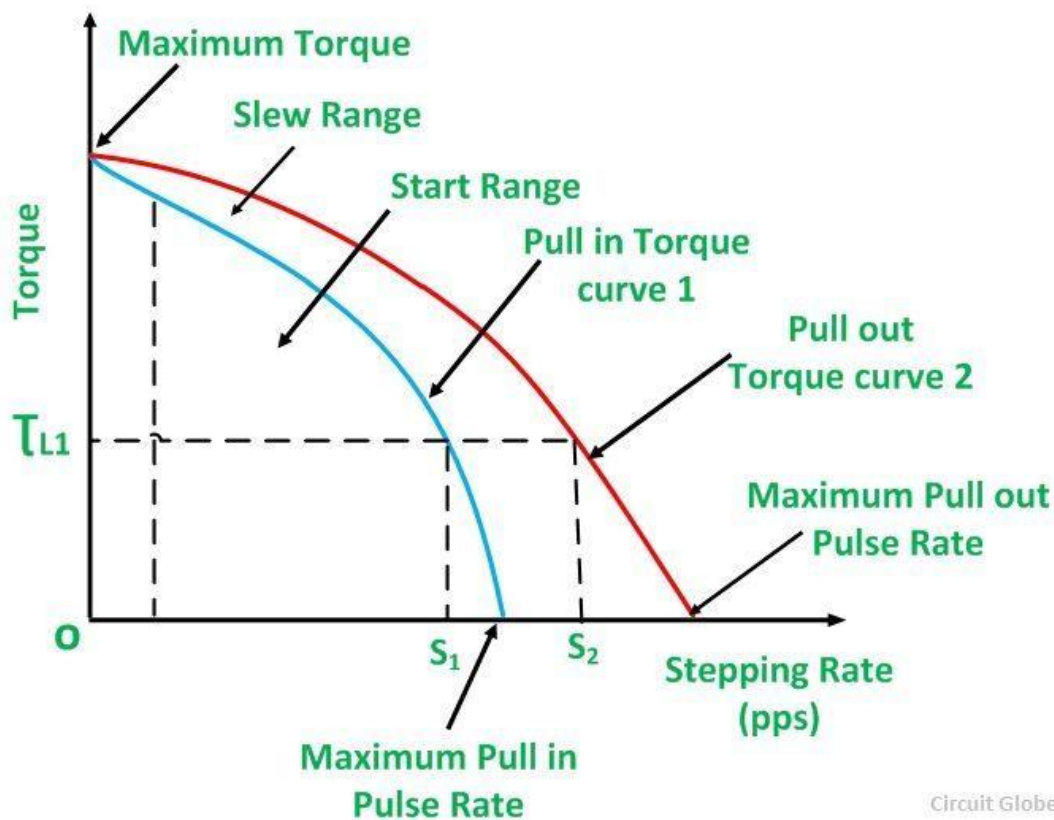
Η ταχύτητα βηματισμού εκφράζεται σε βήματα ανά λεπτό (spm) ή σε βήματα ανά δευτερόλεπτα (sps). Ο μέγιστος αριθμός (sps) είναι αντιστρόφως ανάλογος της ροπής φορτίου και της αδράνειας του συστήματος. Έτσι λοιπόν ο κινητήρας μπορεί να οδηγηθεί σε δύο λειτουργικές καταστάσεις.

1. Την λειτουργική κατάσταση εκκίνησης – ακινητοποίησης
2. Την λειτουργική κατάσταση συνεχόμενης περιστροφικής κίνησης, χωρίς εκκίνηση – ακινητοποίηση.

Στο σχήμα 3.10 διακρίνουμε τις χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας για τις δύο προαναφερθείσες λειτουργικές καταστάσεις. Στην καμπύλη 1 (μπλε) βλέπουμε την κατάσταση εκκίνησης – ακινητοποίησης, στην καμπύλη 2 (κόκκινη) βλέπουμε την ίδια κατάσταση λειτουργίας αλλά με αυξημένη φόρτιση του κινητήρα.

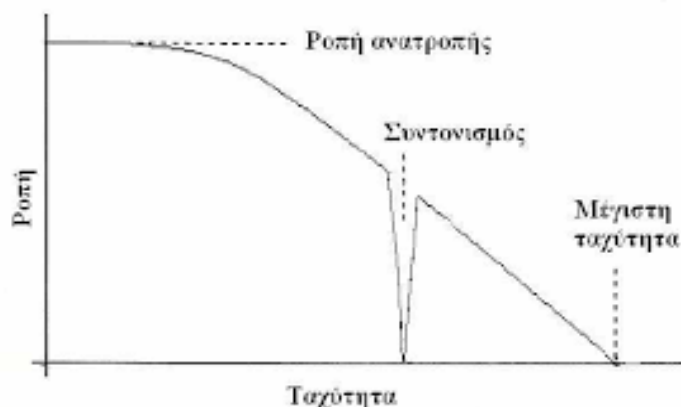
Σε συνεχόμενη περιστροφική κίνηση ο κινητήρας έχει αυξημένη ικανότητα ροπής. Κατά την επιτάχυνση και την επιβράδυνση του κινητήρα έχουμε αύξηση ή μείωση αντίστοιχα των παλμών τροφοδοσίας ανά δευτερόλεπτο. Έτσι έχουμε την λεγόμενη οδήγηση σε ράμπα.

Εν συνεχεία στο σχήμα 3.10 έχουμε δύο διαφορετικές χαρακτηριστικές και τι συμβαίνει στο πλαίσιο λειτουργίας του κινητήρα κατά τον αποσυγχρονισμό και τον συγχρονισμό.



Σχήμα 3.10 Χαρακτηριστικές ροπής στροφών βηματικού κινητήρα

Το διάγραμμα ροπής ταχύτητας του σχήματος 3.10 χωρίζεται σε δύο περιοχές. Στην 1^η περιοχή την περιοχή ελέγχου όπου ο κινητήρας μπορεί να εκκινήσει, να σταματήσει ή να αλλάξει φορά με 1 παλμό μόνο. Ο κινητήρας επίσης σε αυτήν την περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν διάταξη ελέγχου θέσης ανοιχτού βρόχου. Στην 2^η περιοχή, την περιοχή ταχύτητας ο κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει αφού επιταχυνθεί από την 1^η. Υπάρχει περιστροφή χωρίς αποσυγχρονισμό αλλά δεν μπορεί να σταματήσει ή και να αλλάξει φορά λειτουργίας. Για να συμβεί αυτό πρέπει να μεταβεί πάλι στην 1^η περιοχή.



Σχήμα 3.11 Καμπύλη συντονισμού μέσης συχνότητας

Στο σχήμα 3.11 παρατηρούμε ότι υπάρχει ένα σημείο συντονισμού το οποίο προέρχεται από μηχανικό συντονισμό και έχει παρατηρηθεί από πειράματα. Από πρακτική εμπειρία η καμπύλη έλξης ενός βηματικού κινητήρα βυθίζεται ξαφνικά πολύ χαμηλά σε ένα συγκεκριμένο εύρος ρυθμών βηματισμού όπως φαίνεται στο σχήμα. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως συντονισμός μέσης συχνότητας. Είναι μια εκδήλωση αστάθειας της λειτουργίας του κινητήρα. Έχει αναλυθεί από διάφορους ερευνητές χωρίς ωστόσο να έχει προσδιοριστεί συγκεκριμένος λόγος. Θα ήταν καλύτερα να αποφεύγεται κατά την επιλογή ταχύτητας λειτουργίας του κινητήρα[14].

Ηλεκτρική σταθερά χρόνου (T_e)

$$T_e = \frac{L_m}{R_m} \quad (28)$$

Όπου L_m, R_m είναι η επαγωγή και η αντίσταση της περιέλιξης του κινητήρα. Το T_e εκφράζει τον ρυθμό αύξησης του ρεύματος, όταν είναι ενεργοποιημένο το τύλιγμα του κινητήρα και επίσης τον ρυθμό εξασθένισης αυτού.

Σταθερά χρόνου κινητήρα (T_m)

$$T_m = \frac{J}{K_e \frac{K_r}{R_m}} = \frac{J R_m}{K_e K_t} \quad (29)$$

Όπου J η αδράνεια του κινητήρα $kg \cdot m^2$, R_m η αντίσταση της περιέλιξης του κινητήρα (ohms), K_e επιστροφόμενη ηλεκτρομαγνητική σταθερά (volts*sec/rad) και K_t σταθερά ροπής (N_m/A)

Αρχική επιτάχυνση (α_o)

$$\alpha_o = \frac{T}{J} \text{ (rad/s}^2\text{)} \quad (30)$$

Όπου T ονομαστική ροπή (N_m), J αδράνεια ($kg \cdot m^2$). Δίνει μια ποσοτική ιδέα για το πόσο γρήγορα επιταχύνεται ο κινητήρας στην τελική του ταχύτητα ή θέση. Μεγιστοποίηση κλήσεων για καλό σχεδιασμό μαγνητικού κυκλώματος για παραγωγή υψηλής ροπής, σε συνδυασμό με καλό μηχανικό σχεδιασμό για την ελαχιστοποίηση της αδράνειας του ρότορα.

Σταθερά κινητήρα (K_m)

$$K_m = \frac{T}{\sqrt{W}} \quad (31)$$

$$K_m = \frac{T}{\sqrt{W}} = K_t \frac{I}{I \sqrt{I^2 R}} = \sqrt{\frac{K_e^2}{R}} = \sqrt{K_t K_e / R} \quad (32)$$

Ρυθμός ισχύος

$$\frac{dP}{dt} = \frac{d}{dt} \left(T \cdot \frac{d\theta}{dt} \right) = T \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{T^2}{J} \quad (33)$$

Για $T = K_t I$ έχω:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{k_t^2 I^2}{J} \cdot \frac{R_m}{Rm} = \frac{k_t^2}{JR_m} \cdot I^2 \cdot R_m = \frac{I^2 R_m}{Tm} \quad (34)$$

Όπου $\overline{T_m} = \frac{JRm}{k_t^2} = \frac{JRm}{k_e J_t} =$ σταθερά κινητήρα

Στατική ακαμψία (S)

Είναι το μέτρο της ικανότητας του να παραμένει σταθερός ο βηματικός κινητήρας στην θέση του.

$$S = \text{torque/rad} \quad (35)$$

Σχετίζεται με την φυσική συχνότητα ταλαντώσεων, την αδράνεια, την στατική ροπή και τον αριθμό των πόλων.

$$\omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{J}} \quad (36)$$

Όπου ω_n , η φυσική συχνότητα

$$S = 4\pi^2 \cdot \omega_n^2 \cdot J = T \cdot N \quad (37)$$

Εναλλακτικά το S μπορεί επίσης να οριστεί ως η κλίση της στατικής ροπής και τις γωνίας της καμπύλης που περνά από τις 0° .

Εύρος ζώνης (BW)

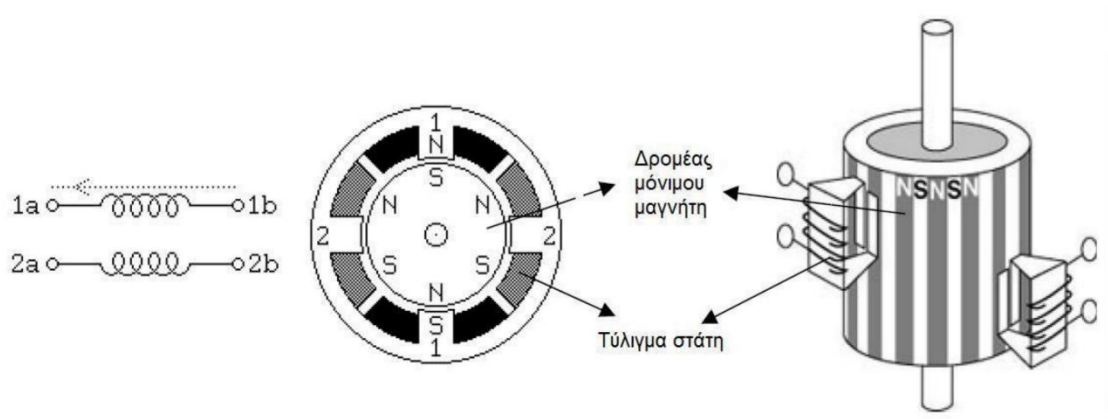
Είναι ένα μέτρο των συχνοτήτων στις οποίες μπορεί να ανταποκριθεί ο βηματικός κινητήρας. Συνήθως ο βηματικός κινητήρας έχει μικρότερο εύρος ζώνης από αυτό των υπόλοιπων κινητήρων. Το εύρος ζώνης είναι συνήθως 60-80% της φυσικής συχνότητας ω_n .

4. Είδη βηματικών κινητήρων

4.1 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη

Οι βηματικοί κινητήρες που στο ρότορα χρησιμοποιούν ένα μόνιμο μαγνήτη καλούνται βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Ο ρότορας του κινητήρα του μόνιμου μαγνήτη αποτελείται από κυλινδρικούς τομείς μόνιμων μαγνητών. Οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν πόλους που τείνουν να ευθυγραμμίζονται με το πεδίο πόλων του στάτη. Οι μόνιμοι μαγνήτες ευθυγραμμίζουν τον κινητήρα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται κατά την ώρα της λειτουργίας του. Αν υπάρξει μικρή διαταραχή ο ρότορας επανέρχεται σε θέση ισορροπίας. Κατασκευαστικά και μόνο δεν επιτρέπει μικρά βήματα. Ένα χαρακτηριστικό που συναντάμε μόνο στους βηματικούς κινητήρες μόνιμου μαγνήτη είναι ότι η φορά περιστροφής τους αλλάζει εάν αλλάξει η φορά του ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη.

Η λειτουργία τους βασίζεται στην αντίδραση που έχει ο ρότορας μόνιμου μαγνήτη σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Στο παρακάτω σχήμα έχουμε ένα παράδειγμα ενός κινητήρα μόνιμου μαγνήτη.



Σχήμα 4.1 Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη

Ο αριθμός των βημάτων ανά κύκλο του ρότορα υπολογίζεται από την σχέση:

$$S = 2 * n * m \quad (38)$$

Όπου n είναι ο αριθμός των ζευγών πόλων του ρότορα και ο αριθμός των φάσεων του στάτη. Για τους υβριδικούς κινητήρες το n είναι μισό από τον αριθμό των «δοντιών» του ρότορα.

Η γωνία βήματος εκφράζεται από την σχέση:

$$\Delta\Phi = \frac{360}{s} \quad (39)$$

Αν χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα για κατανόηση έναν διφασικό βηματικό μόνιμου μαγνήτη το $n=1$ και το $m=2$. Οπότε θα έχουμε 4 βήματα/ κύκλο με γωνία 90° . Εάν υποτεθεί ημιτονοειδές χαρακτηριστικό του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο αέρα, η συνεισφορά κάθε φάσης j στην ροπή του κινητήρα TM_j μπορεί να γραφτεί ως:

$$TM_j = km * \sin[n\phi(t) + \phi_{0j}] * I_j(t) \quad (40)$$

όπου

K_m είναι η σταθερά του κινητήρα εξαρτώμενη από τα κατασκευαστικά του χαρακτηριστικά και τον σχεδιασμό

- $\Phi(t)$ είναι η πραγματική θέση του ρότορα
- Φ_{0j} είναι η θέση του πηνίου j στον στάτη
- $I_j(t)$ είναι το ενεργοποιημένο πηνίο στην χρονική στιγμή t .

Το ρεύμα $I_j(t)$ στο πηνίο είναι συνάρτηση της παρεχόμενης τάσης U_j και των ιδιοτήτων του πηνίου. Μία γενική εξίσωση του U_j και του $I_j(t)$ είναι[20]:

$$U_j = emf_j + R * I(t) + L \frac{dI(t)}{dt} \quad (41)$$

Όπου

- emf_j η ηλεκτροκινητική δύναμη που προκαλείται στη φάση j
- R η αντίσταση των τυλιγμάτων
- L η αυτεπαγωγή των πηνίων

Το emf σε κάθε πηνίο μπορεί να εκφραστεί ως:

$$eme_{mf_i} = k \cdot \sin[n\phi(t) + \phi_{0j}] \omega \quad (42)$$

Όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα.

Η αντίσταση και η αυτεπαγωγή των πηνίων και τυλιγμάτων του κινητήρα είναι η ίδια, ώστε να μην απαιτούνται δείκτες. Η διαφορική εξίσωση μπορεί να εκφραστεί σε μετασχηματισμό Laplace ως:

$$I = \frac{U}{L_s + R} \quad (43)$$

Η συνολική ροπή που παράγεται από τον κινητήρα είναι:

$$T_M = \sum_{j=1}^m T_{Mj} \quad (44)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση της κίνησης του βηματικού κινητήρα έχουμε:

$$\sum_{j=1}^m T_{Mj} = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_F \quad (45)$$

Όπου

- J η αδράνεια του ρότορα και του φορτίου
- D η σταθερά απόσβεσης
- T_F Η ροπή τριβής φορτίου

Η συνολική ροπή επιτάχυνσης του φορτίου είναι:

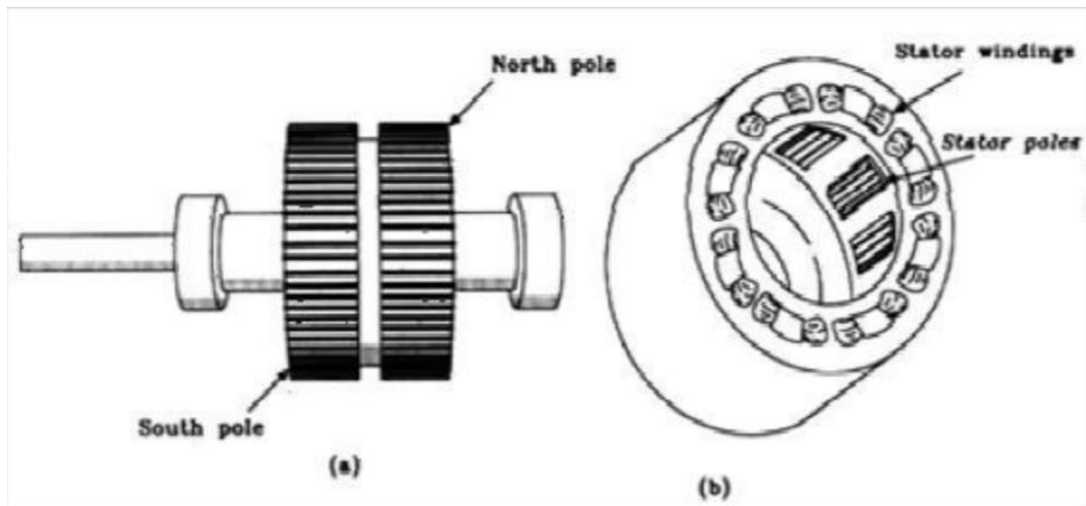
$$T_A = \sum_{j=1}^m T_{Mj} - D\omega - T_F \quad (46)$$

Για περισσότερες από μία φάσεις πρέπει να λάβουμε υπόψη μας την διάταξη των πηνίων. Η θέση των πηνίων του στάτη ως συνάρτηση του αριθμού των φάσεων m δίνεται στον πίνακα παρακάτω:

No of phases m	2	3	4
α of phase 1	0	0	0
α of phase 2	90	60	45
α of phase 3	-	120	90
α of phase 4	-	-	135

Πίνακας 1 Φάσεις του κινητήρα

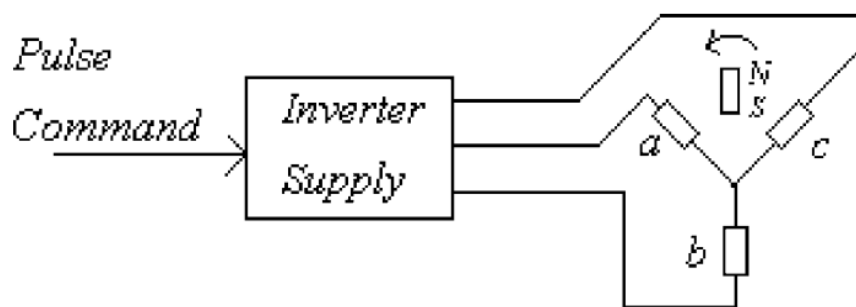
Εάν μειώσουμε τις γωνίες του βήματος τείνοντας τους στο μηδέν, στην χαρακτηριστική γωνίας ροπής, αυτό το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση άλλων τύπων μηχανών πχ. Κινητήρες DC χωρίς ψήκτες.



Σχήμα 4.2 Βηματικός κινητήρας διπολικός μόνιμου μαγνήτη

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο σχήμα 4.2 ο ρότορας έχει «δόντια» το ίδιο και ο στάτης. Τα «δόντια» στον ρότορα είναι αντίθετα σε σχέση με του στάτη ώστε να υπάρχει ένας συγκεκριμένος αριθμός δοντιών που να ευθυγραμμίζονται κάθε φορά με τον ενεργοποιημένο πόλο του στάτη. Μέσω των δοντιών καθορίζεται και η σωστή γωνία βήματος με την οποία κινείται ο βηματικός κινητήρας όταν αλλάζει η πολικότητα των τυλιγμάτων. Όσο μεγαλύτερο αριθμό δοντιών έχουμε τόσο μικρότερη γωνία βήματος θα προκύπτει.

Η συγκρατούμενη ροπή ορίζεται ως την συνολική ροπή που απαιτείται από τον ρότορα ώστε να κινηθεί ένα ολόκληρο βήμα όταν ο στάτης είναι ενεργοποιημένος αντίστοιχα. Χαρακτηριστικό των βηματικών κινητήρων μόνιμου μαγνήτη είναι ότι έχουν την δυνατότητα συγκράτησης ροπής αμετάβλητη όταν ο ρότορας είναι ακινητοποιημένος. Όταν δεν έχουμε παροχή τάσης στα τυλίγματα υπάρχει μία μικρή μαγνητική δύναμη ορισμένη ως παραμένουσα ροπή η οποία αναπτύσσεται ανάμεσα στον μόνιμο μαγνήτη και τον στάτη. Μπορεί να παρατηρηθεί όταν στραφεί ο βηματικός κινητήρας με το χέρι και είναι περίπου το $1/10^\circ$ της συγκρατούμενης ροπής.



Σχήμα 4.3 διάγραμμα βηματικού τριφασικού μόνιμου μαγνήτη

Για να κάνουμε μια προσέγγιση του μοντέλου ενός βηματικού κινητήρα χρησιμοποιούμε την αρχή λειτουργίας τριφασικού κινητήρα με ρότορα μόνιμης μαγνήτισης. Ο συγκεκριμένος κινητήρας έχει την ίδια αρχή λειτουργίας με τους σύγχρονους κινητήρες. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την σωστή του απόδοση είναι βασισμένο σε

σύστημα $q - d$ και στον μετασχηματισμό Park και Krause. Σύμφωνα με τον Ahmad M. Harb[19]:

Οι συναρτήσεις τάσεων είναι:

$$v_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} - M \frac{di_b}{dt} - M \frac{di_c}{dt} + \frac{d\lambda_{ma}}{dt} \quad (47)$$

$$v_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} - M \frac{di_a}{dt} - M \frac{di_c}{dt} + \frac{d\lambda_{mb}}{dt} \quad (48)$$

$$v_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} - M \frac{di_a}{dt} - M \frac{di_b}{dt} + \frac{d\lambda_{mc}}{dt} \quad (49)$$

Όπου R, L η αντίσταση και η επαγωγή των τυλιγμάτων αντίστοιχα, M η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των περιελίξεων και λ_{ij} , οι σύνδεσμοι ροής των φάσεων που οφείλονται στον μόνιμο μαγνήτη:

$$\lambda_{ma} = \lambda_1 \sin(N\theta) \quad (50)$$

$$\lambda_{mb} = \lambda_1 \sin(N\theta - 2\pi/3) \quad (51)$$

$$\lambda_{mc} = \lambda_1 \sin(N\theta + 2\pi/3) \quad (52)$$

Όπου N ο αριθμός «δοντιών» του ρότορα και λ_1 η μέγιστη τιμή των συνδέσεων ροής. Με βάση τον μετασχηματισμό Park, η μήτρα μετασχηματισμού $a - b - c$ τριφασικού συστήματος όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3 σε $q - d - 0$ σύστημα αξόνων με το μέσο d κεντραρισμένο μαγνητικά στο κέντρο του βόρειου πόλου και το τετράγωνο της ευθείας q να προηγείται 90° δίνεται από[21][22][23]:

$$P = \frac{2}{3} \begin{cases} \cos(N\theta) \cos(N\theta - 2\pi/3) \cos(N\theta + 2\pi/3) \\ \sin(N\theta) \sin(N\theta - 2\pi/3) \sin(N\theta + 2\pi/3) \\ \frac{3}{2} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{3}{2} \end{cases} \quad (53)$$

$$V_{abc} = PV_{dqo} \quad (54)$$

Αντικαθιστώντας όλες τις σχέσεις στην τελευταία έχουμε συμμετρία ($i_a + i_b + i_c = 0$) και έχουμε:

$$V_d = R i_d + L_1 \frac{d i_d}{dt} - N L_1 i_q \omega \quad (55)$$

$$V_q = R i_q + L_1 \frac{d i_q}{dt} - N L_1 i_d \omega + N \lambda_1 \omega \quad (56)$$

Όπου $L_1 = L + M$, και ω η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα.

Οι εξισώσεις κίνησης και ροπής δίνονται από:

$$T = \frac{3}{2} N \lambda_1 i_q \quad (57)$$

$$J \omega + B_f \omega = T - T_L \quad (58)$$

$$\delta = \omega - \omega_0 \quad (59)$$

Όπου B_f είναι ο συντελεστής ιξώδους τριβής, ω_0 η σύγχρονη ταχύτητα ρότορα (σταθερή κατάσταση), T_L ροπή φορτίου, δ γωνία φορτίου, J σταθερά αδράνειας και $\omega_0 = \frac{\omega_1}{N}$. Υποθέτοντας ότι το V_m είναι η μέγιστη τάση, οι τάσεις εισόδου έχουν την μορφή:

$$u_d = V_m \sin(N\delta) \quad (60)$$

$$u_q = V_m \cos(N\delta) \quad (61)$$

Τέλος από τις τελευταίες εξισώσεις το μαθηματικό μοντέλο τριφασικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη μπορεί να αναπαρασταθεί σε μορφή διανύσματος κατάστασης χρησιμοποιώντας 4 μη γραμμικές συνήθεις διαφορικές εξισώσεις ως εξής:

$$\dot{x}_1 = \frac{v_m}{L_1} \cos(Nx_4) - \frac{R}{L_1} x_1 - Nx_2 x_3 - \frac{N\lambda_1}{L_1} x_3 \quad (62)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{v_m}{L_1} \sin(Nx_4) - \frac{R}{L_1} x_2 + Nx_1 x_3 \quad (63)$$

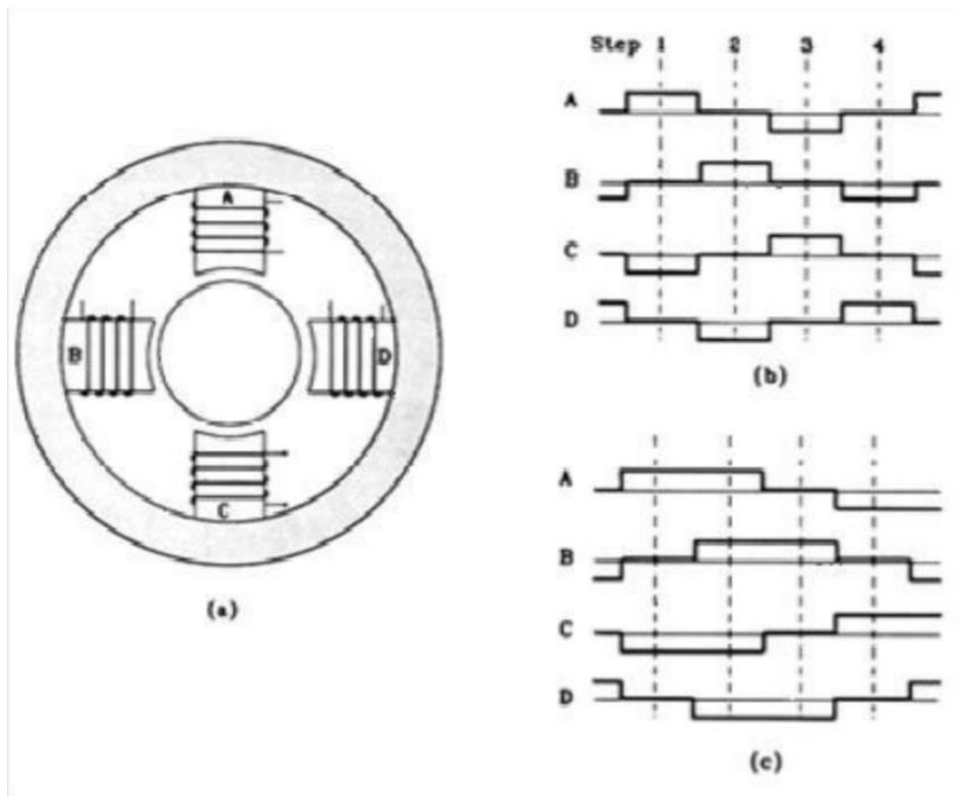
$$\dot{x}_3 = \frac{3N\lambda_1}{2J} x_1 - \frac{B_f}{J} x_3 - \frac{T_L}{J} \quad (64)$$

$$\dot{x}_4 = x_3 - \omega_0 \quad (65)$$

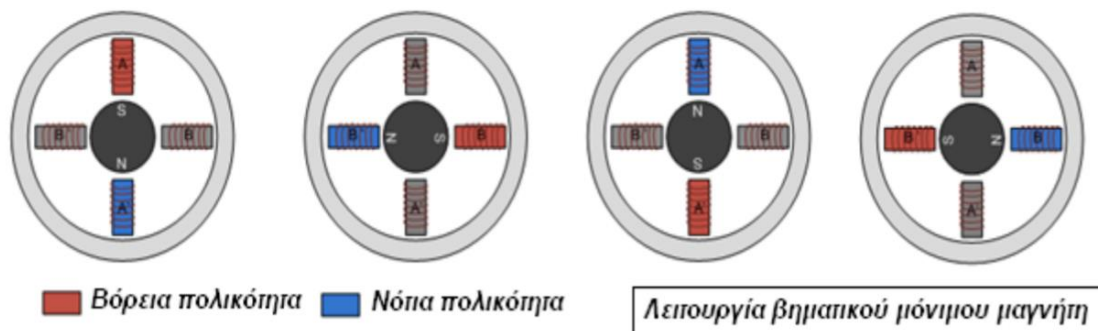
όπου $x_1 = i_q$, $x_2 = i_d$, $x_3 = \omega$, $x_4 = \delta$

4.1.1 Παράδειγμα βηματικού κινητήρα τεσσάρων τυλιγμάτων

Στην συγκεκριμένη περίπτωση 4^{ωv} τυλιγμάτων στάτη τροφοδοτώντας τα άκρα του στάτη με κατάλληλη ακολουθία παλμών μπορεί να ελεγχθεί η ταχύτητα και η φορά στρέψης του κινητήρα. Παρακάτω βλέπουμε ένα κινητήρα με 4 τυλίγματα στάτη.



Σχήμα 4.4 Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη 4^{ων} τυλιγμάτων στάτη



Σχήμα 4.5 Λειτουργία βηματικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη

4.2 Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (Variable Reluctance Motors)

Οι βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης συναντιούνται στις περισσότερες εφαρμογές καθώς είναι η πιο διαδεδομένη κατηγορία κινητήρων. Οι συγκεκριμένοι κινητήρες δεν έχουν ούτε παραμένουσα ροπή ούτε υπάρχει μόνιμος μαγνήτης στον ρότορα. Όταν τα τυλίγματα του στάτη ενεργοποιούνται τα δόντια που βρίσκονται στην επιφάνεια του ρότορα ευθυγραμμίζονται με τους ενεργοποιημένους πόλους του στάτη. Ο βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης λειτουργεί με βάση την αρχή της ελάχιστης μαγνητικής αντίστασης πάνω στο εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό επιτυγχάνεται διότι κατασκευαστικά ο στάτης και ο ρότορας αποτελούνται από τοποθετημένα στρώματα πυριτίου χάλυβα. Τα υλικά του στάτη και του ρότορα έχουν υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και είναι ικανά για υψηλή μαγνητική ροή για να περάσουν ακόμα και αν υπάρχει μία αμυδρή μαγνητική δύναμη.

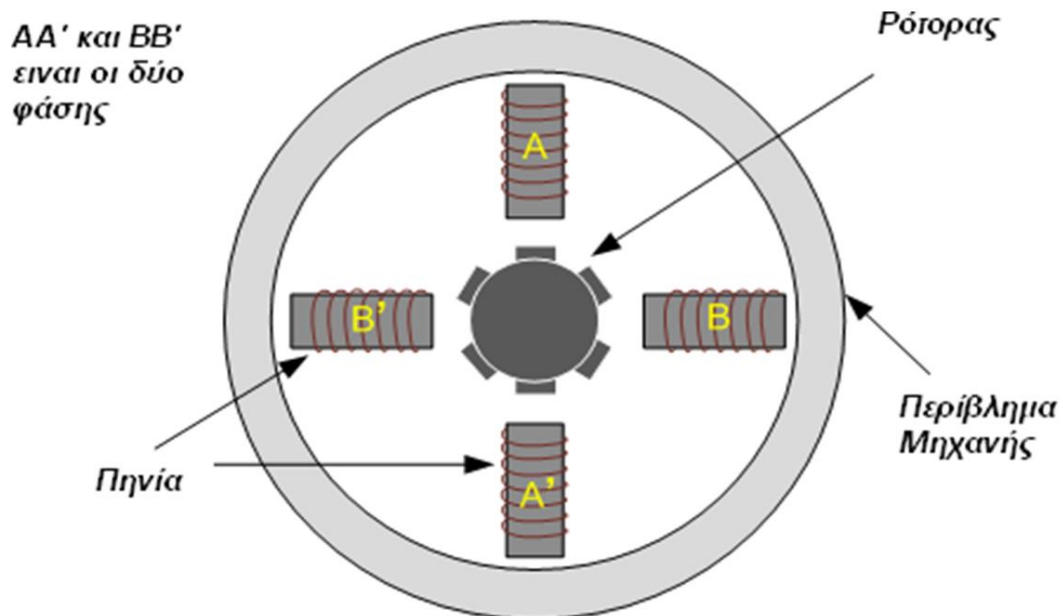
Ο ρότορας/δρομέα κατασκευάζεται ως ενιαία μονάδα, που υποστηρίζεται από ρουλεμάν σε κάθε άκρο της μηχανής και περιλαμβάνει άξονα προβολής για την σύνδεση των εξωτερικών φορτίων. Ο ρότορας έχει έκτυπους πόλους όπου είναι διαφορετικό πλήθος από αυτών του στάτη. Ο ρότορας περιστρέφεται από την διέγερση του τυλίγματος του κατάλληλου δοντιού με αποτέλεσμα ορισμένο ζεύγος οδόντων να ευθυγραμμισθεί με τους πόλους του ενεργοποιημένου τυλίγματος. Αυτό λοιπόν έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της μαγνητικής αντίστασης όπως προαναφέραμε.

Η σχέση που ισχύει μεταξύ γωνίας βήματος, «δοντιών» του ρότορα και «δοντιών» του στάτη εκφράζεται ως εξής.:

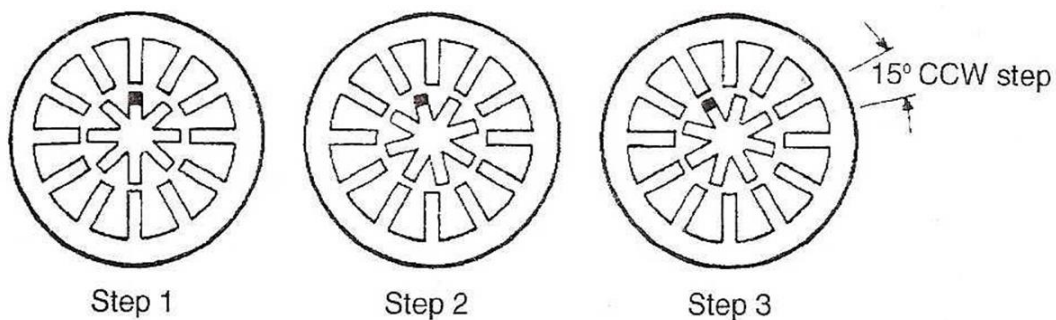
$$\Psi = \left\{ \begin{array}{l} N_s - N_r \\ N_s * N_r \end{array} \right. * 360 \circ$$

Όπου:

- Ψ = γωνία βήματος
- N_r = αριθμός «δοντιών» του ρότορα (πυρήνα)
- N_s = αριθμός «δοντιών» του στάτη



Σχήμα 4.6 Οι οδοντώσεις του ρότορα είναι κατασκευασμένοι ώστε όταν ευθυγραμμίζονται με μια φάση τότε να είναι ευθυγραμμισμένοι μεταξύ τους.

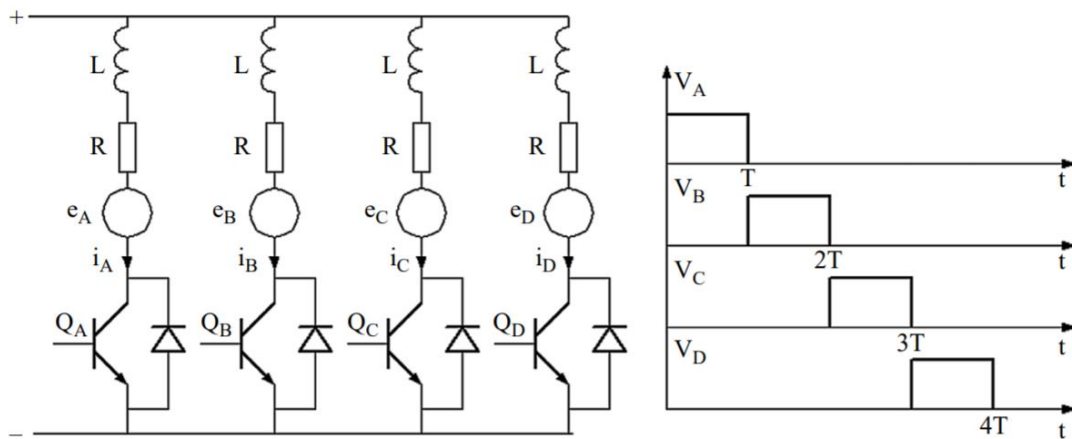


Σχήμα 4.7 Παράδειγμα βηματισμού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στο σχήμα 4.7 έχουμε βήμα περιστροφής 15° . Ο ρότορας διακρίνεται μέσω του σχήματος ότι έχει 8 οδοντώσεις και ο στάτης έχει 12 πόλους. Στην ουσία κάθε ένα από τα τυλίγματα τυλίγεται γύρω από πόλους οι οποίοι βρίσκονται απέναντι του. Όταν υπάρχει τροφοδοσία του 1^{ου} τυλίγματος οι οδοντώσεις του ρότορα έλκονται από το διεγερμένο τύλιγμα. Αυτή η έλξη προκύπτει από το δημιουργούμενο μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος. Ο ρότορας λοιπόν περιστρέφεται καθώς βρίσκεται μέσα στο εφαρμοζόμενο πεδίο και αναπτύσσονται

πάνω σε αυτόν δυνάμεις που προκαλούν ροπή. Αν σταματήσει η τροφοδοσία στο παρών διεγερμένο τύλιγμα και αναπτυχθεί στο 2^ο τύλιγμα οι οδοντώσεις του ρότορα θα οδηγήσουν στην μεταξύ τους έλξη από το αντίστοιχο τύλιγμα. Άρα ο ρότορας θα περιστραφεί 15°. Με συνεχή διαδοχική ενεργοποίηση των τυλιγμάτων με τη σειρά θα έχουμε συνεχή περιστροφή του κινητήρα.

Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε το κύκλωμα του κινητήρα με προκαθορισμένες καταστάσεις μεταγωγής και την ακολουθία των κυματομορφών τάσης.



Σχήμα 4.8 Ηλεκτρικό διάγραμμα και κυματομορφή βηματικού κινητήρα μαγνητικής αντίστασης

Το μοντέλο πεδίου του κινητήρα περιγράφεται από το μαγνητικό δυναμικό. Οι εξισώσεις που περιγράφουν το μαγνητικό πεδίο είναι γραμμένες σε σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων. Στην περιοχή του στάτη η εξίσωση πεδίου[5] (Henrotte et al., 2004; De Oliveira et al., 2004) μπορεί να αναπαρασταθεί ως:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) - j = 0 \quad (66)$$

A είναι το μαγνητικό δυναμικό, μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα και j είναι η πυκνότητα του ρεύματος της περιέλιξης.

Η εξίσωση κυκλώματος φάσης στάτη για τον περιγραφόμενο κινητήρα είναι:

$$\frac{d}{dt} \oint_{l_s} A dl = u_s - R i_s \quad (67)$$

Όπου το $s=1$ έως 4 και υποδηλώνει τον αριθμό φάσεων, R η αντίσταση τυλιγμάτων μίας φάσης, I το ρεύμα φάσης και u η τάση τροφοδοσίας.

Η μετατόπιση του ρότορα αξιολογείται με λύση της μηχανικής εξίσωσης κίνησης και ορίζεται για ένα βαθμό ελευθερίας του συστήματος:

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} = T \quad (68)$$

Όπου θ η μετατόπιση του ρότορα, J η αδράνεια του ρότορα, b ο συντελεστής απόσβεσης, $T = T_E - T_L$ η διαφορά μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της ροπής φορτίου.

Προσεγγίζοντας την 1^η σχέση προέρχεται από το σύστημα εξίσωσης μήτρας, όπου οι λειτουργίες αντιστάθμισης είναι ίδιες με τις λειτουργίες σχήματος. Η λύση της 1^{ης} εξίσωσης επιτυγχάνεται ελαχιστοποιώντας την αντίστοιχη ενεργειακή λειτουργία. Η ελαχιστοποίηση εκτελείται μέσω της μεθόδου πεπερασμένου στοιχείου χρησιμοποιώντας κυλινδρικά στοιχεία 1^{ης} τάξης 27 κόμβων. Το δυναμικό μαγνητικού φορέα εκφράζεται:

$$A = \sum_{i=1}^{27} N_i A_i \quad (69)$$

Όπου N_i είναι οι συναρτήσεις στοιχείου από το σχήμα και το A_i είναι οι προσεγγίσεις του διανύσματος δυναμικού στους κόμβους των στοιχείων. Η εισαγωγή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων με όριο τιμής του προβλήματος και την σύζευξη του μοντέλου ηλεκτρικού κυκλώματος δίνει το ακόλουθο σύστημα εξίσωσης μαγνητικού πεδίου:

$$\begin{bmatrix} C & E \\ F & R \\ \Delta t & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^{t+\Delta t} \\ I^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ U^{t+\Delta t} + \frac{F}{\Delta t} A^t \end{bmatrix}$$

Όπου:

- A αντιπροσωπεύει το διάνυσμα των αγνώστων φορέα.
- I αντιπροσωπεύει το διάνυσμα των αγνώστων ρευμάτων φάσης
- C αντιπροσωπεύει τον συμμετρικό πίνακα του μαγνητικού πεδίου
- R αντιπροσωπεύει τον διαγώνιο πίνακα των αντιστάσεων περιέλιξης
- E αντιπροσωπεύει τον πίνακα που αφορά τα ρεύματα περιέλιξης
- F αντιπροσωπεύει τον πίνακα ροής σύνδεσης
- U αντιπροσωπεύει το διάνυσμα ελέγχου τάσης

Το σύστημα εξισώσεων κυκλώματος πεδίου λύνεται με πεπερασμένα στοιχεία. Η γωνιακή ταχύτητα και η μετατόπιση του ρότορα βρίσκονται με την λύση της περιστροφικής

εξίσωσης κίνησης. Η διακριτή ταχύτητα του ρότορα ν και η μετατόπιση Q προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας την αντίστροφη εξίσωση Euler για την εξίσωση κίνησης:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{1} & -\Delta t \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} + \Delta t \frac{b}{j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^{t+\Delta t} \\ \boldsymbol{\omega}^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^t \\ \boldsymbol{\omega}^t + \Delta t \frac{1}{j} \mathbf{T}^{t+\Delta t} \end{bmatrix}$$

Συνήθως για την επίλυση των εξισώσεων λύνουμε το σύστημα σε συγκεκριμένα σταθερά σημεία.

Η δύναμη αξιολογείται κατά μήκος μίας επιφάνειας στο διάκενο γύρω από τον ρότορα. Η ροπή δίνεται από την σχέση :

$$\mathbf{T} = \oint \{ \mathbf{r} \times \mathbf{P} \} dS \quad (70)$$

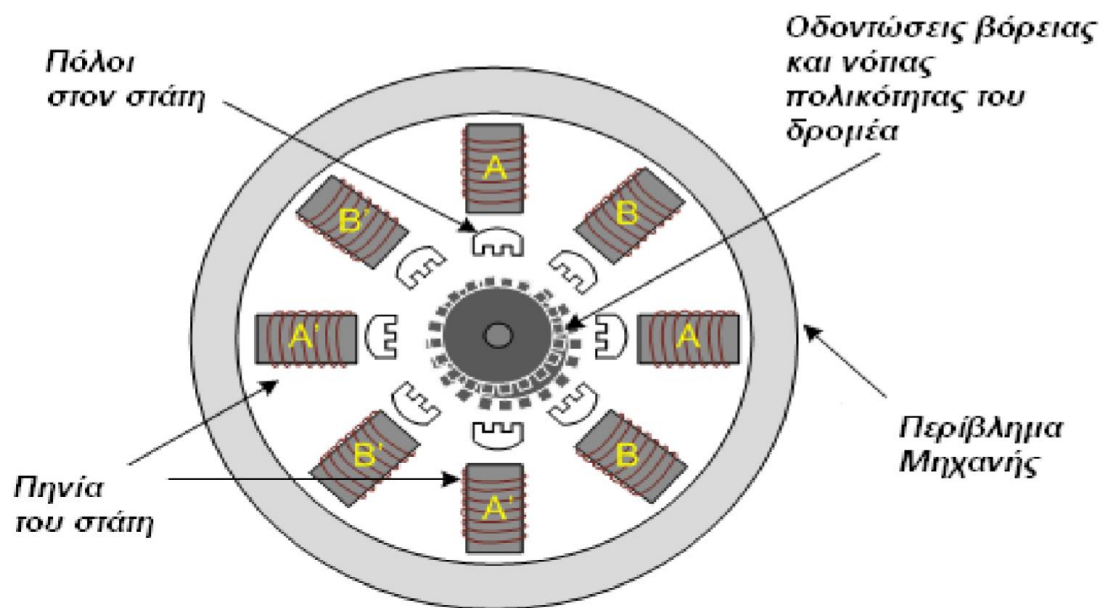
Όπου \mathbf{r} το σημείο του χώρου, \mathbf{P} το διάνυσμα ροπής πάνω στον ρότορα, το διάνυσμα της επιφάνειας dS για την ολοκλήρωση. Για τον υπολογισμό της εξίσωσης κίνησης μόνο στο z-στοιχείο χρησιμοποιείται η ροπή ως: $T = [0 \ 0 \ T]^T$

4.3 Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες

Οι υβριδικοί κινητήρες είναι οι πλέον διαδεδομένοι κινητήρες σε βιομηχανικές εφαρμογές. Οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες συνδυάζουν και παρουσιάζουν τα κύρια χαρακτηριστικά που συναντήσαμε στις προηγούμενες δύο κατηγορίες βηματικών κινητήρων όπου από εκεί προκύπτει και το όνομα τους. Αποτελούνται από 2 κομμάτια μαλακού σιδήρου. Ο ρότορας/δρομέας αποτελείται από μόνιμους μαγνήτες σε κυλινδρικό σχήμα όπως στους βηματικούς μόνιμου μαγνήτη. Στα άκρα των μαγνητών προσαρμόζονται τμήματα με μορφή «δοντιών» από μαλακό ατσάλι. Λόγω του ενδιάμεσου μαγνήτη αυτά προσανατολίζονται και μετατρέπονται σε βόρειο και νότιο πόλο. Ο ρότορας αποτελείται από ζεύγη τμημάτων και όντας μόνιμος μαγνήτης υπάρχει πάντα κάποια ροπή συγκράτησης.

Ο στάτης εντούτοις έχει έκτυπους πόλους ή οδόντες και τα τυλίγματα του είναι συνεχή κατά μήκος του άξονα. Η διαφορά του υβριδικού στάτη με του μεταβλητής αντίστασης στάτη είναι ότι στον μεταβλητής αντίστασης στάτη μόνο το ένα από τα δύο τυλίγματα μίας φάσης είναι τυλιγμένα σε έναν πόλο ενώ ένα τυπικός υβριδικός κινητήρας έχει τυλίγματα δύο διαφορετικών φάσεων τυλιγμένα στον ίδιο πόλο. Αυτά λοιπόν είναι τυλιγμένα σε έναν σχηματισμό που ονομάζουμε bifilar. Η ροπή στρέψης δημιουργείται σε ένα υβριδικό βηματικό μοτέρ λόγω της αλληλεπίδρασης του μαγνητικού πεδίου του μόνιμου μαγνήτη και του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τον στάτη.

Διφασικός Υβριδικός Κινητήρας



Σχήμα 4.9 Υβριδικός βηματικός κινητήρας

Το ηλεκτρομηχανικό μοντέλο των διφασικών υβριδικών κινητήρων μπορεί να αποκτηθεί αν ακολουθήσουμε το επόμενο σετ διαφορικών εξισώσεων και εκφράζεται ως εξής:

$$L \frac{di_a}{dt} = -Ri_a + k_m \omega \sin(N_r \theta) + v_a \quad (71)$$

$$L \frac{di_b}{dt} = -Ri_b + k_m \omega \sin(N_r \theta) + v_b \quad (72)$$

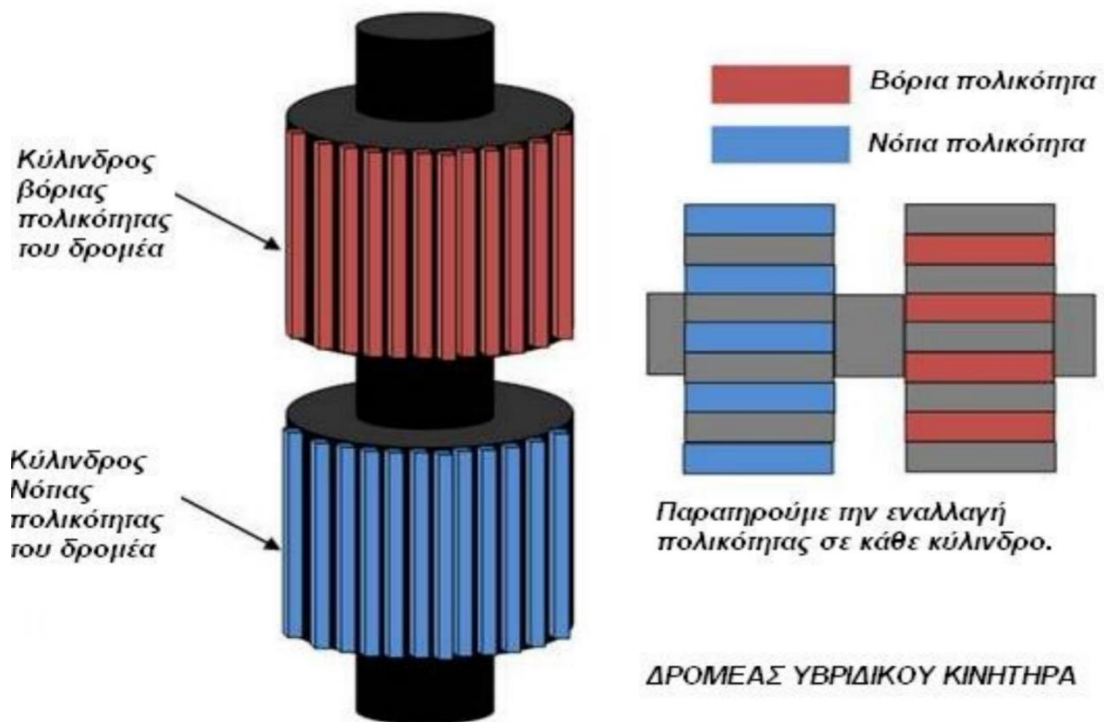
$$J \frac{d\omega}{dt} = -i_a k_m \sin(N_r \theta) + i_b k_m \cos(N_r \theta) - \tau_L \quad (73)$$

Όπου:

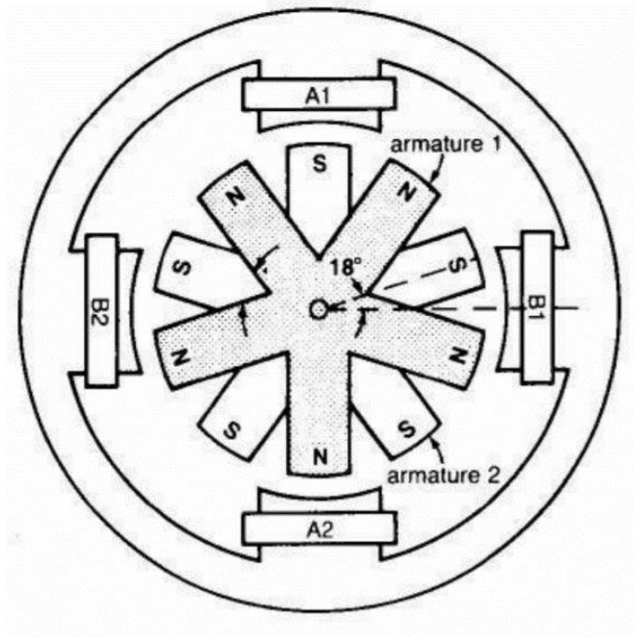
- i_a, i_b, v_a, v_b είναι τα ρεύματα και οι τάσεις στις φάσεις A και B αντίστοιχα
- k_m η σταθερά ροπής του κινητήρα
- ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του ρότορα
- N_r ο αριθμός οδόντων του ρότορα
- θ η γωνία θέσης του ρότορα

- L, R οι αντιστάσεις και αυτεπαγωγές σε κάθε φάση των τυλιγμάτων
- τ_L το φορτίο ροπής του κινητήρα

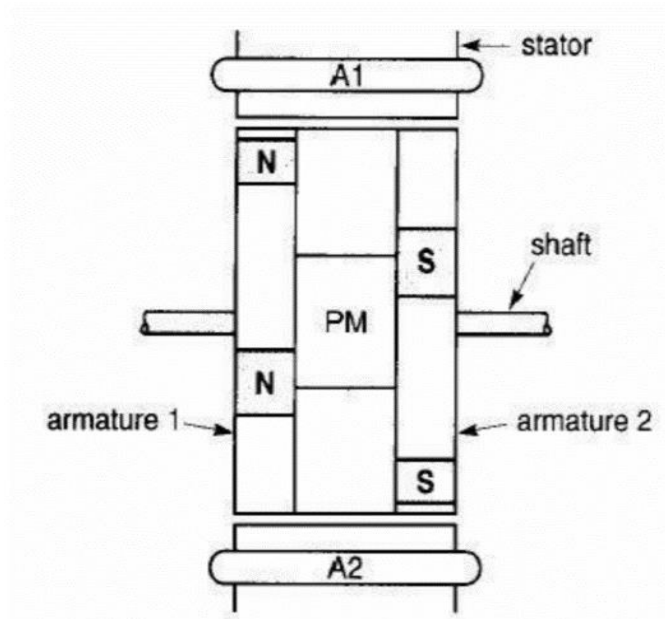
Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να παρατηρήσουμε την δομή του ρότορα/δρομέα ενός υβριδικού βηματικού κινητήρα. Παρατηρούμε τους προσανατολισμένους πόλους που προαναφέραμε βόρειο και νότιο πόλο.



Σχήμα 4.10 Δομή ρότορα υβριδικού βηματικού κινητήρα



Σχήμα 4.11 Υβριδικός βηματικός κινητήρας προσανατολισμός ρότορα/στάτη



Σχήμα 4.12 Δομή στάτη Υβριδικού βηματικού κινητήρα

5. Βηματισμός και διέγερση βηματικού κινητήρα

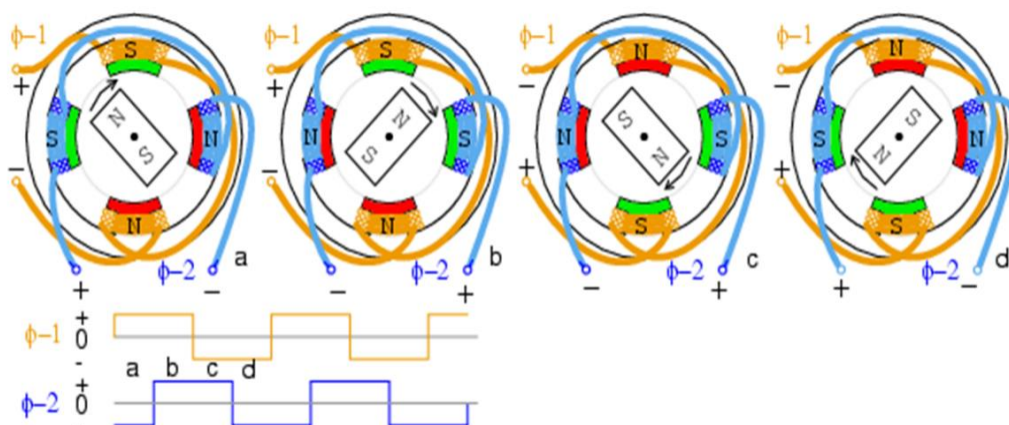
Γενικότερα σαν αρχή λειτουργίας οι βηματικοί κινητήρες έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν με 3 τρόπους ως διέγερση.

- 1) Πλήρους βήματος (full - step)
- 2) Μισού βήματος (half-stepping)
- 3) Μικρό βήμα (micro-stepping)

5.1 Πλήρες βήμα

Υπάρχουν 2 είδη πλήρους βήματος, βήμα μίας φάσης και βήμα δύο φάσεων.

Όταν έχουμε λειτουργία μίας φάσης η λειτουργία του κινητήρα επιτυγχάνεται με μία φάση ενεργοποιημένη την φορά. Ο τρόπος αυτός χρησιμοποιείται όταν η ταχύτητα και η ροπή δεν είναι σημαντικές. Όταν ο κινητήρας πρέπει να λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα και οι το φορτίο είναι καλά προσδιορισμένο. Η λειτουργία σε κάποιες ταχύτητες μπορεί να παρεμποδιστεί από προβλήματα στον συντονισμό. Για παράδειγμα ο κινητήρας με γωνία 1.8° εκτελεί 200 συνολικά βήματα για μία πλήρη περιστροφή 360° . Η διαδικασία μίας φάσης επίσης έχει μικρότερη κατανάλωση ισχύος. Όταν ο κινητήρας λειτουργεί με βήμα δύο φάσεων είναι διεγερμένες ταυτόχρονα και οι δύο φάσεις. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι ο κινητήρας εμφανίζει μεγαλύτερη ροπή στρέψης περίπου 30-40% αύξηση, ενώ σαν μειονέκτημα μπορούμε να αναφέρουμε την διπλάσια κατανάλωση ισχύος περίπου.



Σχήμα 5.1 πλήρες βήμα διπολικού βηματικού κινητήρα

#Step	ΦΑΣΗ ΥΠΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗ			
	A+	B+	A-	B-
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

Πίνακας 1 Διέγερση μίας φάσης πλήρους βήματος

#Step	ΦΑΣΗ ΥΠΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗ			
	A+	B+	A-	B-
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

Πίνακας 2 Διέγερση δύο φάσεων πλήρους βήματος

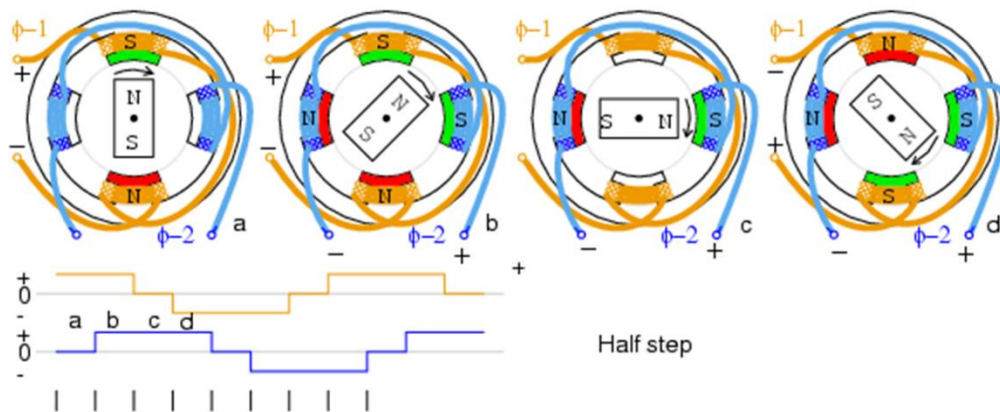
5.2 Μισό βήμα (half stepping)

Η κίνηση μισού βήματος προκύπτει από την εναλλαγή των διεγέρσεων μίας φάσης και δύο φάσεων και φέρει ως αποτέλεσμα τον υποδιπλασιασμό ένας γωνία βήματος σε σχέση με την γωνία που προκύπτει από ένας προαναφερόμενους τρόπους διέγερσης. Στην περίπτωση αυτή ο κινητήρας χρειάζεται το διπλάσιο αριθμό βημάτων για μία πλήρη περιστροφή 360°. Ως αποτέλεσμα αποτελεί η καλύτερη ποιότητα περιστροφής και η πιο ομαλή λειτουργία του κινητήρα. Ωστόσο σαν μειονέκτημα αξίζει να σημειωθεί η μικρότερη ροπή στρέψης. Η ακρίβεια στον έλεγχο ένας τελικής θέσης παραμένει η ίδια. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν χρειάζεται να γίνει αντικατάσταση στα ηλεκτρονικά του οδηγού. Ένας βηματικός κινητήρας χρειάζεται διπλό βηματισμό σε αυτή τη μέθοδο, πχ αν μία περιστροφή προκαλείται με βήμα 7.5° τότε με λειτουργία μισού βήματος θα χρειαστούμε 96 παλμούς για μία περιστροφή. Έτσι ο κάθε παλμός θα κινεί τον ρότορα κατά 3.75°.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας διέγερσης μισού βήματος.

#Step	ΦΑΣΗ ΥΠΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗ			
	A+	B+	A-	B-
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1

Πίνακας 3 Διέγερση μισού βήματος



Σχήμα 5.2 Λειτουργία μισού βήματος διπολικού βηματικού κινητήρα

Στο σχήμα 5.2 μπορούμε να διακρίνουμε την λειτουργία μισού βήματος και πως ο ρότορας προσανατολίζεται ανάλογα με την διέγερση του στάτη.

5.3 Μικροβηματισμός (Microstepping)

Ο μικροβηματισμός είναι σχετικά μία νέα τεχνολογία στην διέγερση βηματικών κινητήρων. Έχουμε λοιπόν την δυνατότητα να ελέγξουμε με ηλεκτρονικό τρόπο τα ρεύματα των τυλιγμάτων του στάτη και δίνουμε παλμούς μέσω ενός μικροεπεξεργαστή επιτυγχάνοντας έτσι υποπολλαπλασιασμό του βήματος. Μέσω αυτής της τεχνικής έχουμε την δυνατότητα να οδηγήσουμε τον ρότορα/δρομέα σε 1/256 του βήματος του κινητήρα. Έτσι μπορούμε να έχουμε πάνω από 50.000 βήματα ανά περιστροφή. Αποσκοπούμε στην ομαλότερη περιστροφή του κινητήρα. Στην πραγματικότητα δεν μπορεί να σταματήσει σε αυτά τα βήματα αλλά μέχρι το μισό βήμα όπως περιγράψαμε νωρίτερα. Λόγω της φύσης του κινητήρα η περιστροφή δεν είναι τελείως ομαλή αλλά γίνεται σταδιακά περιορίζοντας έτσι τη χρήση του. Μιλώντας με

γωνίες μία δεδομένη γωνία 1.8° ο κινητήρας έχει 200 βήματα ανά περιστροφή. Αν ο κινητήρας έχει μικροβηματισμό με διαρέτη 10 τότε το κάθε μικροβήμα αγγίζει τις 0.18° και θα έχει 2.000 βήματα ανά περιστροφή. Αν έχει μικροβηματισμό με διαρέτη 256 αγγίζει τα 51.200 βήματα ανά περιστροφή με γωνία 1.8° αρχική. Παράγεται από την αναλογία ρεύματος στα 2 τυλίγματα σύμφωνα με το ημίτονο και το συνημίτονο του επιβαλλομένου ρεύματος. Με τον μικροβηματισμό μπορούμε επίσης να επιτύχουμε την μέγιστη ακρίβεια.

Ένας τρόπος να μπορέσουμε να παρακάμψουμε τα προβλήματα που σχετίζονται με τον βηματικό κινητήρα διατηρώντας τα πλεονεκτήματα του ανοικτού βρόχου είναι να χρησιμοποιήσουμε λοιπόν την μικροβηματική λειτουργία. Σε αυτήν την λειτουργία κάθε ένα από τα βήματα υποδιαιρείται σε μικρότερα βήματα. Για παράδειγμα αν χωρίσουμε ένα βήμα σε τέσσερα μικροβήματα και εφαρμόσουμε τα αντίστοιχα ρεύματα στις δύο φάσεις του κινητήρα δημιουργείται ένα βήμα, δηλαδή ο κινητήρας θα έχει ευθυγραμμισθεί στον επόμενο μαγνήτη – θέση. Αυτή τη μετάβαση κατά μία θέση την ονομάζουμε κύκλο ροπής. Αν ο κινητήρας είναι παρόμοιος με αυτόν που έχουμε δείξει στα προηγούμενα σχήματα πχ να έχει βήμα 90° το βήμα θα έχει υποδιαιρεθεί σε τμήματα των 22.5° η ο κινητήρας θα κινείται $(22.5^\circ/90^\circ)100= 25\%$ ενός πλήρους βήματος.

Ένας κοινός τρόπος για τον έλεγχο της γωνίας της φάσης της ροπής είναι εφαρμόζοντας στις δύο περιοδικές κυματομορφές της φάσης του κινητήρα μετατοπισμένες κατά 90° ηλεκτρικές.

Έστω οι τρέχουσες εξισώσεις φάσης[33]:

$$\begin{cases} i_a = I_o \cos\theta_e \\ i_b = I_o \sin\theta_e \end{cases} \quad (74)$$

Όπου θ_e είναι η ηλεκτρική θέση και I_o είναι το ρεύμα ανά φάση

Η προκύπτουσα ροπή που παράγεται από τις αντίστοιχες φάσεις θα είναι:

$$\begin{cases} M_A = K_m i_A = K_m I_o \cos\theta_e \\ M_B = K_m i_B = K_m I_o \sin\theta_e \end{cases} \quad (75)$$

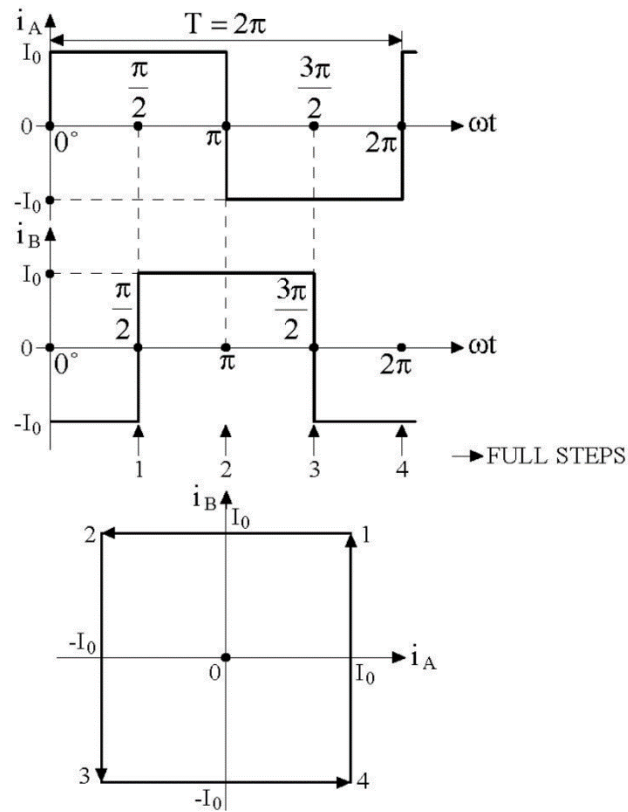
Όπου K_m είναι η σταθερά ροπής του κινητήρα.

Αντικαθιστώντας την 1^η σχέση στην 2^η και κάνοντας άθροισμα διανυσμάτων, τα προκύπτοντα συνολικά παραγόμενα μέτρα ροπής στον άξονα του κινητήρα δίνονται από:

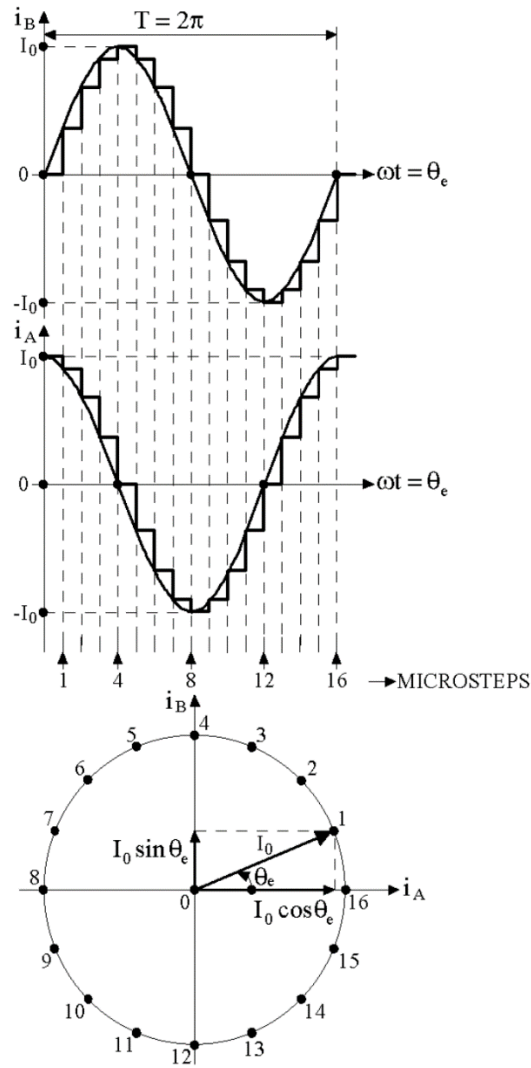
$$M_0 = \sqrt{M_A^2 + M_B^2} = K_m I_o \quad (76)$$

Χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνική κάποιος μπορεί θεωρητικά να επιτύχει απεριόριστη ανάλυση με οποιοδήποτε βηματικό κινητήρα. Δεδομένου ότι οι κυματομορφές

ρεύματος κίνησης είναι ημιτονοειδείς αντί για τετράγωνα, οι ταλαντώσεις βήμα προς βήμα εξαλείφονται και η απότομη μεταβολή της ταχύτητας. Αυτό βελτιώνει σημαντικά την απόδοση σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής και βοηθά στην αποφυγή προβλημάτων συντονισμού. Σε μια πραγματική εφαρμογή, η έκταση στην οποία αυτά τα πράγματα είναι αληθινά εξαρτάται από τον τρόπο δημιουργίας των δύο ημιτονοειδών κυματομορφών αναφοράς. Ένα παράδειγμα των απαιτούμενων ρευμάτων φάσης για λειτουργία πλήρους βήματος και τεσσάρων μικροβηματισμών ανά βήμα παρουσιάζονται στα σχήματα 5.3 και 5.4 αντίστοιχα.

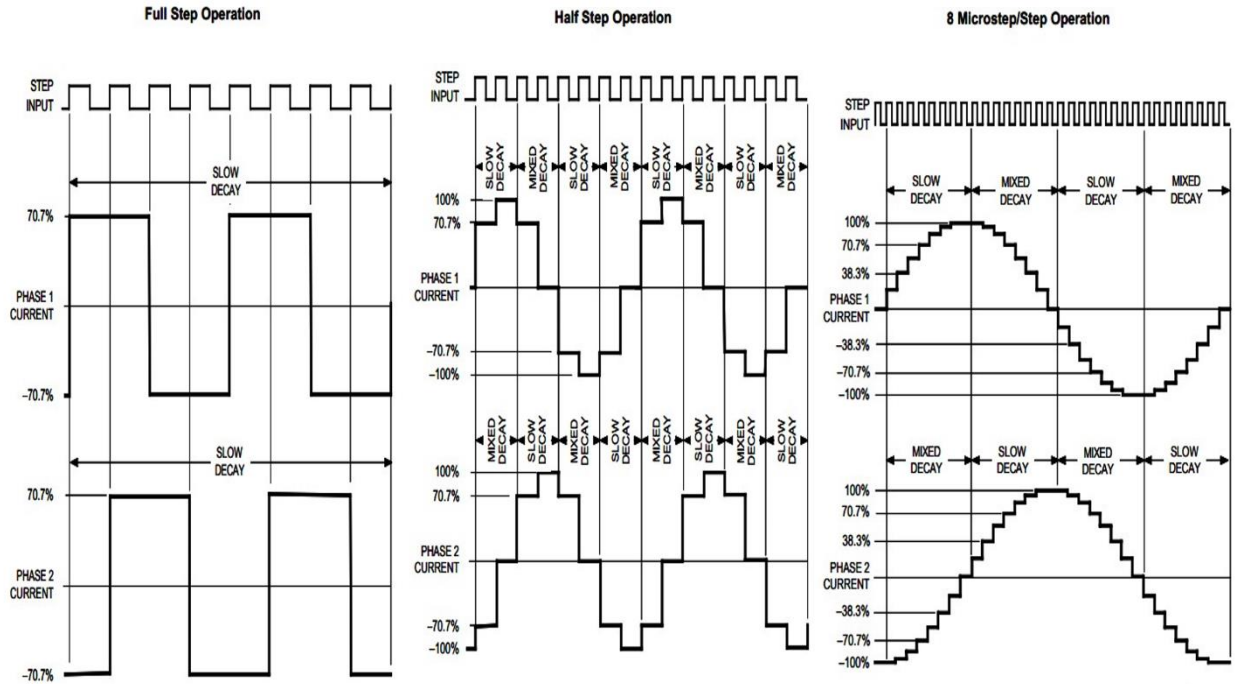


Σχήμα 5.3 Κυματομορφή Λειτουργίας πλήρους βήματος



Σχήμα 5.4 Κυματομορφή 4^{ων} μικροβημάτων

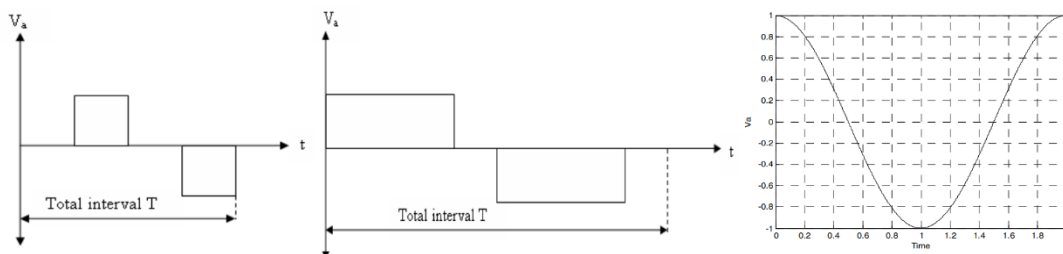
Ο ελεγκτής του μικροβηματισμού είναι ένας οδηγός που στέλνει παλμούς στον κινητήρα σε μορφή ιδανικής κυματομορφής. Δύο κυματομορφές με διαφορά φάσης 90° είναι ο τέλειος οδηγός για ομαλή κίνηση. Λεπτομερώς παρουσιάζεται η λειτουργία του μικροβηματισμού σε σύγκριση με την λειτουργία μισού και πλήρους βήματος.



Σχήμα 5.5 Συγκριτικό διάγραμμα λειτουργίας των 3^{ων} διεγέρσεων του βηματικού κινητήρα

5.4 Σύγκριση βηματισμών βηματικού κινητήρα

Στον παρακάτω πίνακα μπορούμε να παρατηρήσουμε τις χαρακτηριστικές που εμφανίζονται για κάθε ένα διαφορετικό βηματισμό σε 1 φάση κίνησης του βηματικού κινητήρα.



Γράφημα 5.6 χαρακτηριστικές 1φασικού τάσης ανά χρόνο ενός κύκλου βηματικού κινητήρα για πλήρες βήμα, μισό βήμα και μικροβηματισμό αντίστοιχα

Για σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών λειτουργιών, η κυματομορφή αναλύεται χρησιμοποιώντας σειρές Fourier ως εξής:

$$v_a(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} + b_n \sin \frac{2\pi n t}{T} \right) \quad (77)$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T v_a(t) dt \quad (78)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T v_a(t) \cos \left(\frac{2\pi n t}{T} \right) dt \quad (79)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T v_a(t) \sin \left(\frac{2\pi n t}{T} \right) dt \quad (80)$$

Υποθέτοντας ότι τα βασικά στοιχεία της τάσης και των κυματομορφών είναι:

$$v_{a1}(t) = V_m \sin(N_r \theta + \lambda) \quad (81)$$

$$i_{\alpha 1}(t) = I_m \sin(N_r \theta + \beta) \quad (82)$$

Όπου:

➤ V_m, λ, β, I_m είναι οι σταθερές που έχουν προκύψει από την ανάλυση Fourier.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα η οποία προκύπτει από τις ροπές της φάσης Α και Β οι οποίες δίνονται από τα εξής:

$$T_A = -k_m i_a \sin(N_r \theta) \quad (83)$$

$$T_B = k_m i_b \cos(N_r \theta) \quad (84)$$

$$T_A = \frac{K_m I_m}{2} [\cos(2N_r \theta + \beta) - \cos(\beta)] \quad (85)$$

$$T_B = \frac{-k_m I_m}{2} [\cos(2N_r \theta + \beta) + \cos(\beta)] \quad (86)$$

Η μέση ροπή θα είναι:

$$T_{Aav} = \frac{-K_m I_m}{2} \cos(\beta) \quad (87)$$

$$T_{Bav} = \frac{-K_m I_m}{2} \cos(\beta) \quad (88)$$

Η εξίσωση τάσης για την φάση A δίνεται από την σχέση:

$$v_\alpha(t) = i_a R + L \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (89)$$

Όπου, e_a είναι η επαγόμενη τάση στην περιέλιξη της φάσης A και δίνεται από την σχέση:

$$e_a = -K_m \omega \sin(N_r \theta) \quad (90)$$

Έτσι από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει μέσω πράξεων ότι:

$$\begin{aligned} & V_m \sin(N_r \theta + \lambda) \\ &= R I_m \sin(N_r \theta + \beta) \\ &+ L I_m N_r \omega \cos(N_r \theta + \beta) - K_m \omega \sin(N_r \theta) \end{aligned} \quad (91)$$

Όπου για $N_r \theta = \frac{\pi}{2}$

$$V_m \cos(\lambda) = RI_m \cos(\beta) - LI_m N_r \omega \sin(\beta) - K_m \omega \quad (92)$$

Και για $N_r \theta = 0$

$$V_m \sin(\lambda) = RI_m \sin(\beta) + LI_m N_r \omega \cos(\beta) \quad (93)$$

Έτσι έχουμε:

$$I_m \sin(\beta) = \frac{V_m \sin(\lambda) - LI_m N_r \omega \cos(\beta)}{R} \quad (94)$$

$$I_m \cos(\beta) = \frac{V_m R \cos(\lambda) + (RK_m + LN_r V_m \omega \sin(\lambda))}{(R^2 + L^2 N_r^2 \omega^2)} \quad (95)$$

Η μέση ροπή προκύπτει από τις σχέσεις:

$$T_{av} = -K_m \frac{V_m R \cos(\lambda) + (RK_m + LN_r V_m \omega \sin(\lambda))}{(R^2 + L^2 N_r^2 \omega^2)} \quad (96)$$

Η απόλυτη τιμή της ροπής γράφεται ως εξής:

$$T_{av} = \frac{C_1 + C_2 \omega}{(C_3 + \omega^2)} \quad (97)$$

Όπου αναλυτικότερα:

$$C_1 = \frac{K_m V_m R \cos(\lambda)}{L^2 N_r^2} \quad (98)$$

$$C_2 = \frac{R K_m^2}{L^2 N_r^2} + \frac{K_m V_m \sin(\lambda)}{L N_r} \quad (99)$$

$$C_3 = \frac{R^2}{L^2 N_r^2} \quad (100)$$

5.5 Δομικά χαρακτηριστικά βηματικού κινητήρα

Για τις απαιτήσεις και την ακρίβεια της παρούσας διπλωματικής ανοίξαμε έναν βηματικό κινητήρα για να μπορέσουμε να αναλύσουμε τα δομικά του χαρακτηριστικά. Το βηματικό μοτέρ που επιλέξαμε είναι υβριδικού τύπου που πωλείται στο εμπόριο και η χρήση του είναι ευρεία για πολλές εφαρμογές. Το συγκεκριμένο λειτουργεί σε 3d printer. Είναι το NEMA 17.



Εικόνα 1 Υβριδικό βηματικό μοτέρ NEMA 17

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο στην δεύτερη εικόνα το βηματικό μοτέρ απαρτίζεται από τον στάτη ο οποίος στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι τετραφασικός με 4

ζεύγη πόλων. Επίσης μπορούμε να δούμε και την πλακέτα στην οποία συνδέονται τα πηνία του στάτη.



Εικόνα 2 Στάτης υβριδικού βηματικού μοτέρ

Στην 3^η εικόνα βλέπουμε τον ρότορα του βηματικού μοτέρ. Ο ρότορας του κινητήρα όπως βλέπουμε απαρτίζεται από δύο πόλους. Τον βόρειο και τον νότιο πόλο οι οποίοι είναι δομημένοι με μικρά «δόντια» στην επιφάνεια τους.

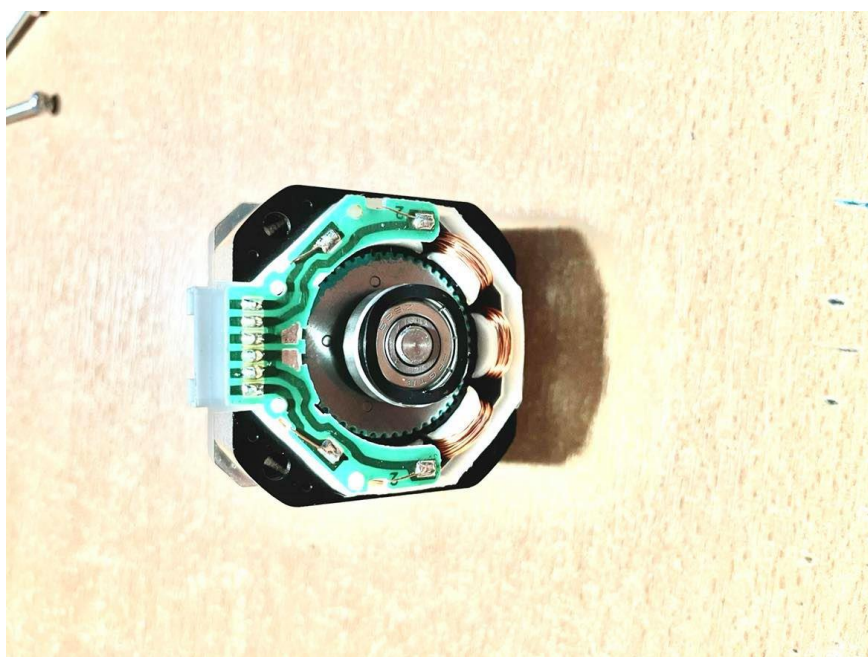


Εικόνα 3 ρότορας βηματικού μοτέρ NEMA 17

Το συγκεκριμένο υβριδικό βηματικό μοτέρ έχει τα εξής χαρακτηριστικά. Η γωνία βήματος που μπορεί να κάνει είναι 1.8° . Αυτό σημαίνει ότι μία πλήρης περιστροφή του αποτελείται από 200 βήματα. Η ικανή ροπή που μπορεί να κρατήσει είναι 4 kg.cm. Η τάση στην οποία λειτουργεί είναι 4.8 Volt. Και το ρεύμα είναι 1.5 A/φάση.

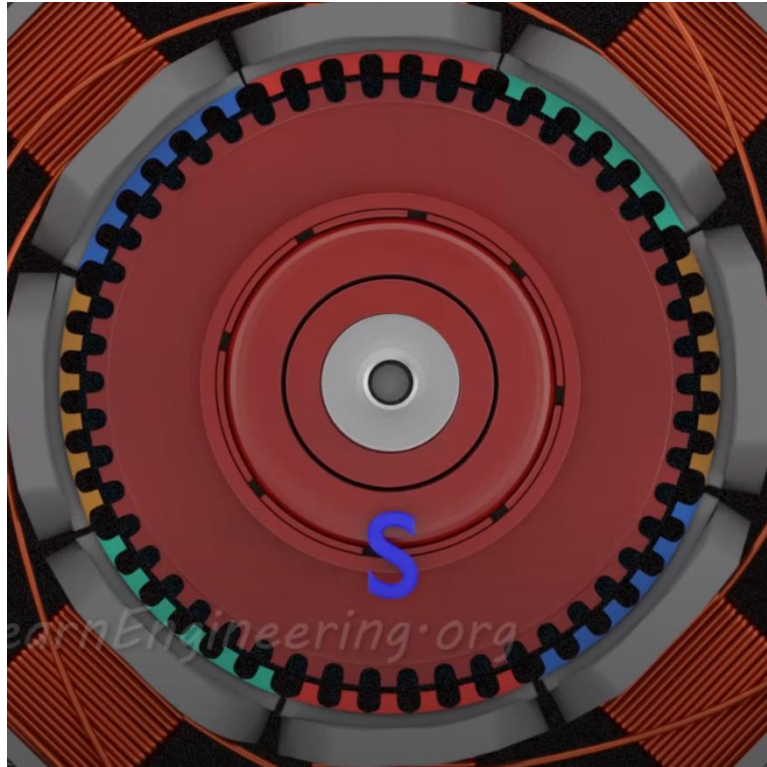
Η ταχύτητα στην οποία ο βηματικός κινητήρας μπορεί να φτάσει χωρίς να έχουμε απώλειες βήματος είναι 1000 rpm και η ροπή που μπορεί να αναπτύξει είναι 0.4 N. Η

θερμοκρασία των τυλιγμάτων μπορεί να κυμανθεί από 20 έως 50 °C και το μήκος του ρότορα/δρομέα είναι 34mm. Το βάρος του βηματικού μοτέρ είναι 0.21 kg.



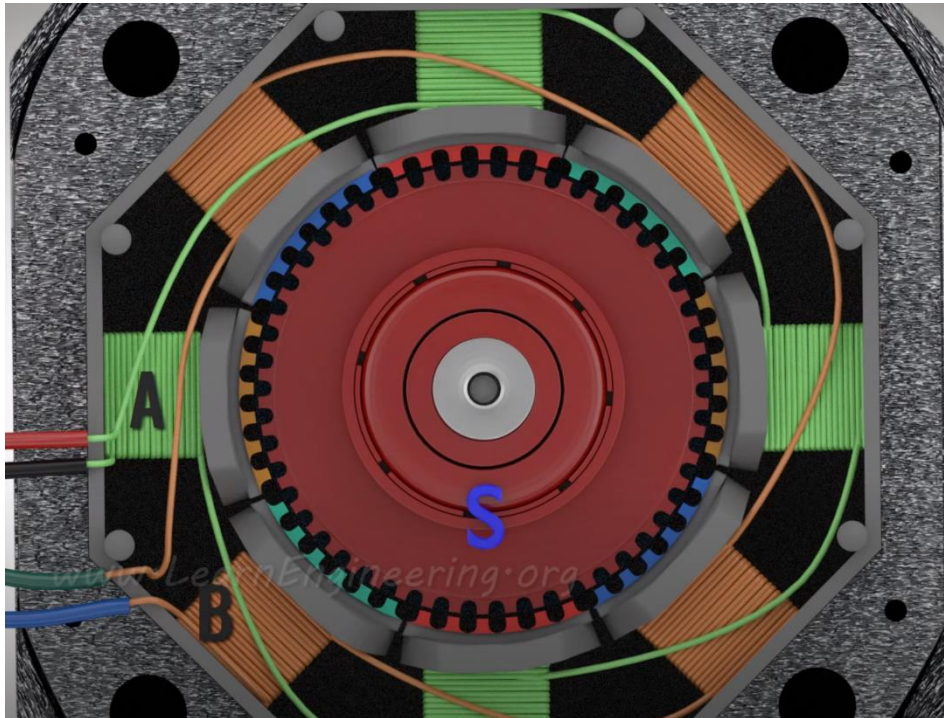
Εικόνα 4 ολοκληρωμένο σύστημα υβριδικού βηματικού κινητήρα

Στην 4^η φωτογραφία βλέπουμε το πίσω μέρος του κινητήρα. Στην ουσία ο ρότορας βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Η ακρίβεια αυτού το κινητήρα βρίσκεται στην έξυπνη τοποθέτηση των οδοντών του ρότορα και του στάτη. Ο ρότορας έχει 50 δόντια. Για να κατανοήσουμε την διάταξη των «δοντιών» του στάτη υποθέτουμε αρχικά ότι και ο στάτης έχει 50 δόντια. Ωστόσο στην πραγματικότητα ο στάτης έχει 2 λιγότερα δόντια από τον ρότορα δηλ 48. Αν διατάξουμε τώρα τα 48 δόντια σε 4 γκρουπ οδοντών (εικόνα 5). Ας ευθυγραμμίσουμε τις ομάδες οδοντών του ρότορα με του στάτη. Το πράσινο σετ οδόντων και το μπλε είναι μισό ευθυγραμμισμένα. Το κίτρινο σετ οδόντων είναι μη ευθυγραμμισμένα ενώ το κόκκινο σετ είναι πλήρως ευθυγραμμισμένα. Στην εικόνα 5 βλέπουμε από την οπτική γωνία του νότιου πόλου του μαγνήτη.



Εικόνα 5 Ευθυγραμμισμός οδόντων ρότορα – στάτη

Η σύνδεση του κινητήρα και η διάταξη των περιελίξεων και των φάσεων φαίνεται πιο αναλυτικά στην εικόνα 6.



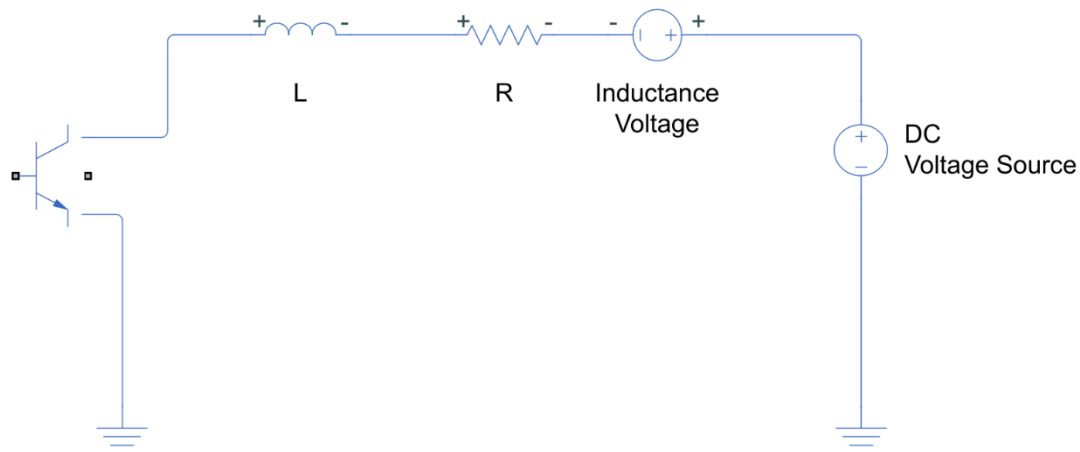
Εικόνα 6 σύνδεση και δήλωση φάσεων

Όταν το σετ A ενεργοποιείται ο στάτης σχηματίζει μαγνητικό σχέδιο όπως φαίνεται στην εικόνα 6. Ένα ζευγάρι περιελίξεων λειτουργεί σαν βόρειος πόλος και ένα σαν νότιος πόλος. Καθώς οι αντίθετοι πόλοι προσελκύουν θα ευθυγραμμισθούν. Ενώ οι πόλοι ίδιας πολικότητας δεν θα ευθυγραμμισθούν. Κάνοντας συνεχόμενα αυτήν την εναλλαγή μεταξύ των φάσεων A και B και αλλάζοντας την πολικότητα προκαλούμε την συνεχόμενη κίνηση του κινητήρα. Αυτή η κίνηση είναι κατά 1.8° και είναι αρκετά ακριβής. Η βηματική ικανότητα του κινητήρα αυτού μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο με μισό βηματισμό. Είναι αρκετά ενδιαφέρον να αναφέρουμε ότι τα καπάκια των δοντιών του βόρειου άκρου είναι τοποθετημένα μεταξύ των δοντιών του νότιου άκρου. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται και πάλι η ευθυγράμμιση των πόλων αντίθετης πολικότητας. Αυτή λοιπόν είναι η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου υβριδικού κινητήρα.

6. Οδήγηση βηματικού κινητήρα

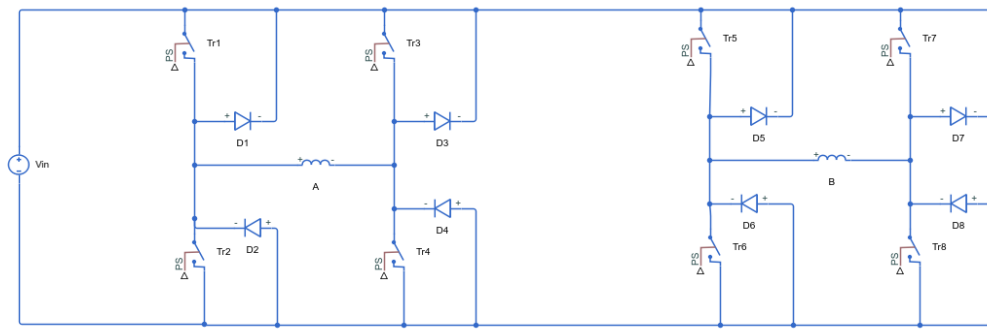
6.1 Εισαγωγή

Ο βηματικός κινητήρας είναι μια ηλεκτρομηχανική διάταξη της οποίας ο άξονας περιστρέφεται σε διακριτά σταθερά βήματα, που ποικίλουν σε αριθμό, παίρνοντας παλμούς τάσης συγκεκριμένης ακολουθίας στους ακροδέκτες εισόδου του. Χρησιμοποιείται σε μία πληθώρα εφαρμογών λόγω του ιδιαίτερου τρόπου περιστροφής του. Για την οδήγηση των βηματικών κινητήρων υπάρχουν διάφορες τοπολογίες που πλεονεκτούν και μειονεκτούν σε διαφορετικά σημεία. Ανάλογα την εφαρμογή, χρησιμοποιείται ο κατάλληλος κινητήρας σε συνδυασμό με το κατάλληλο κύκλωμα οδήγησης που τα πλεονεκτήματά του συνδυασμού τους, υπερτερούν των μειονεκτημάτων. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα μελετήσουμε ένα κύκλωμα διπολικής οδήγησης βηματικού κινητήρα και η δυνατότητα ελέγχου του από μια απλή πηγή ελέγχου με χαμηλού κόστους περιφερειακά και αυτό το καθιστά πιο εύχρηστο και ευέλικτο. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός βηματικού κινητήρα, φαίνεται στο σχήμα 6.1 και δεν είναι τίποτε άλλο εκτός από ένα πηνίο σε σειρά με μία αντίσταση. Κατά την λειτουργία του εμφανίζεται και η τάση επαγωγής στο τύλιγμα που παράγεται λόγω της περιστροφής του δρομέα.



Σχήμα 6.1 Ισοδύναμο κύκλωμα βηματικού κινητήρα

. Το κύκλωμα που υλοποιούμε στην συγκεκριμένη περίπτωση για την οδήγηση του κινητήρα που παρουσιάζουμε ως παράδειγμα είναι μια πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα, που έχει την μορφή που φαίνεται στο σχήμα 6.2



Σχήμα 6.2 Διπολικό κύκλωμα οδήγησης πλήρους γέφυρας

Στην ουσία ο τρόπος που λειτουργεί είναι ο εξής. Θεωρούμε ότι κάποια χρονική στιγμή t τα τρανζίστορ Tr1 και Tr4 άγουν. Το ρεύμα θα ρέει από αριστερά προς τα δεξιά στην φάση A. Αφού κλείσουν τα τρανζίστορ Tr1 και Tr4 και άγουν τα Tr2 και Tr3 το ρεύμα δεν έχει αλλάξει φορά. Θα ρέει λοιπόν μέσω των διόδων D2 και D3 και επιστρέφει στην πηγή μέχρι να αποφορτιστεί η φάση A και στην συνέχεια φορτίζεται με ρεύμα που ρέει από δεξιά προς τα αριστερά.

Από πλευρά ενέργειας μπορούμε να πούμε ότι η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου, λόγω των πηνίων, επιστρέφεται στην πηγή. Στην μονοπολική οδήγηση η ενέργεια αυτή γίνεται θερμότητα. Στην συγκεκριμένη διπολική περίπτωση έχουμε επιστροφή ενέργειας οπότε το κύκλωμα της γέφυρας έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Η ίδια φιλοσοφία ισχύει και για την φάση B.

6.2 Διπολική και μονοπολική οδήγηση βηματικού κινητήρα

Ότι αφορά τα ειδικά κυκλώματα έχουν δραματικά απλά βήματα για τους κινητήρες και τα συστήματα οδήγησης. Για να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε τα συγκεκριμένα κυκλώματα γενικότερα πρέπει να υπάρχει συγκεκριμένη γνώση της οδήγησης των βηματικών μοτέρ. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο εξηγεί τα βασικά της οδήγησης των βηματικών κινητήρων και περιγράφει τις τεχνικές οδήγησης που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Από την οπτική του σχεδιαστή κυκλωμάτων, οι βηματικοί κινητήρες μπορούν να χωριστούν σε 2 βασικούς τύπους:

1. Μονοπολικούς
2. Διπολικούς

Ένας βηματικός κινητήρας κινείται ένα βήμα όταν η κατεύθυνση της ροής ρεύματος εισέρχεται τα πηνία πεδίου αλλάζουν, αντιστρέφοντας το μαγνητικό πεδίο των πόλων του στάτη. Η διαφορά μεταξύ μονοπολικών και διπολικών κινητήρων έγκειται στον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται αυτή η αναστροφή του μαγνητικού πεδίου. Στο σχήμα 1 παρατηρούμε ένα μονοπολικό και ένα διπολικό μοτέρ. Ο διπολικός κινητήρας έχει ένα πηνίο ανά φάση και χρειάζεται δύο διακόπτες εναλλαγής ή μία πλήρη γέφυρα για κάθε φάση. Οι διακόπτες αντιστρέφουν την κατεύθυνση της ροής ρεύματος στο πηνίο. Ο μονοπολικός κινητήρας έχει ένα κεντρικό πηνίο σε κάθε φάση και χρειάζεται ένα διακόπτη εναλλαγής ή δύο τρανζίστορ στη γείωση, για κάθε φάση. Οι διακόπτες επιλέγουν ποια το ήμισυ του ρεύματος πηνίου που ρέει.

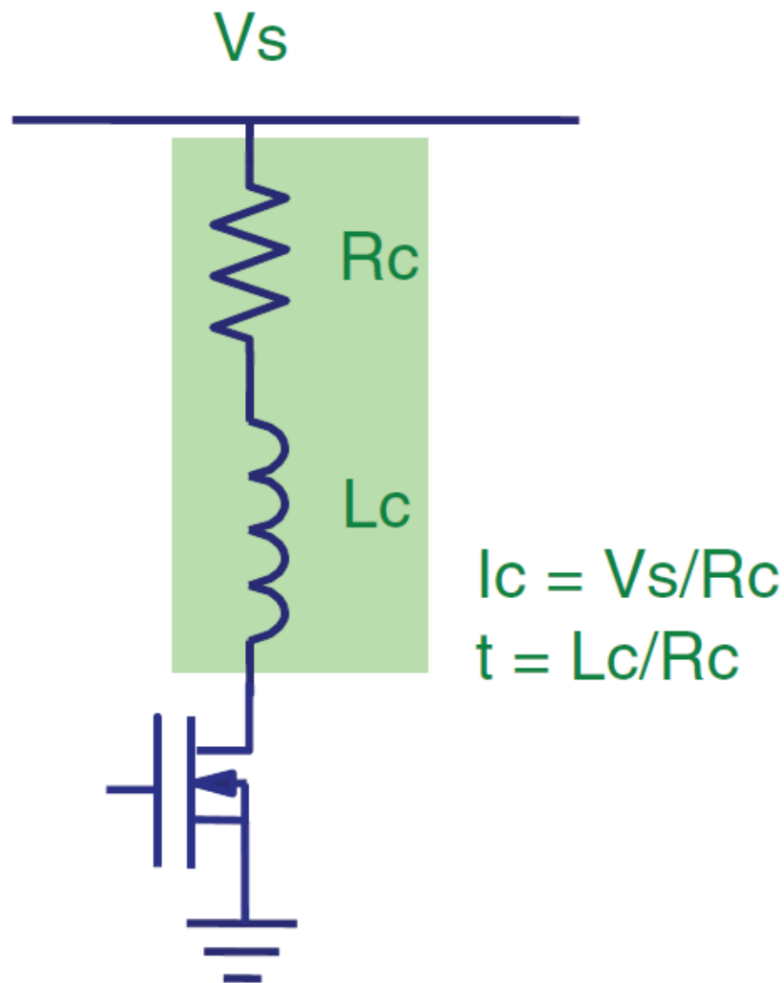
Η βασική διαφορά μεταξύ μονοπολικών και διπολικών κινητήρων είναι ότι στους μονοπολικούς το ρεύμα στο κύκλωμα τροφοδοσίας είναι πάντα στην ίδια κατεύθυνση ενώ στους διπολικούς το ρεύμα μπορεί να ρέει και προς τις δύο κατευθύνσεις. Η χρήση των μονοπολικών κινητήρων στο παρελθόν ήταν κάτι συνηθισμένο και προτιμούνταν λόγω των απλών διαμορφώσεων της οδήγησης τους. Ωστόσο με την εμφάνιση οικονομικά αποδοτικότερων οδηγών, οι διπολικοί κινητήρες είναι πλέον οι πιο συνηθισμένοι. Οι διπολικοί κινητήρες έχουν την δυνατότητα του να παράγουν περισσότερη ροπή.

Ανάλογα την εφαρμογή στην οποία θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε τον βηματικό μας κινητήρα έχουμε την δυνατότητα να επιλέξουμε τα χαρακτηριστικά τα οποία θέλουμε να αποδίδει. Έτσι μπορούμε να μπούμε στην διαδικασία να επιλέξουμε την σωστή οδήγηση αναλόγως τον κινητήρα και την εφαρμογή του. Υπάρχουν 3 διαφορετικοί τρόποι για να μπορέσουμε να οδηγήσουμε ένα κινητήρα ανάλογα με την παροχή τάσης και την δεδομένη ροπή που θέλουμε να αποδώσουμε. Έτσι έχουμε:

1. L/R οδήγηση
2. L/5R οδήγηση
3. Οδήγηση μέσω λειτουργίας αποκοπής ρεύματος.

6.3 Λειτουργία mosfet Τρανζίστορ ως διακόπτης

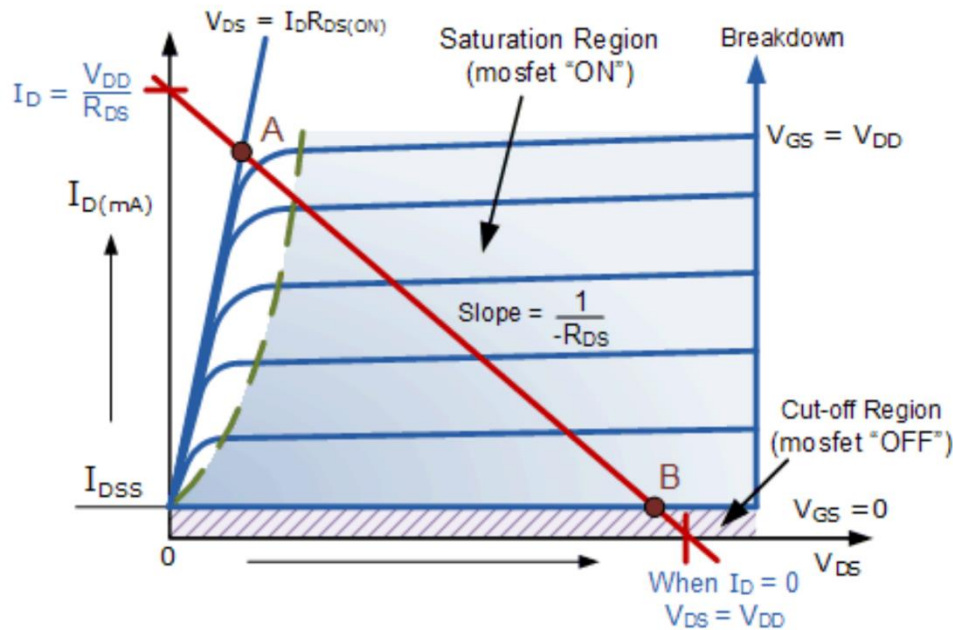
Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε ένα απλό διάγραμμα της οδήγησης και τροφοδοσίας για την 1^η περίπτωση.



Σχήμα 6.3 Οδήγηση L/R

Το ρεύμα του κινητήρα καθορίζεται ως επι το πλείστον από την τάση κίνησης και την αντίσταση του κινητήρα. Η παρούσα τοπολογία παρέχει στον κινητήρα όση τάση χρειάζεται άμεσα χρησιμοποιώντας την αντίστασή (RL) της περιέλιξης για περιορισμό του ρεύματος όπως βλέπουμε στο άνωθεν σχήμα. Στην ουσία η τοπολογία που βλέπουμε στο σχήμα 6.1 αντιπροσωπεύει μία σύνθεση των δύο διαγώνιων διακοπών μίας πλήρους γέφυρας του διπολικού κινητήρα. Ένας τυπικός κινητήρας με τάση $V_s = 5V$, $I = 1A$ στην είσοδο του σημαίνει ότι με οδήγηση 5V το ρεύμα που προκύπτει είναι 1^A ανταποκρίσιμο σε μία αντίσταση 5Ω. Στην συγκεκριμένη τοπολογία λόγω του πηνίου η τάση που τροφοδοτεί το σύστημα φαίνεται στο drain του τρανζίστορ. Το mosfet τρανζίστορ πρέπει να δουλεύει σε τρίοδο για να

μπορεί να θεωρηθεί ότι λειτουργεί σαν διακόπτης. Το διάγραμμα περιοχής λειτουργίας του mosfet παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2



Σχήμα 6.4 Χαρακτηριστική λειτουργίας mosfet τρανζίστορ

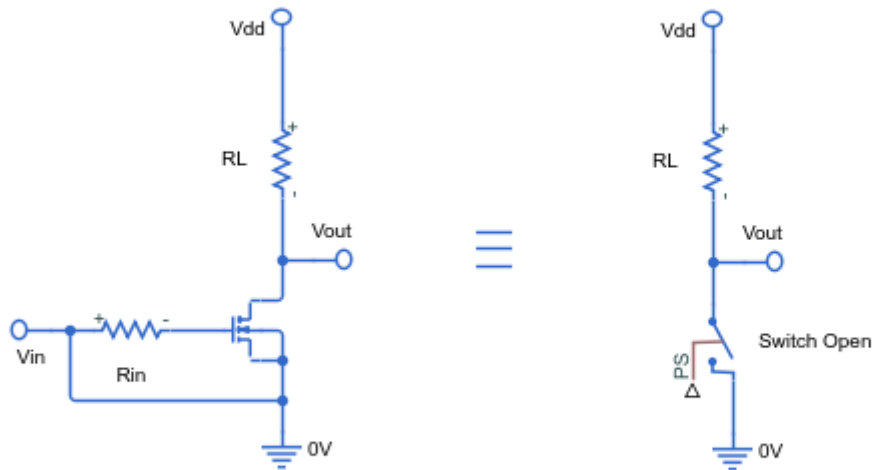
Όταν η τάση εισόδου (V_{in}), στην πύλη του τρανζίστορ είναι μηδέν, το mosfet δεν μεταφέρει σχεδόν κανένα ρεύμα και η τάση εξόδου (V_{OUT}) είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας (V_{DD}). Έτσι το mosfet λειτουργεί «σβηστό» εντός της περιοχής αποκοπής του (cut-off region).

Η ελάχιστη τάση πύλης που απαιτείται για να διασφαλιστεί ότι το mosfet παραμένει «ανοικτό» όταν μεταφέρει το επιλεγμένο ρεύμα αποστράγγισης μπορεί να καθοριστεί από τις καμπύλες μεταφοράς V-I στο σχήμα 6.2. Όταν το (V_{in}) είναι υψηλό ή ίσο με V_{DD} , το σημείο Q του mosfet κινείται στο σημείο A κατά μήκος της γραμμής φόρτωσης της χαρακτηριστικής. Το ρεύμα αποστράγγισης αυξάνεται στην μέγιστη τιμή του λόγω της μείωσης της αντίστασης του καναλιού. Το ρεύμα I_D γίνεται μια σταθερή τιμή ανεξάρτητη από το V_{DD} και εξαρτάται μόνο από το V_{GS} . Επομένως, το τρανζίστορ συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης αλλά η αντίσταση καναλιού «ON» δεν μηδενίζεται πλήρως λόγω της τιμής $R_{DS(on)}$ αλλά γίνεται πολύ μικρή.

Ομοίως όταν το V_{IN} είναι χαμηλό ή μειώνεται στο μηδέν το σημείο Q κινείται από το σημείο A στο B κατά μήκος της γραμμής της χαρακτηριστικής. Η αντίσταση του καναλιού είναι πολύ υψηλή, οπότε το τρανζίστορ λειτουργεί σαν ανοικτό κύκλωμα και δεν ρέει ρεύμα μέσω του καναλιού. Επομένως, εάν η τάση στην πύλη του mosfet εναλλάσσεται μεταξύ δύο τιμών, υψηλή και χαμηλή το mosfet θα συμπεριφέρεται ως διακόπτης στερεάς κατάστασης μονοπολικής μονής ρίψης και αυτό ορίζεται ως:

1. Περιοχή αποκοπής:

Οι συνθήκες λειτουργίας του τρανζίστορ είναι η μηδενική τάση εισόδου V_{IN} , μηδενικό ρεύμα I_D και τάση εξόδου ίση με τάση εισόδου $V_{DS} = V_{DD}$. Επομένως, για ένα τύπο ενίσχυσης mosfet το αγώγιμο κανάλι είναι κλειστό και η συσκευή τίθεται εκτός λειτουργίας.



Σχήμα 6.5 Λειτουργία περιοχής αποκοπής

Η είσοδος και η πύλη είναι γειωμένες.(0V). Η τάση πηγής πύλης είναι μικρότερη από την κατώτατη τάση $V_{GS} < V_{TH}$. Ισχύει ότι :

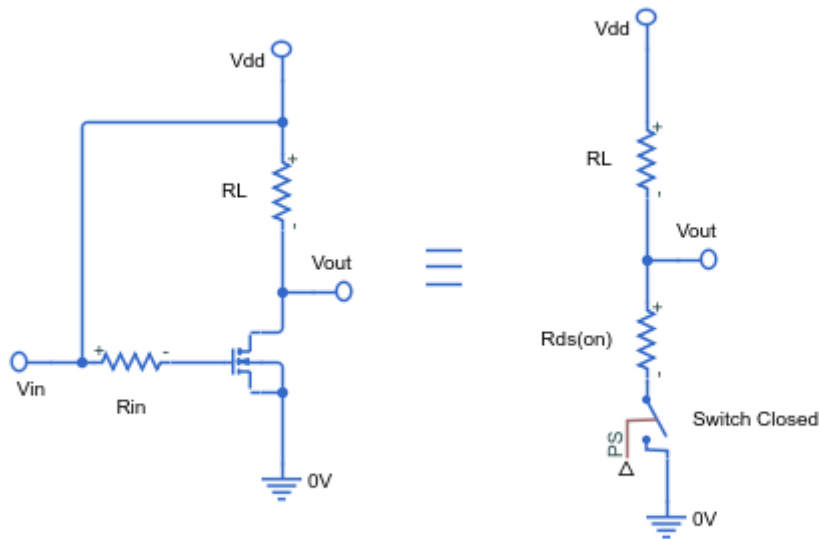
- $I_D = 0V$
- $V_{OUT} = V_{DD} = V_{DS} = 1$

Το mosfet λειτουργεί λοιπόν σαν ανοιχτός διακόπτης

Αυτή είναι η περιοχή αποκοπής «OFF» όταν χρησιμοποιούμε ένα mosfet ως διακόπτη ως $V_{GS} < V_{TH}$ $I_D = 0A$.

2) Περιοχή κορεσμού

Στο κορεσμό το τρανζίστορ θα διαρρέεται από ρεύμα έτσι ώστε η μέγιστη ποσότητα τάσης πύλης να εφαρμόζεται στο βηματικό μοτέρ, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αντίσταση του καναλιού R_{DS} να είναι όσο τον δυνατόν μικρότερη(mΩ) με το μέγιστο ρεύμα να ρέει μέσω του «διακόπτη» mosfet. Έτσι για το mosfet το αγώγιμο κανάλι είναι ανοιχτό και η συσκευή είναι ενεργοποιημένη «ON».



Σχήμα 6.6 Λειτουργία κορεσμού

Η είσοδος και η πύλη συνδέονται με την V_{DD} . Η τάση πηγής της πύλης είναι πολύ μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου $V_{GS} > V_{TH}$. Το mosfet είναι ανοιχτό (περιοχή κορεσμού). Ισχύει ότι :

- $I_D = \frac{V_{DD}}{R_L}$
- $V_{DS} = 0V$ (ιδανικός κορεσμός)
- $R_{DS(on)} < 0.1\Omega$
- $V_{OUT} = v_{DS} = 0.2 V$

Το mosfet λειτουργεί λοιπόν σαν κλειστός διακόπτης χαμηλής αντίστασης.

Αυτή είναι η περιοχή κορεσμού ή η λειτουργία «ON» όταν χρησιμοποιούμε ένα mosfet ως διακόπτη με τάση πηγής πύλης $V_{GS} > V_{TH}$ και $I_D = max$.

Εφαρμόζοντας την κατάλληλη τάση κίνησης στην πύλη ενός FET, η αντίσταση του καναλιού πηγής-αποστράγγισης $R_{DS(on)}$, μπορεί να κυμαίνεται από μία αντίσταση -OFF πολλών εκατοντάδων $k\Omega$, ουσιαστικά ένα ανοιχτό κύκλωμα, σε μία ON- αντίσταση μικρότερη του 1Ω . λειτουργώντας ως βραχυκύκλωμα.

Όταν χρησιμοποιείται το mosfet ως διακόπτης μπορούμε να οδηγήσουμε το mosfet να ενεργοποιείται «ON» γρήγορα. Αυτή η ικανότητα ενεργοποίησης του mosfet «ON» και «OFF» επιτρέπει στην συσκευή να χρησιμοποιηθεί ως ένας πολύ αποδοτικός διακόπτης με ταχύτητες μεταγωγής πολύ πιο γρήγορες από τα τυπικά διπολικά τρανζίστορ διασταύρωσης.

Όταν το τρανζίστορ χρησιμοποιείται ως διακόπτης για την λειτουργία ενός βηματικού κινητήρα πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας ότι το αρχικό ρεύμα που θα το διαπεράσει θα είναι πολύ υψηλό. Πρέπει να δώσουμε με προσοχή ρεύμα γιατί μπορεί να φτάσει σε υψηλά επίπεδα λόγω του ότι η αντίσταση μας μπορεί να είναι χαμηλή και υπάρχει η πιθανότητα να φτάσουμε σε υψηλές θερμοκρασίες του πηνίου. Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη που επιστρέφεται είναι

επίσης σημαντικός παράγοντας τον οποίο τον αναλύσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα οδήγησης βηματικού κινητήρα με Mosfet είναι ότι το σήμα που εισάγουμε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελέγξουμε την ομαλή επιτάχυνση του ρότορα.

6.4 Ρεύμα αποκοπής

Μία δυσκολία με την λειτουργία του βηματικού κινητήρα είναι ότι η σταθερά χρόνου (L/R) των περιελίξεων του κινητήρα εμποδίζει την ταχεία αύξηση του ρεύματος κατά τη διάρκεια των παλμών. Αυτό σημαίνει ότι εκτός αν η τάση είναι πολύ υψηλή, το ρεύμα δεν μπορεί ποτέ να φτάσει την πλήρη ονομαστική του τιμή, ειδικά όταν ο ρυθμός παλμού είναι υψηλός δηλαδή σε υψηλές ταχύτητες του κινητήρα. Αυτός ο περιορισμός εκφράζεται από δύο εξισώσεις:

Τον Νόμο του ohm:

$$I = \frac{V}{R} \quad (101)$$

Όπου:

- I το ρεύμα
- V η τάση
- R η αντίσταση

Την σχέση μεταξύ την αύξηση του ρεύματος και της επαγωγής:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V}{L} \quad (102)$$

Όπου:

- $\frac{dI}{dt}$ ο ρυθμός αύξησης του ρεύματος στον χρόνο
- L η επαγωγή

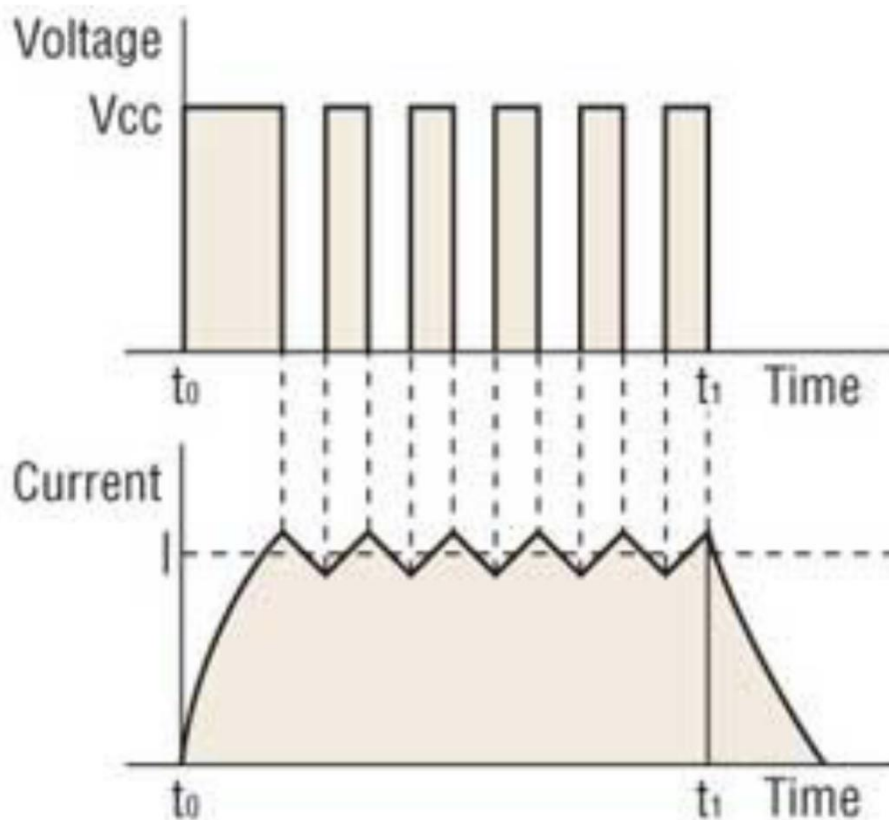
Για να έχουμε υψηλό ρεύμα και επομένως υψηλή ροπή σε υψηλές ταχύτητες, η τάση πρέπει να διατηρείται όσο το δυνατόν υψηλότερη και η επαγωγή όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Όμως στις παραδοσιακές μονάδες L/R , η τάση πρέπει να διατηρείται χαμηλή για να μην υπερβαίνει το ρεύμα σταθερής κατάστασης.

Η τιμή του L/R είναι η χρονική σταθερά t δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το ρεύμα στο 63% ($1-1/e$) της τελικής τιμής.

Ένας οδηγός αποκοπής αντιμετωπίζει το πρόβλημα της απόκτησης υψηλής ροπής σε υψηλή ταχύτητα για ένα βηματικό κινητήρα ενεργοποιώντας και απενεργοποιώντας γρήγορα

την τάση εξόδου στον κινητήρα(γνωστό και ως κοπή) για τον έλεγχο του ρεύματος του κινητήρα. Σε κάθε βήμα του κινητήρα, εφαρμόζεται μια πολύ υψηλή τάση (συνήθως 8 φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση του κινητήρα) στις περιελίξεις του κινητήρα. Αυτό αναγκάζει το ρεύμα να ανεβαίνει γρήγορα, ανάλογα με την σχέση μεταξύ την αύξηση ρεύματος και της αυτεπαγωγής. Επιτρέπει επίσης την παραγωγή υψηλότερου ρεύματος, σύμφωνα με τον νόμο του Ohm.

Μία σταθερή συχνότητα κοπής, συνήθως 20kHz ή μεγαλύτερη (πάνω από το ακουστικό εύρος), μεταβάλλει το πλάτος των παλμών εξόδου. Η αντίσταση περιέλιξης ποικίλλει ανάλογα με την ταχύτητα του κινητήρα, οπότε σε υψηλότερες ταχύτητες(υψηλότερη σύνθετη αντίσταση στις περιελίξεις), η τάσης το χρόνο είναι μεγαλύτερη, πράγμα που παράγει μεγαλύτερο πλάτος παλμού, επιτρέποντας στο ρεύμα να ανέβει στο σωστό επίπεδο. Σε χαμηλότερες ταχύτητες(χαμηλότερη αντίσταση περιέλιξης), η τάση την δεδομένη στιγμή, είναι μικρότερη, δίνοντας μικρότερο πλάτος παλμού. Αυτή η τεχνική αναφέρεται επίσης ως διαμόρφωση πλάτους παλμού. Αναφερθήκαμε σε αυτή σε προηγούμενο κεφάλαιο.

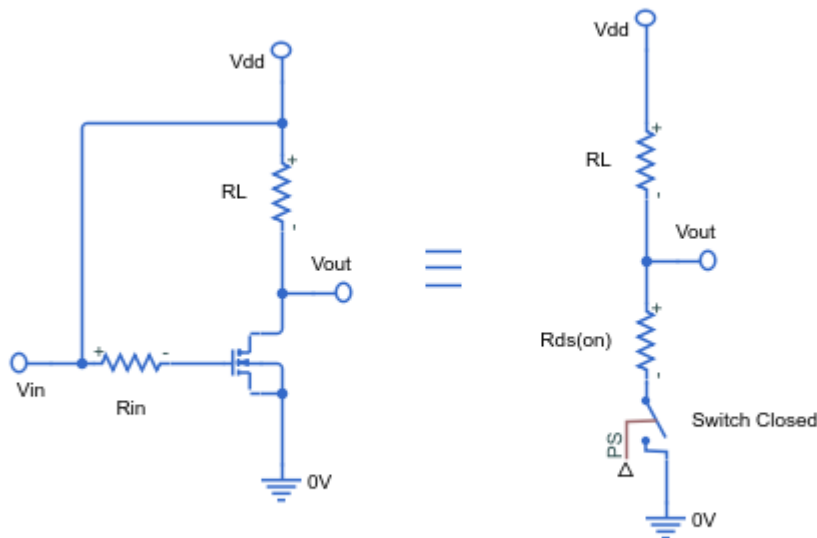


Σχήμα 6.7 Χαρακτηριστική τάσης ρεύματος με λειτουργία αποκοπής

Το ρεύμα σε λειτουργία αποκοπής ρυθμίζεται από μία αντίσταση ανίχνευσης ρεύματος τοποθετημένη σε σειρά με κάθε περιέλιξη. Καθώς αυξάνεται το ρεύμα, η τάση αναπτύσσεται κατά μήκος της αντίστασης και ένας συγκριτής παρακολουθεί αυτό το επίπεδο τάσης. Σε μία προκαθορισμένη τάση αναφοράς, η τάση εξόδου απενεργοποιείται (τεμαχισμένη) έως ότου πραγματοποιηθεί ο επόμενος παλμός. Με αυτόν τον τρόπο, το ρεύμα αυξάνεται και μειώνεται καθώς η τάση απενεργοποιείται και ενεργοποιείται. Το αποτέλεσμα είναι το κατάλληλο μέσο

ρεύμα ανά κύκλο βημάτων. Αυτό επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της ροπής, ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις της τάσης τροφοδοσίας. Παρέχει επίσης το συντομότερο δυνατό χρόνο για την τρέχουσα συσσώρευση ρεύματος και την μείωση του.

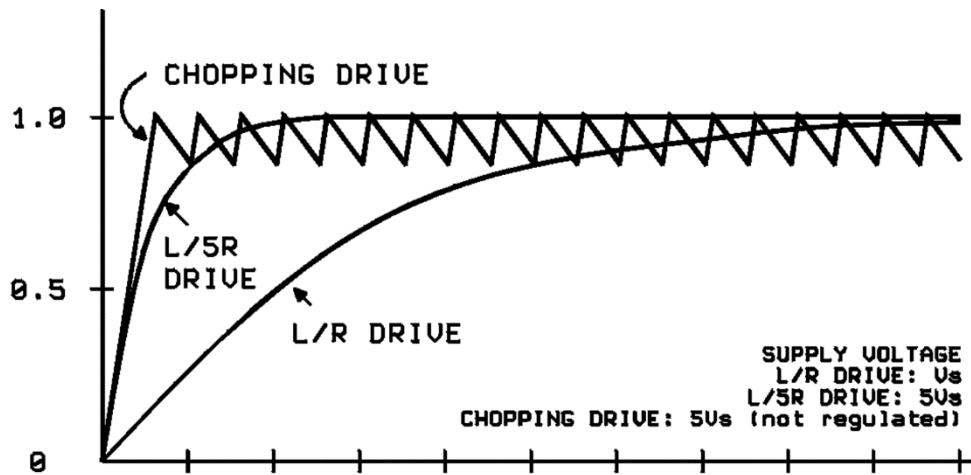
Ένα τυπικό διάγραμμα οδήγησης ρεύματος αποκοπής μας δίνεται στο σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.8 Διάγραμμα αποκοπής ρεύματος βηματικού κινητήρα

Όπου:

- V_{REF} η τάση σύγκρισης
- *Oscillator* ο ταλαντωτής που τροφοδοτεί τάση το σύστημα
- *Comparator* ο συγκριτής που ελέγχει την διάταξη και το ρεύμα στον κόμβο E
- *flip flop* η διάταξη των επαφών/ διακοπών που ανοιγοκλείνουν για την παροχή τάσης
- *sense resistor* η αντίσταση ανίχνευσης του ρεύματος στον προκαθορισμένο κόμβο

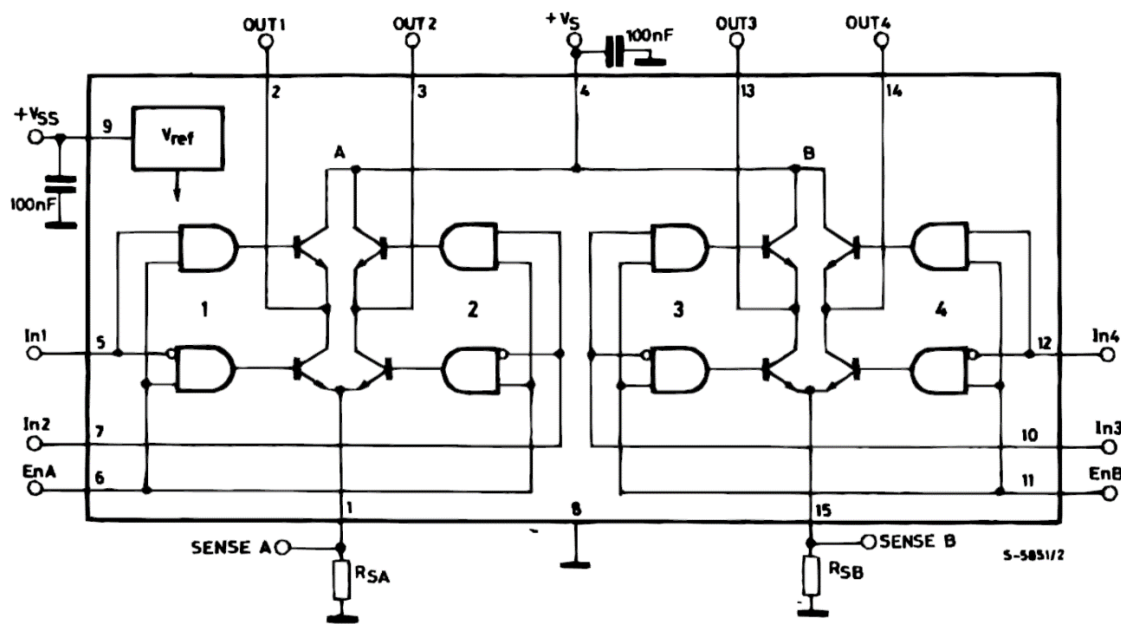


Σχήμα 6.9 Χαρακτηριστική ρεύματος αποκοπής, L/R, L/nR

Παρόλο που η οδήγηση με αποκοπή ρεύματος απαιτεί πρόσθετα ηλεκτρονικά για την παρακολούθηση του ρεύματος στις περιελίξεις και τον έλεγχο της εναλλαγής τάσης, επιτρέπει στον κινητήρα να παράγει υψηλότερη ροπή σε υψηλότερες ταχύτητες από μία παραδοσιακή μονάδα L/R.

6.5 Ιστορική αναδρομή και χρήση των οδηγών των stepper motor

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα block διαγράμματα των οδηγών βηματικών κινητήρων και θα αναφέρουμε την λειτουργία τους. Η οδήγηση των βηματικών κινητήρων ξεκίνησε να ανοίγεται με το L298 ένα ολοκληρωμένο μονολιθικό κύκλωμα σε 15-Multiwatt πακέτα. Στο σχήμα 6.9 παρουσιάζεται το block diagram του συγκεκριμένου οδηγού:



Σχήμα 6.10 Block diagram L298

Παρατηρούμε ένα σχεδιασμό διπλής γέφυρας υψηλής τάσης σχεδιασμένο για αποδοχή εντολών επιπέδου λογικής TTL ικανή να οδηγήσει επαγωγικά φορτία πχ ρελέ, DC και βηματικούς κινητήρες.

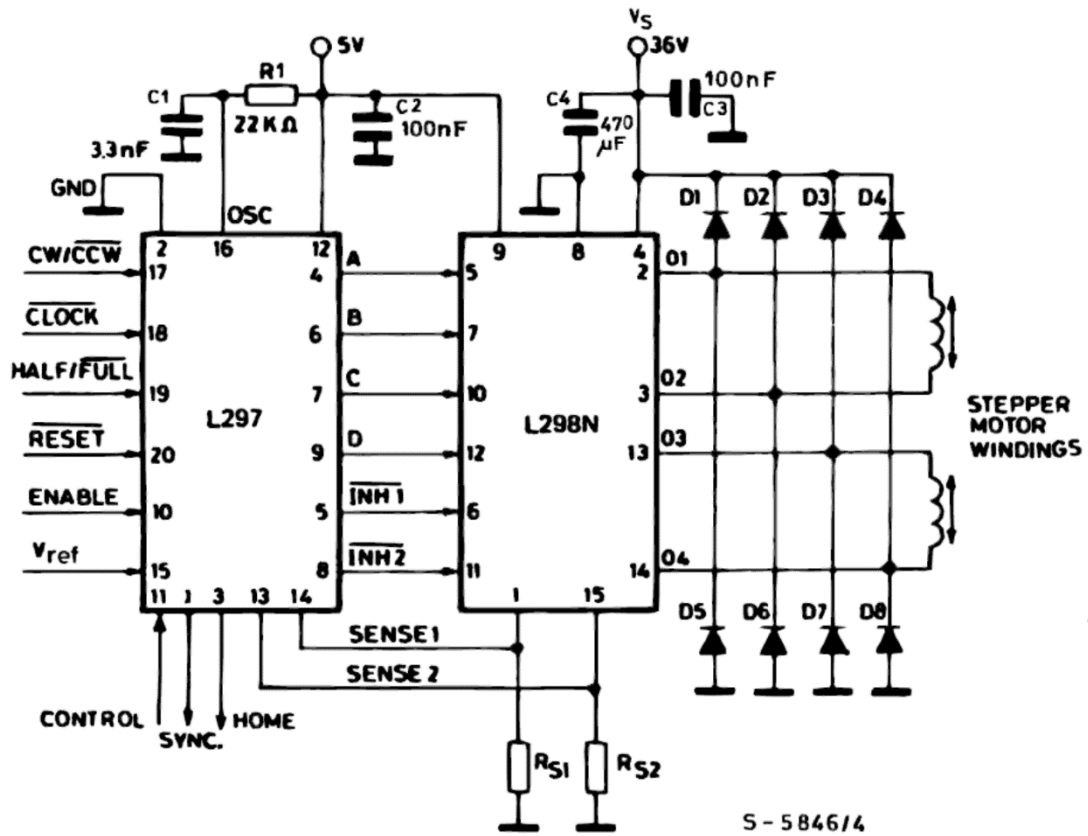
Παρέχονται δύο εισοδοί (pin) για ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της συσκευής που θέλουμε να τρέξουμε ανεξάρτητη των σημάτων εισόδου. Οι εκπομποί των σημάτων των κάτω τρανζίστορ της κάθε γέφυρας συνδέονται μεταξύ τους και το αντίστοιχο εξωτερικό τερματικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σύνδεση εξωτερικής αντίστασης ανίχνευσης του ρεύματος του πηνίου. Ένα επιπλέον είναι ότι παρέχεται είσοδος τροφοδοσίας έτσι ώστε η λογική του είναι να λειτουργεί σε χαμηλότερη τάση αν και εφόσον χρειάζεται.

Η μέγιστη τάση που μπορεί να υποστηρίξει είναι τα 50 V και η τάση τροφοδοσίας του λογικού είναι 7V. Η τάση εντολών κυμαίνεται από -0.3 έως 7V. Παρακάτω παραθέτουμε τον πίνακα των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών δεδομένου ότι εργαζόμαστε με $V_s = 42V$, $V_{SS} = 5V$, και $T_j = 25^\circ C$

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_S	Supply Voltage (pin 4)	Operative Condition	$V_{IH} + 2.5$		46	V
V_{SS}	Logic Supply Voltage (pin 9)		4.5	5	7	V
I_S	Quiescent Supply Current (pin 4)	$V_{en} = H; I_L = 0$ $V_i = L$ $V_i = H$		13 50	22 70	mA mA
		$V_{en} = L$ $V_i = X$			4	mA
I_{SS}	Quiescent Current from V_{SS} (pin 9)	$V_{en} = H; I_L = 0$ $V_i = L$ $V_i = H$		24 7	36 12	mA mA
		$V_{en} = L$ $V_i = X$			6	mA
V_{iL}	Input Low Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		-0.3		1.5	V
V_{iH}	Input High Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		2.3		V_{SS}	V
I_{iL}	Low Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	$V_i = L$			-10	μA
I_{iH}	High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	$V_i = H \leq V_{SS} - 0.6V$		30	100	μA
$V_{en} = L$	Enable Low Voltage (pins 6, 11)		-0.3		1.5	V
$V_{en} = H$	Enable High Voltage (pins 6, 11)		2.3		V_{SS}	V
$I_{en} = L$	Low Voltage Enable Current (pins 6, 11)	$V_{en} = L$			-10	μA
$I_{en} = H$	High Voltage Enable Current (pins 6, 11)	$V_{en} = H \leq V_{SS} - 0.6V$		30	100	μA
$V_{CEsat (H)}$	Source Saturation Voltage	$I_L = 1A$	0.95	1.35	1.7	V
		$I_L = 2A$		2	2.7	V
$V_{CEsat (L)}$	Sink Saturation Voltage	$I_L = 1A$ (5)	0.85	1.2	1.6	V
		$I_L = 2A$ (5)		1.7	2.3	V
V_{CEsat}	Total Drop	$I_L = 1A$ (5)	1.80		3.2	V
		$I_L = 2A$ (5)			4.9	V
V_{sens}	Sensing Voltage (pins 1, 15)		-1 (1)		2	V

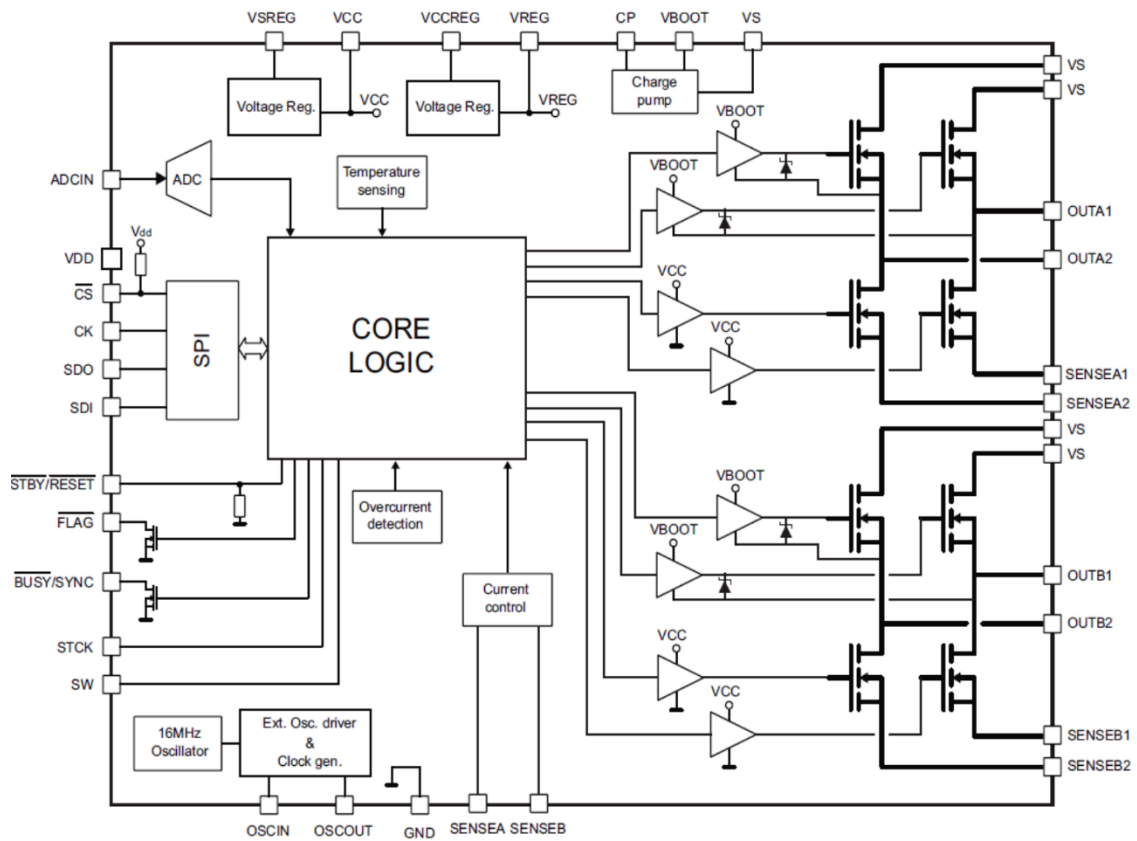
Πίνακας 1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά οδηγού L298

Στο σχήμα 6.10 βλέπουμε το κύκλωμα οδήγησης διπολικού βηματικού κινητήρα με τυλίγματα να αγγίζουν έως και τα 2 A. Οι δίοδοι είναι τύπου 2 A.



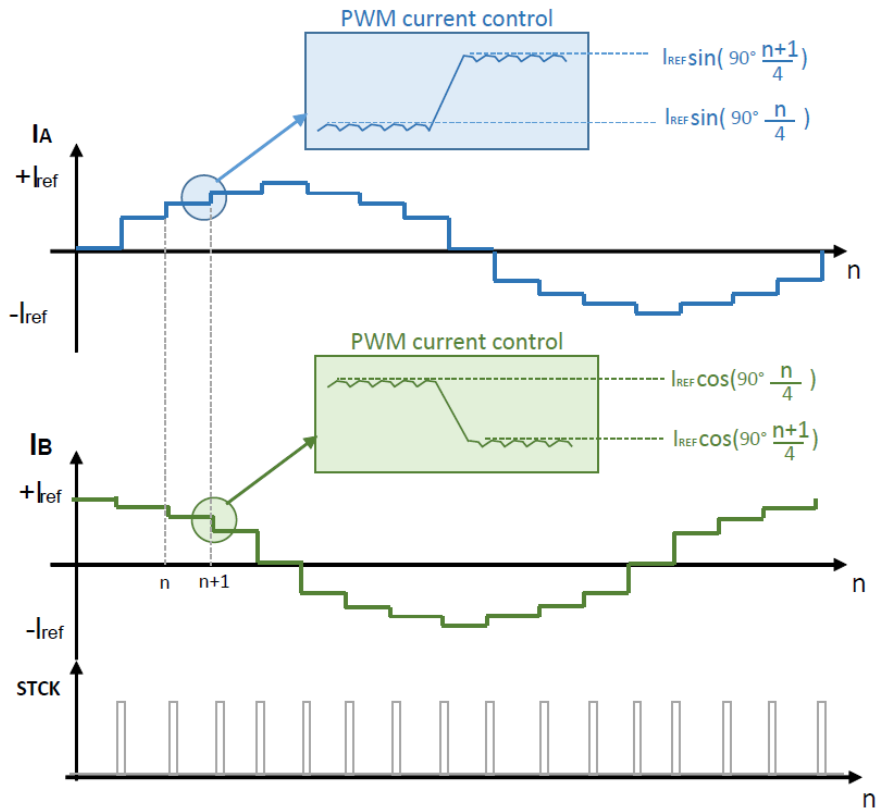
Σχήμα 6.11 Κύκλωμα οδήγησης διπολικού βηματικού κινητήρα.

Στην συνέχεια λόγω απαιτήσεων της βιομηχανικής παραγωγής και δεδομένου ότι η ζήτηση αυξήθηκε απαιτήθηκε για εφαρμογές μεγαλύτερης ακρίβειας η χρήση του υβριδικού βηματικού κινητήρα με μικροβηματισμό. Έτσι έχουμε στο σχήμα 6.11 το block διάγραμμα ενός οδηγού με mosfet.



Σχήμα 6.12 mosfet driver block diagram

Η λειτουργία είναι η ίδια με την προηγούμενη. Έχουμε δύο πλήρεις γέφυρες. Η λειτουργία των mosfet. Το control γίνεται με βάση την λειτουργία που βρίσκεται μέσα στο κύκλωμα.

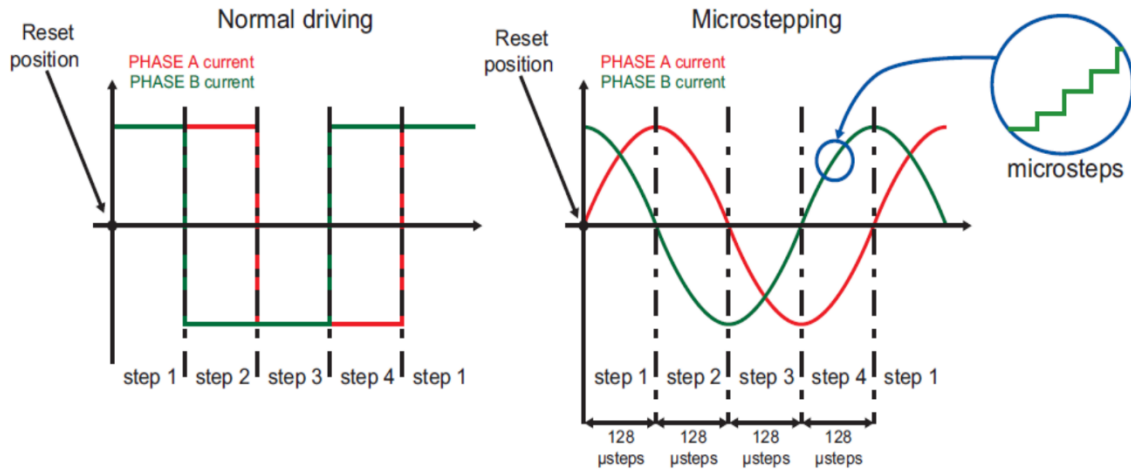


Σχήμα 6.13 Ημιτονοειδής και παλμικό σήμα

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα η συχνότητα της ημιτονοειδούς κυματομορφής εξαρτάται από την συχνότητα του τετραγωνικού παλμού οδήγησης του κυκλώματος. Για να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε το ημίτονο και το συνημίτονο που παρουσιάζονται στο σχήμα 6.11 πρέπει να δημιουργήσω μεταβλητό ρεύμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα τόσο το ρεύμα που οδηγεί τα πηνία του κινητήρα εναλλάσσεται πιο γρήγορα. Όσο μεγαλύτερο πλάτος έχει η κυματομορφή τόσο μεγαλύτερο ρεύμα θα έχει. Αν θέλουμε να σταματήσουμε το ρεύμα σε συγκεκριμένο ύψος θα πρέπει να σταματήσουν και οι παλμοί. Αν αλλάξουμε και την ανάλυση του βήματος του κινητήρα(M), μεταβάλλεται ο απαραίτητος αριθμός βημάτων για να φτάσει η ημιτονοειδής κυματομορφή σε τοπικό μέγιστο ή ελάχιστο. Οπότε μπορεί να καθοριστεί και από εκεί η συχνότητα και επίσης η ομαλότητα της κίνησης του κινητήρα.

Ανάλογα με την συχνότητα ή πλάτος των παλμών επιτρέπουμε να περάσει διαφορετικό ρεύμα από το πηνίο. Με αυτή τη λειτουργία μπορεί να γίνει πλήρης έλεγχος του μοτέρ το οποίο σημαίνει ότι μπορούμε να έχουμε πλήρη έλεγχο του ρεύματος για την κίνηση του βηματικού κινητήρα, ομαλή κίνηση κλπ.

Μπορεί να κάνει ακόμα και τετραγωνικούς παλμούς που έκανε και ο οδηγός προηγούμενης γενιάς αλλά έχει εξελιχθεί στο σημείο που μπορεί να κάνει και Microstepping ανάλογα με το τι χρειαζόμαστε.



Σχήμα 6.14 Χαρακτηριστικές mosfet driver

Οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται και βρίσκονται στην βιομηχανία για την αντικατάσταση των κλασικών κινητήρων DC συνεχούς ρεύματος. Αναλύονται για διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας. Η λειτουργία πλήρους βήματος που βασίζεται σε διέγερση 2 ή 4^{ων} φάσεων προτείνεται για απλές εφαρμογές ενώ όταν χρειαζόμαστε μεγαλύτερη ακρίβεια και ροπή στο σύστημα μας δύναται να χρησιμοποιούμε μικροβηματισμό. Επειδή οι βηματικοί κινητήρες μπορούν να κινούνται με τετραγωνικά κύματα, ελέγχονται με εύκολα και φτηνά ψηφιακά κυκλώματα και δεν απαιτούν καν διαμόρφωση πλάτους παλμού. Για το λόγο αυτό, οι βηματικοί κινητήρες αναφέρονται συχνά ως ψηφιακοί. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας τεχνικές διαμόρφωσης ισχύος για να αλλάξουμε τα τετραγωνικά κύματα σε ημιτονοειδής κυματομορφές και σ ημιτονοειδής είναι δυνατή περισσότερη ανάλυση βημάτων. Θεωρητικά δεν υπάρχει όριο στον βηματισμό που μπορεί να επιτευχθεί με ένα μικρό-βήμα αλλά στην πραγματικότητα περιορίζεται από τις μηχανικές και τις ηλεκτρικές ανοχές του κινητήρα.

Βιβλιογραφία

- [1] Stepien, S. and Bernat, J., 2011. Modeling and optimal control of variable reluctance stepper motor. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*.
- [2] Fayad, F., 2009. Βηματικοί Κινητήρες.
- [3] Low, R.D.S., Fully integrated microstepping motor driver with motion engine and SPI.
- [4] Hopkins, T., 2003. Stepper Motor Driver Considerations, Common Problems & Solutions": Application Note 460. *SGS-Thomson Microelectronics*.
- [5] Sarhan, A., El-Wakeel, A. and Kotb, A.B., 2009, May. Analysis and Control of Hybrid Stepper Motor for Automatic Sun-Tracking System. In *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology* (Vol. 13, No. AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY, ASAT-13, May 26–28, 2009, pp. 1-12). The Military Technical College.
- [6] Hopkins, T., 2012. Stepper motor driving. *Application note*.
- [7] DC MOTORS SPEED CONTROLS SERVO SYSTEMS AN ENGINEERING HANDBOOK prepared by ELECTRO-CRAFT CORPORATION, USA by PERGAMON PRESS
- [8] Εισαγωγή στη Ρομποτική - John J Craig
- [9] Static and dynamic sliding mode control schemes for a permanent magnet stepper motor Mohamed Zribi , Herbertt Sira-Ramirez & Andy Ngai
- [10] Baluta, G., 2007, July. Microstepping mode for stepper motor control. In *2007 International Symposium on Signals, Circuits and Systems* (Vol. 2, pp. 1-4). IEEE.
- [11] Χοντάης, Α. and Κύργιος, Λ., 2017. Μελέτη και κατασκευή βηματικού κινητήρα.
- [12] Băluță, G., 2004. Open-loop control of a bipolar stepper motors using the specialized integrated circuits. *The Annals of "Dunarea de Jos "University of Galati. Fascicle III, Electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics, 27*, pp.53-62.
- [13] Mihalache, G., Zbant, A. and Livint, G., 2013, May. Open-loop control of hybrid stepper motor with two phases using voltage to frequency converter. In *2013 8TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING (ATEE)* (pp. 1-4). IEEE.
- [14] Monographs in electrical and electronic engineering Stepping motors and their microprocessor controls by Takashi Kenjo. Oxford science publications
- [15] <https://www.st.com/en/motor-drivers/stspin820.html>
- [16] System-in-package integrating microstepping controller and 10 A power MOSFETs by st.com
- [17] DUAL FULL-BRIDGE DRIVER by st.com
- [18] STSPIN820: Microstepping Management by st.com
- [19] Nonlinear control of permanent magnet stepper motors Ahmad M. Harb a,* , Ashraf A. Zaher b
- [20] Stepper motor model for Dynamic simulation by Alexandru Morar

- [21] Bodson M, Chiasson J, Novotnak R, Rekowski R. High-performance nonlinear feedback control of a permanent magnet stepper motor. *IEEE Trans Control Syst Technol* 1993;1(1):5–14
- [22] Khorrami F, Krishnamurthy P, Melkote H. *Modeling and adaptive nonlinear control of electric motors*. Heidelberg: Springer Verlag; 2003.
- [23]] Bendjedia M, Ait-Amirat Y, Walther B, Berthon A. Position control of a sensorless stepper motor. *IEEE Trans Power Electron* 2012;27(2):578–8