



***A.T.E.I. ΠΕΙΡΑΙΑ***  
***ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ***  
***ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.***

## **“ΕΛΕΓΧΟΣ ΒΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ”**

***ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ***

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ  
ΠΑΤΣΟΥΛΗΣ**

**Επιβλέπων : Καραϊσάς Πέτρος**  
**Καθηγητής Εφαρμογών**

**Αθήνα, Απρίλιος 2014**

.....  
*Κωνσταντίνος Πατσουλής*

A.M. : 30212

Copyright © Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

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 της 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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

## Περίληψη

Η παρακάτω πτυχιακή εργασία αποτελεί μια αναφορά στο τρόπο λειτουργίας ενός ειδικού ηλεκτρικού κινητήρα, του βηματικού. Ο κινητήρας σταδιακών βημάτων, είναι ο μόνος κινητήρας με ψηφιακή έξοδο, σε σύγκριση με τα υπόλοιπα είδη κινητήρων, είτε πρόκειται για DC είτε πρόκειται για AC, αφού η έξοδος τους είναι ανάλογη της τάσης που εφαρμόζεται πάνω τους.

Αρχικά γίνεται μία γενική εισαγωγή για τους ηλεκτρικούς κινητήρες, στα είδη και στις χρήσεις τους. Επίσης αναφέρεται η συνδυασμένη χρήση τους σε ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην αρχή λειτουργίας του βηματικού κινητήρα, και στο τρόπο οδήγησής του με ένα σύστημα ελέγχου με χρήση της παράλληλης θύρας του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

## Summary

The aim of this work is to present the stepper motors and the principle of operation. It constitutes a report in the way of operation of special electric motors. The motor of progressive steps is the only motor with digital output.

Initially becomes a general introduction for the electric engines, the types and their uses.

Afterwards reports their principles of operation, in the way of response with various charges.

Finally is the verification of operation with the use of parallel port of computer.

## Ευχαριστίες

Τον κύριο Καραϊσά Πέτρο , καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολογίας του ΤΕΙ Πειραιά για την ανάθεση αυτής της εργασίας , τις χρήσιμες συμβουλές που μου παρείχε για την δημιουργία και τη βελτίωση της .

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθεια καθ' όλη την διάρκεια της φοίτησης μου.

# Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	3
Summary.....	4
Ευχαριστίες .....	5
Περιεχόμενα .....	6
Κατάλογος σχημάτων.....	8
Κατάλογος πινάκων.....	9
1 Εισαγωγή.....	11
1.1 Βηματικός κινητήρας.....	11
1.2 Αντικείμενο πτυχιακής.....	11
2 Μηχανές.....	12
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	12
2.2 Είδη ηλεκτρικών κινητήρων.....	13
2.3 Είδη ηλεκτρικοί κινητήρες.....	17
2.4 Χρήσεις ειδικών ηλεκτρικών κινητήρων.....	17
2.5 Βαθμίδες συστήματος ηλεκτρικής κίνησης.....	18
3 Θεωρία βηματικών κινητήρων.....	23
3.1 Εισαγωγή.....	23
3.2 Αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα.....	27
3.3 Επίδραση της αδράνειας και του φορτίου.....	34
3.4 Χαρακτηριστικές ροπής-ρεύματος και ροπής-ταχύτητας.....	34
3.5 Οδήγηση βηματικού κινητήρα.....	37
3.5.1 Οδήγηση R-L.....	37
3.5.2 Μονοπολική οδήγηση.....	38
3.5.3 Διπολική οδήγηση.....	39
3.5.4 Οδήγηση καταμητού.....	40
3.6 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα.....	42
3.7 Είδη βηματικών κινητήρων.....	43
3.7.1 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.....	44
3.7.2 Βηματικοί Κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης.....	46
3.7.3 Υβριδικοί Βηματικοί Κινητήρες.....	47
4 Κατασκευαστικά στοιχεία βηματικού κινητήρα.....	48
4.1 Εισαγωγή.....	48
4.2 Μέθοδοι βηματισμού.....	48
4.2.1 Μονό βήμα - διέγερση μίας σπείρας.....	48
4.2.2 Βηματισμός για υψηλή ροπή.....	49
4.2.3 Μισό βήμα.....	50
4.2.4 Μικροβηματισμός.....	51
4.3 Οδοντοτός ρότορας.....	52

5	Παράλληλη θύρα.....	55
5.1	Εισαγωγή.....	55
5.2	Χαρακτηριστικά παράλληλης θύρας.....	55
5.3	Διευθύνσεις θυρών.....	58
5.4	Κύκλωμα οδήγησης.....	61
5.4.1	Ολοκληρωμένο κύκλωμα ULN2003.....	61
5.4.2	Ζεύγη Darlington.....	63
6	Διάταξη και έλεγχος.....	64
6.1	Περιγραφή διάταξης.....	64
6.2	Νεότερες εκδόσεις Windows.....	65
6.3	Λειτουργία μακροεντολής.....	66
7	Επίλογος.....	68
7.1	Συμπεράσματα.....	68
	Βιβλιογραφία.....	69
	Αναφορές διαδικτύου.....	69

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1	Σύστημα ελέγχου ηλεκτρικής κίνησης.....	18
Σχήμα 2.2	Έλεγχος κλειστού βρόγχου.....	22
Σχήμα 3.1	Λεπτομέρεια κατασκευής.....	23
Σχήμα 3.2	Το ισοδύναμο κύκλωμα μίας φάσης του βηματικού κινητήρα.....	24
Σχήμα 3.3	Έλεγχος κλειστού βρόγχου.....	25
Σχήμα 3.4	Παράδειγμα βηματικού κινητήρα.....	27
Σχήμα 3.5	Ο οπλισμός (δρομέας) μπορεί να περιστραφεί.....	27
Σχήμα 3.6	Η κίνηση του οπλισμού.....	28
Σχήμα 3.7	Αρχή λειτουργίας του βηματικού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης.....	29
Σχήμα 3.8	Δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου του βηματικού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης.....	30
Σχήμα 3.9	Αναπαράσταση της περιστροφής του δρομέα ενός μονοπολικού βηματικού κινητήρα σε ενδιάμεσα στάδια.....	31
Σχήμα 3.10	Χαρακτηριστική ροπής-ρεύματος του βηματικού κινητήρα.....	34
Σχήμα 3.11	Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του βηματικού κινητήρα.....	35
Σχήμα 3.12	Χαρακτηριστικές ροπής-στροφών για βηματικούς κινητήρες.....	36
Σχήμα 3.13	Διαφορετικές συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων του στάτη.....	37
Σχήμα 3.14	Αρχή λειτουργίας οδήγησης R-L.....	38
Σχήμα 3.15	Σύστημα ελέγχου βηματικών κινητήρων – Μονοπολική οδήγηση.....	38
Σχήμα 3.16	Διπολική οδήγηση βηματικού κινητήρα.....	39
Σχήμα 3.17	Οδήγηση κατατμητού βηματικού κινητήρα.....	40
Σχήμα 3.18	Κυματομορφή ρεύματος στάτη με διαμόρφωση εύρους παλμών.....	40
Σχήμα 3.19	Κάρτα οδήγησης βηματικού κινητήρα και κινητήρα.....	41
Σχήμα 3.20	Οδήγηση κατατμητού βηματικού κινητήρα (chopper drive).....	41
Σχήμα 3.21	Κάρτα Οδήγησης Βηματικού Κινητήρα με οδήγηση κατατμητού για διπολική οδήγηση με μικροβηματισμό.....	42
Σχήμα 3.22	Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη.....	44
Σχήμα 3.23	Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη.....	45
Σχήμα 3.24	Τυλίγματα βηματικού κινητήρα Μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης.....	46
Σχήμα 3.25	Τομή υβριδικού κινητήρα.....	47
Σχήμα 4.1	Σχηματική αναπαράσταση μονού βήματος.....	49
Σχήμα 4.2	Σχηματική αναπαράσταση για βηματισμό υψηλής ροπής.....	50
Σχήμα 4.3	Σχηματική αναπαράσταση μισού βήματος.....	51
Σχήμα 4.4	Σχηματική αναπαράσταση μικροβηματισμού.....	52
Σχήμα 4.5	Αναπαράσταση βηματικού κινητήρα (βήμα 1).....	52
Σχήμα 4.6	Αναπαράσταση βηματικού κινητήρα (βήμα 2).....	53
Σχήμα 4.7	Αναπαράσταση βηματικού κινητήρα (βήμα 3).....	53
Σχήμα 4.8	Αναπαράσταση βηματικού κινητήρα (βήμα 4).....	54
Σχήμα 4.9	Λεπτομέρειες κατασκευής βηματικού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης.....	54



Σχήμα 5.1	Η παράλληλη θύρα στο πίσω μέρος ενός H/Y.....	56
Σχήμα 5.2	Συμβολισμός κάθε ακίδας.....	56
Σχήμα 5.3	Διεύθυνση παράλληλης θύρας στα windows.....	60
Σχήμα 5.4	Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ULN2003.....	61
Σχήμα 5.5	Ζεύγος Darlington.....	63
Σχήμα 6.1	Διάγραμμα.....	64
Σχήμα 6.2	Συνδέσεις σε πλακέτα δοκιμών.....	65
Σχήμα 6.3	Γραφικό περιβάλλον ελέγχουβηματικού κινητήρα με Visual Basic.....	67

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1	Διάφοροι τύποι μετατροπών ισχύος.....	20
Πίνακας 4.1	Ακολουθία παλμών για μονό βήμα.....	48
Πίνακας 4.2	Ακολουθία παλμών για βηματισμό υψηλής ροπής.....	49
Πίνακας 4.3	Ακολουθία παλμών για μισό βήμα.....	50
Πίνακας 5.1	Επεξήγηση κάθε ακίδας.....	58
Πίνακας 5.2	Χρησιμοποιούμενες διευθύνσεις.....	59
Πίνακας 5.3	LPT διευθύνσεις στην περιοχή δεδομένων του BIOS.....	59
Πίνακας 5.4	Τεχνικά χαρακτηριστικά ULN2003.....	62

# Πρόλογος

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται ο ορισμός του βηματικού κινητήρα και το αντικείμενο της πτυχιακής. Στο κεφάλαιο δύο αναφέρονται γενικές έννοιες όπως οι κινητήρες και τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης και δίνεται μια περιγραφή ή εξήγηση καθεμιάς από αυτές. Στα κεφάλαια τρία και τέσσερα συναντάμε θεωρητικά στοιχεία που εξηγούν καθένα από τα επιμέρους τμήματα της όπως η αρχή λειτουργίας των βηματικών κινητήρων, ο τρόπος οδήγησής τους, τα είδη αυτών των κινητήρων αλλά και παραλλαγές τους. Στο κεφάλαιο πέντε γίνεται αναφορά στην παράλληλη θύρα ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Εξηγείται ο τρόπος λειτουργίας της και γίνεται λεπτομερής παρουσιάσή της τόσο σε επίπεδο λογισμικού όσο και σε επίπεδο υλικού. Στο έκτο βλέπουμε το διάγραμμα διάταξης και τις συνδέσεις των καλωδίων καθώς και πως γίνεται ο έλεγχος μέσω του περιβάλλοντος του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Τέλος, στο κεφάλαιο επτά βρίσκουμε συμπεράσματα και τη χρησιμοποιούμενη βιβλιογραφία .

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Βηματικός κινητήρας

Ο βηματικός κινητήρας ή αλλιώς κινητήρας σταδιακών βημάτων, είναι ο μόνος κινητήρας πραγματικά ψηφιακός στην έξοδο του. Στην πλειοψηφία των κινητήρων, συμπεριλαμβανομένων εκείνων του εναλλασσομένου ρεύματος (AC) αλλά και εκείνων του συνεχούς ρεύματος (DC), ο άξονας κίνησης περιστρέφεται με μια τιμή ανάλογη της τάσης ή της συχνότητας που εφαρμόζεται πάνω του. Οι βηματικοί κινητήρες ωστόσο χρησιμοποιούν συνδυασμό ηλεκτρικών παλμών για την κίνησή τους.

Ο κινητήρας σταδιακών βημάτων, περιστρέφεται με ξεχωριστές κινήσεις που λέγονται βήματα. Αφού ο άξονας κίνησης κάνει ένα βήμα, σταματά να γυρνά μέχρι να λάβει την επόμενη εντολή.

## 1.2 Αντικείμενο πτυχιακής

Αντικείμενο της πτυχιακής αυτής είναι η διερεύνηση λειτουργίας των βηματικών κινητήρων απο θεωρητικής σκοπιάς. Ένας ειδικός κινητήρας όπως είναι ο βηματικός λειτουργεί πάντα σε ένα σύστημα ελέγχου το οποίο αποτελείται από επιμέρους ηλεκτρικές μονάδες. Θα γίνει μία ανάλυση ελέγχου ενός τέτοιου κινητήρα με ένα κοινό ηλεκτρονικό υπολογιστή με τον οποίο θα υπάρξει επικοινωνία μέσω της παράλληλης θύρας του, η οποία είναι αρκετά διαδεδομένη και υπάρχει ενσωματωμένη σε κάθε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

# 2 Μηχανές

## 2.1 Ιστορική αναδρομή

Η γέννηση των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης ήρθε με την σχεδόν ταυτόχρονη θεμελίωση από τους Michael Faraday και Joseph Henry (εργάζονταν ανεξάρτητα) των αρχών του ηλεκτρομαγνητισμού το 1831. Στη συνέχεια στα 1888 κατασκευάζονται βάσει των αρχών αυτών οι πρώτοι ηλεκτρικοί κινητήρες, με τους Thomas Edison και Nikola Tesla να έχουν μια επιστημονική διαμάχη υποστηρίζοντας τον Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος και τον Κινητήρα Εναλλασσόμενου Ρεύματος αντίστοιχα. Ο κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος επικράτησε τελικά, όμως και τα δύο είδη κινητήρων εξελίχθηκαν και βελτιώθηκαν, βρίσκοντας πάμπολλες εφαρμογές, κυρίως μετά τον δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο.

Η πραγματική επανάσταση όμως, στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, ήρθε όταν αποκτήθηκε η δυνατότητα για ακριβή έλεγχο των ηλεκτρικών αυτών κινητήρων, ώστε να επιτυγχάνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα και μάλιστα αυτόματα. Αρχικά επιχειρήθηκε ο έλεγχος με απλά μηχανικά ή ηλεκτρικά συστήματα (όπως π.χ. οι λυχνίες κενού) τα οποία δεν είχαν αρκούντως ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ η απόδοσή τους ήταν εξαιρετικά χαμηλή. Η εφεύρεση που άλλαξε εντελώς το τοπίο δίνοντας πρωτόγνωρες μέχρι τότε δυνατότητες ελέγχου ήταν το τρανζίστορ, που παρουσιάστηκε από τους William Shockley, John Bardeen και Walter Brattain το 1947. Η εξέλιξη του τρανζίστορ και η εμφάνιση τα αμέσως επόμενα χρόνια των «απογόνων» του όπως το θυρίστορ (Thyristor) (1957), το MOSFET (1969) και οι αμέσως επόμενες εξελίξεις τους για εφαρμογές ισχύος όπως το GTO και το IGBT έδωσαν τη δυνατότητα διαχείρισης μεγάλων ηλεκτρικών ισχύων με εξαιρετικά μεγάλες διακοπτικές συχνότητες, αλλάζοντας άρδην το τοπίο και δημιουργώντας ένα νέο και ραγδαία εξελισσόμενο αντικείμενο στην επιστήμη του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού & Μηχανικού Υπολογιστών που γρήγορα συγκέντρωσε τεράστιο ενδιαφέρον. Το πεδίο αυτό δεν είναι άλλο από τα Ηλεκτρονικά Ισχύος.

Με την έλευση των ηλεκτρονικών ισχύος δόθηκε στους μηχανικούς η δυνατότητα να κατασκευάσουν προηγμένες διατάξεις ελέγχου και να αναπτύξουν τους απαραίτητους γι' αυτές αλγορίθμους. Ιδιαίτερα με τους μετατροπείς ισχύος δόθηκε η δυνατότητα τροφοδοσίας των κινητήρων με τάσεις μεταβλητού πλάτους και συχνότητας, γεγονός που επέτρεψε τον πλήρη έλεγχό τους με ιδιαίτερα αποδοτικό τρόπο. Σημαντικό ρόλο βεβαίως διαδραμάτισε και η εισαγωγή νέων και διαρκώς εξελισσόμενων τεχνικών ελέγχου, οι οποίες σήμερα επιτρέπουν τον έλεγχο με ηλεκτρονικό τρόπο π.χ. μέσω ενός ψηφιακού ή ενός αναλογικού υπολογιστή. Κάθε σύγχρονο σύστημα ηλεκτρικής κίνησης υψηλών προδιαγραφών συνοδεύεται απαραίτητα από τον κατάλληλο μετατροπέα ισχύος, για τον οποίο έχει αναπτυχθεί και εγκατασταθεί το κατάλληλο υλικό και λογισμικό ελέγχου.

Ως ηλεκτρική μηχανή ορίζεται κάθε συσκευή που πραγματοποιεί ηλεκτρομηχανική μετατροπή, δηλαδή μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και αντιστρόφως. Η ηλεκτρική μηχανή είναι η καρδιά ενός συστήματος κίνησης. Οι μετατροπείς και ο έλεγχος που εφαρμόζεται σε αυτούς έχουν ένα και μοναδικό σκοπό: την επίτευξη της επιθυμητής λειτουργίας της ηλεκτρικής μηχανής, ώστε να λάβουμε το ζητούμενο αποτέλεσμα στο φορτίο.

Ανάλογα με το είδος του φορτίου, την πηγή ισχύος, την ύπαρξη ή μη μετατροπέα και διάφορα άλλα οικονομοτεχνικά κριτήρια που άπτονται της εκάστοτε εφαρμογής επιλέγουμε το είδος κινητήρα που θα χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο σύστημα ηλεκτρικής κίνησης. Οι κινητήρες στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης διακρίνονται ανάλογα με την τροφοδοσία τους σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) και τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Η κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες περιλαμβάνει όμως πολλές υποκατηγορίες με σημαντικές διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά και στη λειτουργία τους.

## 2.2 Είδη ηλεκτρικών κινητήρων

Γενικά, υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγορίες ηλεκτρικών κινητήρων:

### Κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC)

Αυτού του τύπου οι κινητήρες τροφοδοτούνται από το μονοφασικό ή το τριφασικό δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης με συχνότητα 50 Hz. Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες στην πράξη καλύπτοντας ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών. Υπάρχουν πολλά είδη μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος με διαφορετικά χαρακτηριστικά και τρόπους λειτουργίας. Διακρίνονται σε μονοφασικές, διφασικές, τριφασικές και πολυφασικές, ανάλογα με τον αριθμό των εναλλασσόμενων ημιτονοειδών τάσεων τροφοδοσίας. Επίσης διακρίνονται σε σύγχρονες και ασύγχρονες αναλόγως με την ταχύτητα περιστροφής τους κατά την κανονική λειτουργία. Στην πλειοψηφία των πρακτικών εφαρμογών 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° ηλεκτρικές μοίρες. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τους πιο σημαντικούς τύπους σύγχρονων και ασύγχρονων μηχανών:

#### -Σύγχρονες Μηχανές :

Οι σύγχρονες μηχανές, όπως φανερώνει και το όνομά τους περιστρέφονται με τη σύγχρονη ταχύτητα στην ονομαστική τους λειτουργία. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην αλληλεπίδραση δύο πεδίων: του πεδίου διεγέρσεως και του πεδίου τυμπάνου. Το πεδίο τυμπάνου δημιουργείται συνήθως από τριφασικά σταθερά τυλίγματα που βρίσκονται στον στάτη και δημιουργούν ένα ομοιόμορφο στρεφόμενο και ημιτονοειδώς καταναμημένο στο στάτη μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο διεγέρσεως βρίσκεται συνήθως στον δρομέα, χωρίς όμως αυτό να είναι απαραίτητο. Συνήθως είναι ένας ηλεκτρομαγνήτης (τύλιγμα διεγέρσεως ή τύλιγμα πεδίου) ο οποίος τροφοδοτείται με συνεχή τάση μέσω ψηκτρών.

Όμως με την μεγάλη έρευνα και τις τελευταίες προόδους που έχουν συντελεστεί στην τεχνολογία των υλικών έχουν προκύψει μόνιμοι μαγνήτες με μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση (μέχρι 1,2T) και υψηλή συνέχουσα δύναμη (μέχρι 1000kA/m), όπως π.χ. τα κράματα Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου που τοποθετούνται επιφανειακά στον δρομέα. Τα υλικά αυτά έδωσαν τη δυνατότητα αντικατάστασης του ηλεκτρομαγνήτη που συνήθως απαιτούσε τροφοδοσία με ψήκτρες από κάποιον μόνιμο μαγνήτη, ο οποίος δεν έχει ανάγκη ηλεκτρικής τροφοδοσίας. 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 και 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 ευθύ άξονα (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.

### -Ασύγχρονες Μηχανές :

Οι ασύγχρονες μηχανές ή μηχανές επαγωγής, όπως φανερώνει και το όνομά τους στρέφονται γενικά με ταχύτητα διαφορετική από τη σύγχρονη στην ονομαστική τους λειτουργία. Ο στάτης των μηχανών αυτών είναι ίδιος με τον στάτη των σύγχρονων μηχανών και διαθέτει τριφασικά σταθερά τυλίγματα που δημιουργούν ένα ομοιόμορφο στρεφόμενο και ημιτονοειδώς κατανομημένο στο στάτη μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Για τη διαμόρφωση του δρομέα των ασύγχρονων μηχανών υπάρχουν δύο δυνατότητες. Ή 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 διαμήκεις 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:

$$S = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$

όπου  $\omega_s$  η σύγχρονη κυκλική συχνότητα και  $\omega$  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 0,01-0,05αμ.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες εναλλασσομένου 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 τους μοντέρνους αντιστροφείς 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.

### Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC)

Οι ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος ιστορικά προηγούνται των μηχανών εναλλασσομένου 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 (π.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 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 αλληλεπιδρούν 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.

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα η μηχανή συνεχούς ρεύματος να μην διαθέτει μόνιμους μαγνήτες στον στάτη αλλά τύλιγμα ηλεκτρομαγνήτη (ως διέγερση), που αποτελεί και τη συνθετότερη πρακτική. 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.

**• Διέγερσης σε Σειρά:**

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

**• Παράλληλης Διέγερσης:**

Το τύλιγμα πεδίου τροφοδοτείται παράλληλα με το τύλιγμα τυμπάνου δίνοντας τη δυνατότητα για κατασκευή κινητήρων υψηλών ταχυτήτων.

**• 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.

Τέλος υπάρχει η δυνατότητα να μειώσουμε το ρεύμα του τυλίγματος πεδίου άρα και την ένταση του μαγνητικού πεδίου που αυτό προκαλεί, έτσι 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, φυσικά.

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος παρουσιάζουν και αρκετά σημαντικά μειονεκτήματα όπως ανάγκη τακτικής συντήρησης του συλλέκτη, σχετικά μεγάλο βάρος του δρομέα, σχετικά χαμηλή μέγιστη ταχύτητα λόγω μηχανικής καταπόνησης του συλλέκτη και υψηλό κόστος κατασκευής. Γι' αυτούς τους λόγους είναι επιθυμητή η αντικατάστασή τους, όπου αυτό είναι φυσικά δυνατόν, με τους πιο αξιόπιστους και εύρωστους ασύγχρονους κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος.

Κινητήρες ακριβείας οι οποίοι τροφοδοτούνται από ηλεκτρονικό κύκλωμα. Οι πιο γνωστοί είναι οι βηματικοί κινητήρες για εφαρμογές ελέγχου θέσης και οι 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, πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες, κινητήρες υπερηχητικού κύματος, κινητήρες πλαστικοποιημένου μαγνήτη, 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.

Γενικά, ο έλεγχος ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης είναι απαραίτητος όταν υπάρχουν συχνές μεταβολές των μεγεθών της ροπής, της ταχύτητας και της ισχύος του φορτίου για να αποφευχθεί η υπερφόρτιση του κινητήρα, η αστάθεια του συστήματος, η υπερθέρμανση και η υπερβολική κατανάλωση ενέργειας. Εξάλλου, η οικονομία στην κατανάλωση ενέργειας και η αύξηση του βαθμού απόδοσης με τον έλεγχο, επιτρέπουν τη χρήση κινητήρων χαμηλότερης ονομαστικής ισχύος.



## 2.3 Ειδικοί ηλεκτρικοί κινητήρες

Η προτίμηση των συστημάτων ειδικών ηλεκτρικών κινητήρων οφείλεται στα πλεονεκτήματά τους, σε σχέση με άλλα συστήματα κίνησης όπως τα μηχανικά ή τα υδραυλικά. Η επιλογή αυτή εξηγείται από τα εξής πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα συστήματα αυτά:

Συστήματα ειδικών ηλεκτρικών κινητήρων υπάρχουν για ευρεία περιοχή ισχύος: από ισχύς μικρότερη του 1W (ηλεκτρονικά ρολόγια) μέχρι ισχύς μερικών ίππων.

Τα συστήματα αυτά προσφέρουν ευρεία περιοχή ταχυτήτων: από μηδέν μέχρι 100.000 ΣΑΛ.

Προσαρμόζονται σε διάφορες λειτουργικές καταστάσεις όπως: σε κλειστά, χωρίς αερισμό, σε υγρά, σε εκρηκτικά, σε ραδιενεργά περιβάλλοντα. 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 προ παντός 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.

## 2.4 Χρήσεις ειδικών ηλεκτρικών κινητήρων

Με την πάροδο του χρόνου, βλέπουμε σε σπίτια, σε γραφεία, σε εργαστήρια και σε εργοστάσια της βιομηχανίας όλο και περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες. 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.

Μερικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε μια οικία είναι οι παρακάτω:

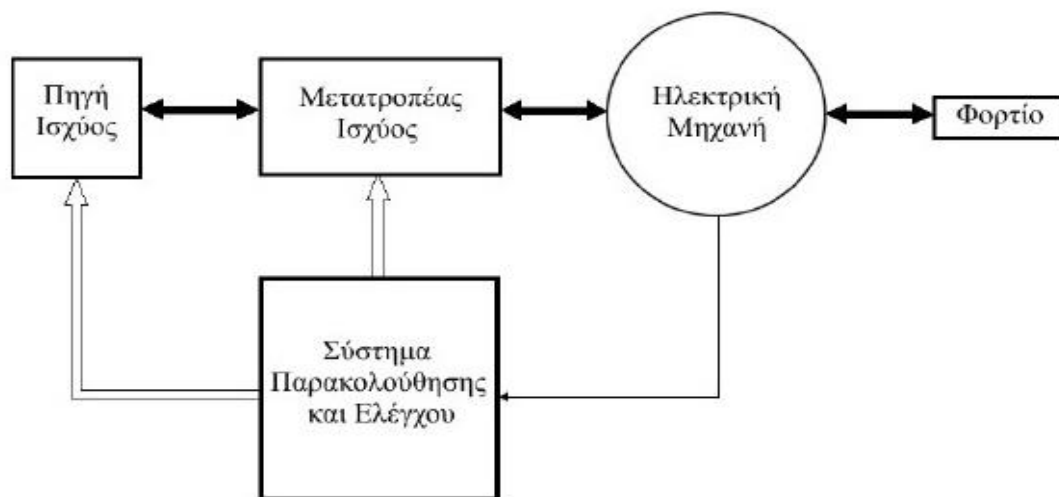
- Οικιακές συσκευές(ψυγείο, πλυντήριο πιάτων και ρούχων, κουζίνα, Αιρ κοντίσιον)
- Εξοπλισμός γραφείου(υπολογιστής, εκτυπωτής, φωτογραφική μηχανή, κάμερα)
- Εργαλεία(ηλεκτρικό κατσαβίδι, τρυπάνι, κομπρεσερ αέρα)

## 2.5 Βαθμίδες συστήματος ηλεκτρικής κίνησης

Ένας ειδικός κινητήρας λειτουργεί πάντα σε 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

Η διασύνδεση των παραπάνω αναφερόμενων βαθμίδων εικονίζεται διαγραμματικά στο αμέσως παρακάτω σχήμα 2.1:



Σχήμα 2.1: Σύστημα ελέγχου ηλεκτρικής κίνησης

Οι παραπάνω βαθμίδες μπορούν να διαιρεθούν 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 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 (π.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.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη αλλά περιεκτική ανάλυση όλων των επιμέρους βαθμίδων ενός τυπικού συστήματος ηλεκτρικής κίνησης όπως αυτό που περιγράφηκε παραπάνω.

## Ηλεκτρική Μηχανή

Ως ηλεκτρική μηχανή ορίζεται κάθε συσκευή που πραγματοποιεί ηλεκτρομηχανική μετατροπή, δηλαδή μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και αντιστρόφως. Η ηλεκτρική μηχανή είναι η καρδιά ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης. Οι μετατροπείς και ο έλεγχος που εφαρμόζεται σε αυτούς έχουν ένα και μοναδικό σκοπό: Την επίτευξη της επιθυμητής λειτουργίας της ηλεκτρικής μηχανής ώστε να λάβουμε το ζητούμενο αποτέλεσμα στο φορτίο. Ανάλογα με το είδος του φορτίου, την πηγή ισχύος, την ύπαρξη ή μη μετατροπέα και διάφορα άλλα οικονομικοτεχνικά κριτήρια που άπτονται της εκάστοτε εφαρμογής επιλέγουμε το είδος του κινητήρα που θα χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο σύστημα ηλεκτρικής κίνησης. Οι κινητήρες που απαντώνται στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης διακρίνονται ανάλογα με την τροφοδοσία τους σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τους Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος και τους Κινητήρες Εναλλασσομένου Ρεύματος. Η κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες περιλαμβάνει όμως πολλές υποκατηγορίες με σημαντικές διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά και στη λειτουργία τους. Σε προηγούμενη παράγραφο επιχειρήθηκε να γίνει μια σύντομη αλλά όσο το δυνατό περιεκτική ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα στις πρακτικές εφαρμογές και για το λόγο αυτό παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

## Πηγή Ισχύος

Η πηγή ηλεκτρικής ισχύος παρέχει ηλεκτρική ισχύ υπό συνεχή ή εναλλασσόμενη τάση. Ως πηγή ισχύος τις περισσότερες φορές έχουμε την τριφασική συμμετρική παροχή εναλλασσόμενης τάσης από το δίκτυο (Δ.Ε.Η.), η οποία παράγεται κατά μείζονα λόγο από σύγχρονες γεννήτριες στους μεγάλους θερμικούς σταθμούς παραγωγής και κατά ελάσσονα, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, από ανανεώσιμες πηγές όπως η αιολική, η ηλιακή ενέργεια κ.α. Από την άλλη πλευρά, ενδέχεται η τάση που παρέχει η πηγή ισχύος να είναι συνεχής και να προέρχεται είτε από ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου, είτε από συσσωρευτές (μπαταρίες), είτε από φωτοβολταϊκές συστοιχίες, είτε εσχάτως ακόμα και από κυψέλες καυσίμου. Ανάλογα με το είδος της ηλεκτρικής μηχανής και της πηγής ισχύος που διαθέτουμε θα πρέπει να επιλέξουμε τον κατάλληλο μετατροπέα που θα τροφοδοτήσει την μηχανή μας με την τάση που απαιτείται ώστε να λειτουργήσει σωστά. Σε πολλές περιπτώσεις στις οποίες η πηγή ισχύος που διαθέτουμε δεν είναι κατάλληλη για την τροφοδοσία της ηλεκτρικής μηχανής (π.χ. εναλλασσόμενη τροφοδοσία σε μηχανή συνεχούς και αντιστρόφως) ο μετατροπέας που ακολουθεί, εκτός από τον έλεγχο της, έχει και ως σκοπό τη μετατροπή της ισχύος σε μορφή που μπορεί να αξιοποιήσει η μηχανή και υπό αυτή την έννοια είναι απαραίτητος για τη λειτουργία της.

## Μετατροπέας Ισχύος

Ο μετατροπέας ισχύος είναι η διάταξη που παρεμβάλλεται ανάμεσα στην πηγή ισχύος και στην ηλεκτρική μηχανή. Σκοπός του είναι είτε απλά να καταστήσει δυνατή τη λειτουργία της ηλεκτρικής μηχανής είτε επιπλέον να ελέγξει τη λειτουργία αυτή. Για το λόγο αυτό υπάρχουν ελεγχόμενοι και μη ελεγχόμενοι μετατροπείς ισχύος. Ο τύπος του μετατροπέα που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την εφαρμογή.

Στον παρακάτω πίνακα καταχωρούνται οι διάφοροι τύποι μετατροπέων ισχύος. Διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις για το είδος του μετατροπέα που απαιτείται ανάλογα με το είδος της πηγής ισχύος και της ηλεκτρικής μηχανής που διαθέτουμε:

Τάση Πηγής Ισχύος	Τάση Τροφοδοσίας Ηλεκτρικής Μηχανής	Μετατροπέας που απλώς θα καταστήσει δυνατή τη λειτουργία της μηχανής	Μετατροπέας που θα ελέγξει τη λειτουργία της μηχανής
Συνεχής	Συνεχής	Ελεγχόμενος μετατροπέας συνεχούς σε συνεχές	Ελεγχόμενος μετατροπέας συνεχούς σε συνεχές
	Εναλλασσόμενη	Αντιστροφέας	Ελεγχόμενος Αντιστροφέας
Εναλλασσόμενη	Συνεχής	Ανορθωτής	Ελεγχόμενος Ανορθωτής
	Εναλλασσόμενη	(Γενικά δεν απαιτείται) Πιθανώς όμως να απαιτείται Μ/Σ ή Αντιστροφέας	Ελεγχόμενος ή μη Ανορθωτής και ελεγχόμενος Αντιστροφέας

Πίνακας 2.1: Διάφοροι τύποι μετατροπέων ισχύος

## Φορτίο

Φορτίο σε ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης ονομάζεται το μηχανικό, συνήθως, σύστημα που είναι συνδεδεμένο στον άξονα της ηλεκτρικής μηχανής και ανταλλάσσει με αυτήν μηχανική ενέργεια (είτε λαμβάνει οπότε έχουμε λειτουργία κινητήρα είτε προσφέρει οπότε έχουμε λειτουργία γεννήτριας).

Το φορτίο είναι το πρωταρχικό στοιχείο ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης και ο όλος σχεδιασμός του συστήματος γίνεται πάνω σε αυτό. Έτσι σκοπός κάθε συστήματος ηλεκτρικής κίνησης είναι να δώσει την κατάλληλη ενέργεια και με τον κατάλληλο τρόπο στο φορτίο του, ώστε αυτό να αποκτήσει την επιθυμητή συμπεριφορά. Συνεπώς ο σχεδιασμός ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης ξεκινάει με την εξέταση του φορτίου που διαθέτουμε.

Με την διαδικασία αυτή αποφεύγουμε δυσάρεστα φαινόμενα όπως υπερφόρτιση του κινητήρα, αστάθεια του συστήματος, αργή απόκριση, υπερθέρμανση και υπερβολική κατανάλωση ενέργειας που μπορεί να προκληθούν από την λανθασμένη εκτίμηση του τύπου φορτίου.

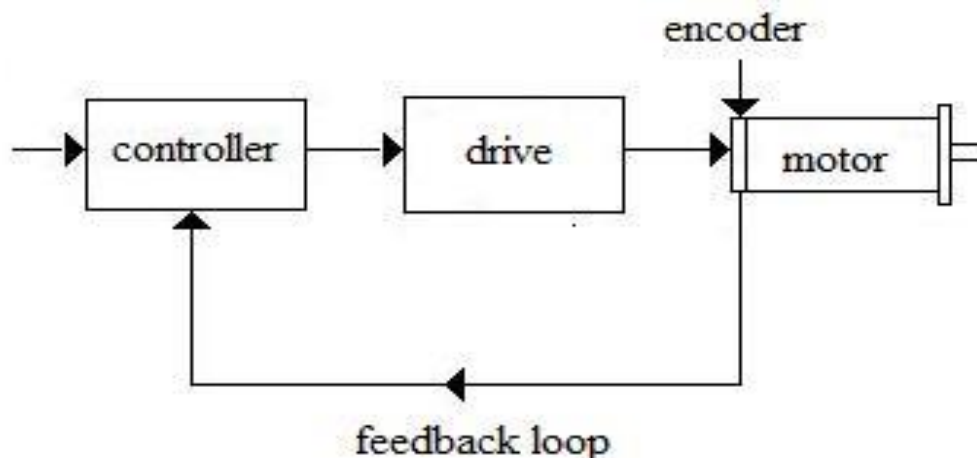
## Σύστημα Ελέγχου

Όπως φανερώνει και ο τίτλος το σύστημα ελέγχου έχει ως κύριο ρόλο την παρακολούθηση της λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης και την ανάληψη εκείνων των δράσεων ελέγχου που θα δώσουν στην έξοδο την επιθυμητή απόκριση όπως την ταχύτητα, τη θέση του κινητήρα, τη κατεύθυνση και το ρυθμό επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης

Το σύστημα παρακολούθησης λαμβάνει κάποια δεδομένα από τον κινητήρα. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να προέρχονται από αισθητήρες και μετρητικές διατάξεις. Σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον, όμως, όπου τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης λειτουργούν υπό αντίξοες συνθήκες (σκόνη, υγρασία κλπ.) η λειτουργία των αισθητήρων επηρεάζεται αρνητικά. Επίσης η ανάγκη για ύπαρξη αισθητήρων αυξάνει σημαντικά τόσο το κόστος προμήθειας και συντήρησης όσο και την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης, μειώνοντας έτσι την αξιοπιστία της. Για το λόγο αυτό στα σύγχρονα συστήματα ελέγχου για συστήματα ηλεκτρικής κίνησης υπάρχει συνήθως μια διάταξη που καλείται παρατηρητής (observer) ή εκτιμητής (estimator) και σκοπός του είναι να υποκαταστήσει τους περισσότερους αισθητήρες. Η λειτουργία του συνίσταται στην μαθηματική εκτίμηση των κρίσιμων μεγεθών του κινητήρα με χρήση των εξισώσεων που περιγράφουν τη λειτουργία του και ως μοναδικές εισόδους τις τάσεις τροφοδοσίας και τα ρεύματα γραμμής ή τα ρεύματα γραμμής και την ταχύτητα του δρομέα. Ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου με παρατηρητή / εκτιμητή ονομάζεται σύστημα χωρίς αισθητήρες ανάδρασης (sensorless). Ο παρατηρητής / εκτιμητής είναι ένα πολύ σημαντικό υποσύστημα του συστήματος ελέγχου καθώς παρέχει στο σύστημα ελέγχου όλα εκείνα τα δεδομένα για την παρούσα κατάσταση του κινητήρα, όπως ταχύτητα περιστροφής, μαγνητική ροή, αναπτυσσόμενη ροπή, ισχύς κ.α., που είναι απαραίτητα για τη σωστή εκτέλεση του αλγορίθμου ελέγχου.

Η πραγματική εργασία που πραγματοποιείται από τον κινητήρα καθορίζεται από τον ελεγκτή. Το σύστημα ελέγχου είναι το σύστημα εκείνο που ως είσοδο λαμβάνει την παρούσα και την επιθυμητή κατάσταση της ηλεκτρικής μηχανής και βάσει ενός αλγορίθμου ελέγχου δίνει τις κατάλληλες εντολές στον μετατροπέα ισχύος, ώστε η μηχανή να μεταβεί στην επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας. Δηλαδή ένα σύστημα ελέγχου με ανάδραση (feedback) έτσι ώστε να ελέγχει στην έξοδο την επιθυμητή απόκριση. Ένα τέτοιο σύστημα είναι γνωστό ως έλεγχος ταχύτητας κλειστού βρόγχου (closed-loop velocity system). Οι εντολές αυτές για τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος είναι η κατάλληλη παλμοδότηση συγκεκριμένων κάθε φορά διακοπτικών στοιχείων που προκύπτουν από τον αλγόριθμο ελέγχου, για τον έλεγχο της έναυσης ή της σβέσης τους. Η μονάδα ελέγχου απαιτεί μια μονάδα επεξεργασίας που ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να είναι είτε ένας μικροεπεξεργαστής, είτε ένας αναλογικός υπολογιστής είτε ένας ψηφιακός επεξεργαστής σήματος (DSP) μαζί με τα απαραίτητα περιφερειακά του, είτε ακόμη και ένας προσωπικός υπολογιστής (PC), εφοδιασμένος με κατάλληλη κάρτα εισόδου-εξόδου. Το σύστημα ελέγχου εφαρμόζει με τη βοήθεια της μονάδας επεξεργασίας που διαθέτει τον εκάστοτε επιλεγμένο αλγόριθμο ελέγχου. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές και αλγόριθμοι ελέγχου.

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου με ανάδραση



Σχήμα 2.2 Έλεγχος κλειστού βρόγχου

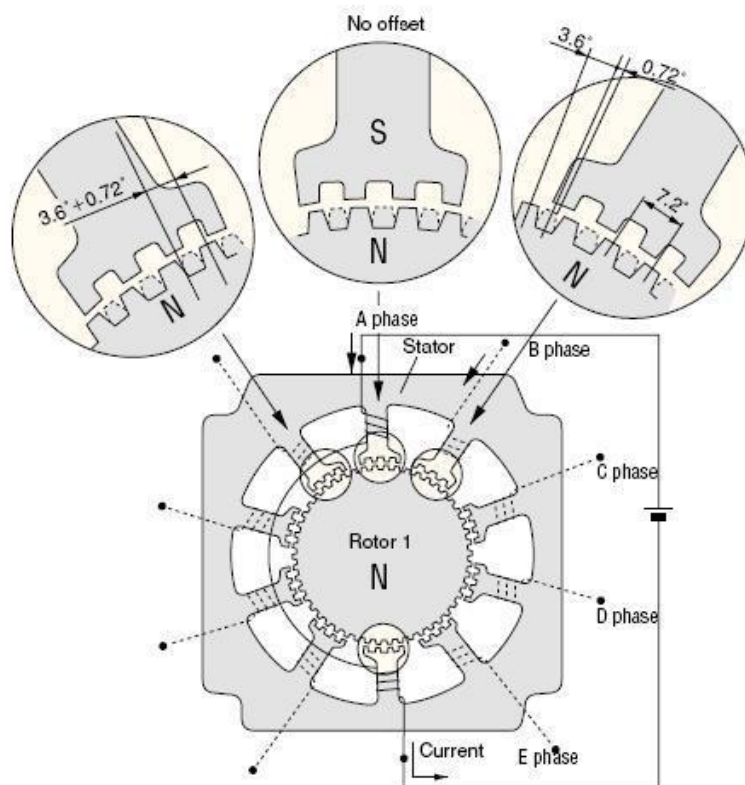
# 3

## Θεωρία βηματικού κινητήρα

### 3.1 Εισαγωγή

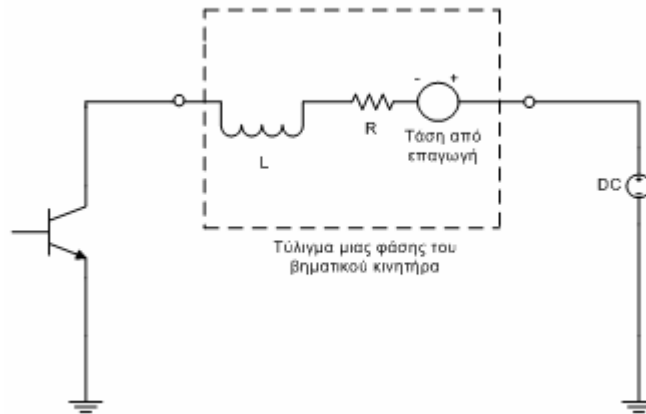
Ειδικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται όταν χρειάζεται ακρίβεια στο καθορισμό της θέσης μιας μετακίνησης είναι οι βηματικοί κινητήρες. Γενικά η κατασκευή τους είναι απλή, αφού το μόνο κινούμενο τμήμα τους είναι ο ρότορας, ο οποίος δεν έχει πηνία, ο μεταγωγέας και οι ψήκτρες. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα τους είναι ότι ο άξονας εισόδου περιστρέφεται σε μία σειρά διακεκριμένων γωνιακών διαστημάτων ή βημάτων και ένα βήμα πραγματοποιείται κάθε φορά που μια εντολή παλμού λαμβάνεται. Όταν ένας τελικός αριθμός παλμών έχει παραχθεί ο άξονας θα περιστραφεί προς μια γνωστή γωνία.

Χαρακτηριστικά, όλα τα τυλίγματα στη μηχανή είναι μέρος του στάτη και ο ρότορας είναι είτε ένας μόνιμος μαγνήτης είτε, στην περίπτωση των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης, ένας οδοντωτός κύλινδρος κάποιου μαγνητικά μαλακού υλικού όπως μπορούμε να δούμε και στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 Λεπτομέρεια κατασκευής

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός βηματικού κινητήρα φαίνεται στο σχήμα 3.2 και δεν είναι τίποτε άλλο εκτός από ένα πηνίο σε σειρά με μία αντίσταση. Κατά την λειτουργία του εμφανίζεται και η τάση από επαγωγή στο τυλίγμα που παράγεται λόγω της περιστροφής του δρομέα.



Σχήμα 3.2 Το ισοδύναμο κύκλωμα μίας φάσης του βηματικού κινητήρα

Οι βηματικοί κινητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα απλά συστήματα ελέγχου ανοιχτού βρόχου (open-loop) και είναι γενικά επαρκείς για τα συστήματα που λειτουργούν σε χαμηλές επιταχύνσεις με στατικά φορτία. Αντιθέτως, για τις υψηλές επιταχύνσεις και ιδιαίτερα εάν περιλαμβάνουν φορτία μεταβλητής ροπής αναγκαστικά χρησιμοποιούμε συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου (close loop). Εάν ο βηματικός κινητήρας σε ένα σύστημα ελέγχου ανοιχτού βρόχου ξεπεράσει την οριακή ροπή, ο προσδιορισμός της θέσης χάνεται και το σύστημα πρέπει να αρχικοποιηθεί εκ νέου.

Υπάρχουν δύο είδη βηματικών κινητήρων, με μόνιμο μαγνήτη (permanent magnet motors) και με μεταβλητή μαγνητική αντίδραση (variable reluctance motors). Υπάρχουν επίσης και υβριδικοί κινητήρες (hybrid stepping motors), οι οποίοι είναι όμοιοι με τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη από την άποψη του ελεγκτή. Ακόμα και να λείπει η ετικέτα από έναν κινητήρα, μπορούμε γενικά να τους ξεχωρίσουμε με τη βοήθεια της αίσθησης της αφής όταν δεν συνδέονται με καμία πηγή τροφοδοσίας. Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη τείνουν «να βαρύνουν» καθώς στρίβουμε το στροφέα με τα δάχτυλά μας, ενώ οι μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης περιστρέφονται σχεδόν ελεύθερα. Μπορούμε επίσης να διακρίνουμε τα δύο είδη με ένα ωμόμετρο. Οι μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης έχουν συνήθως τρία τυλίγματα (μερικές φορές τέσσερα), με μια κοινή επιστροφή, ενώ οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν συνήθως δύο ανεξάρτητα τυλίγματα.

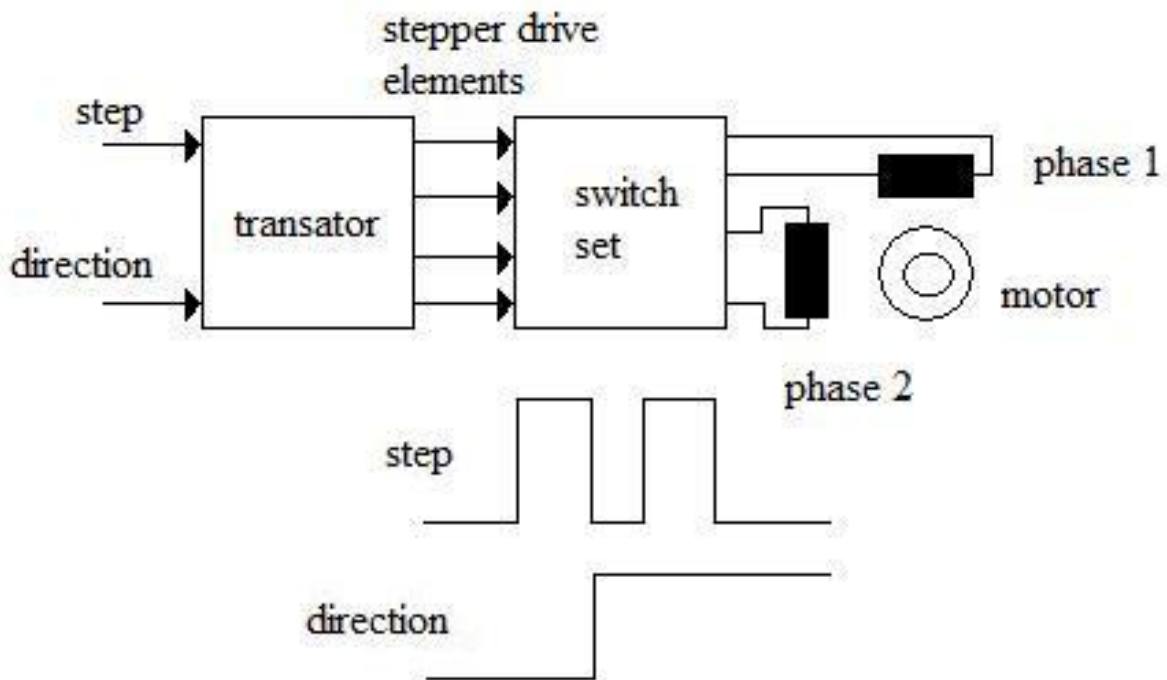
Ο βηματικός κινητήρας δεν μπορεί να λειτουργήσει χωρίς οδήγηση (drive), η οποία είναι υπεύθυνη για την ενεργοποίηση των τυλιγμάτων και συνήθως συμπεριλαμβάνει ένα μικροεπεξεργαστή. Ένα βασικό σύστημα βηματικού κινητήρα φαίνεται στο σχήμα 3.3, ο ρυθμιστής περιλαμβάνει τα ηλεκτρονικά κυκλώματα τα οποία παρέχουν ρεύμα στο κινητήρα. Η έξοδος είναι γωνιακή θέση του άξονα του κινητήρα, ενώ η είσοδος συνιστάται σε δύο ψηφιακά σήματα χαμηλής ισχύος. Τα σήματα εισόδου του σε ένα βηματικό drive είναι το σήμα διεύθυνσης και οι βηματικοί παλμοί. Κάθε φορά που ένας παλμός εμφανίζεται στο βήμα της γραμμής εισόδου ο κινητήρας κάνει ένα βήμα και ο άξονας



παραμένει στη νέα του θέση μέχρι ένας καινούργιος παλμός σήματος παραχθεί. Η κατάσταση της εισόδου κατεύθυνσης καθορίζει την βηματίση του κινητήρα, δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα. Το βηματικό drive μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια στον κινητήρα σε απόκριση των σημάτων ελέγχου που δέχεται από το σύστημα ελέγχου. Ο κινητήρας είναι μια συσκευή που παράγει ροπή η οποία δημιουργείται από την αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του ρότορα, και η οποία είναι ανάλογη του ρεύματος και του αριθμού των σπειρών του κάθε πόλου. Έτσι σημαντικό για την οδήγηση του κινητήρα είναι το drive να δρα ως πηγή ρεύματος, η τάση του ρεύματος είναι σημαντική μόνο για τον έλεγχο του ρεύματος

Ένα τυπικό διάγραμμα ενός βηματικού drive φαίνεται στο σχήμα 3.3 το οποίο αποτελείται από τα κυκλώματα του "μεταφραστή" και από τα κυκλώματα ισχύος. Η λειτουργία του κυκλώματος του μεταφραστή είναι να μετατρέπει τους παλμούς βηματίσης και τον παλμό διεύθυνσης σε κυματομορφή ελέγχου για το κύκλωμα ισχύος.

Το κύκλωμα του μεταφραστή είναι κοινό για τα περισσότερα βηματικά drives. Ο παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του drive είναι το κύκλωμα ισχύος,



Σχήμα 3.3 Έλεγχος κλειστού βρόγχου

Δεδομένος αριθμός βημάτων θα προκαλέσει στον άξονα του βηματικού κινητήρα να περιστραφεί σε μια συγκεκριμένη γωνία, έτσι ώστε να έχουμε έλεγχο θέσης ανοικτού βρόγχου, αφού δεν χρειαζόμαστε ανατροφοδότηση της πληροφορίας από τον άξονα.

Οι κινητήρες αυτοί, περιστρέφονται με διακριτά βήματα και το κάθε βήμα προκύπτει όταν ένας παλμός τροφοδοτείται στο τύλιγμα του στάτη. Ο ρότορας κρατείται στην βηματική θέση αποκλειστικά από τη δράση της μαγνητικής ροής μεταξύ στάτη και ρότορα. Το γωνιακό βήμα είναι μια ιδιότητα της γεωμετρίας δοντιού και της διάταξης του των πηνίων του στάτη. Το γωνιακό βήμα δίνεται από την έκφραση  $\text{Γωνιακό βήμα} = (360^\circ / \text{δόντια ρότορα}) * \text{αριθμός φάσεων στάτη}$ .

Οι πιο μεγάλοι κινητήρες γυρίζουν χαρακτηριστικά 90 μοίρες ανά βήμα, ενώ οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη μεγάλου βήματος είναι συνήθως ικανοί να χειριστούν 1,8 μοίρες ή ακόμα και 0,72 μοίρες ανά βήμα. Με έναν αρμόδιο ελεγκτή, οι περισσότεροι βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη και υβριδικοί βηματικοί κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν στο μισό βήμα (half step mode), και μερικοί ελεγκτές μπορούν να χειριστούν τα μικρότερα κλασματικά βήματα (microsteps).

Η ταχύτητα του βηματικού μπορεί να μεταβληθεί από πολύ αργή, δηλαδή ένα-ένα βήμα μέχρι 5000 στροφές το λεπτό. Επίσης η φορά περιστροφής τους μπορεί να γίνει ωρολογιακή ή αντί-ωρολογιακή, σύμφωνα με την ακολουθία των παλμών που τροφοδοτούνται σε τυλίγματα του στάτη.

Ο αριθμός των πόλων του στάτη δεν είναι ποτέ ίδιος με τον αριθμό πόλων του δρομέα ενός βηματικού κινητήρα. Αυτή η διαφορά στον αριθμό των πόλων προκαλεί τον βηματισμό του δρομέα.

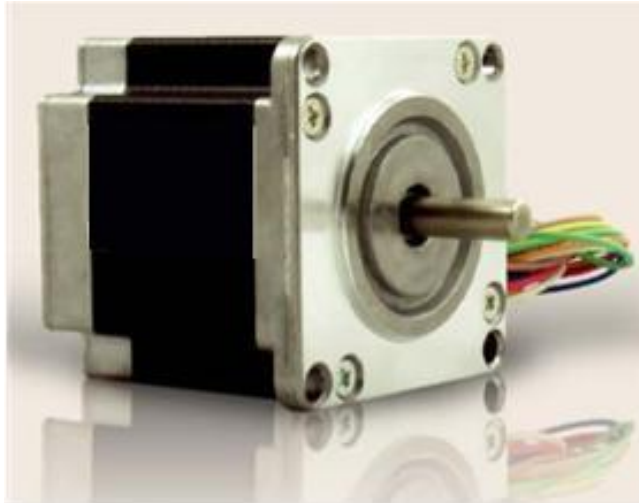
Οι βηματικοί κινητήρες διαφέρουν από τους άλλους τύπους κινητήρων συνεχούς και εναλλασσομένου ρεύματος στο ότι τροφοδοτούνται με παλμούς και παράγουν ηλεκτρική κίνηση. Ο άξονας τους δεν έχει μια συνεχή περιστροφική κίνηση, αλλά περιστρέφεται κατά μία γωνία κάθε φορά που δέχεται ένα παλμό. Δηλαδή είναι μια ηλεκτρομαγνητική συσκευή που μετατρέπει τους ψηφιακούς παλμούς στη μηχανική θέση αξόνων. Βασικά, ο βηματικός κινητήρας είναι μια σύγχρονη μηχανή όπου το μαγνητικό πεδίο μεταστρέφεται ηλεκτρικά για να περιστραφεί το κινούμενο μέρος του στροφέα. Θεωρητικά ο βηματικός κινητήρας είναι παρόμοιος με έναν κινητήρα μόνιμου μαγνήτη συνεχούς ρεύματος. Η περιστροφή του κινητήρα όχι μόνο έχει μια άμεση σχέση με τον αριθμό παλμών εισαγωγής, αλλά η ταχύτητά της συσχετίζεται με τη συχνότητα των παλμών. Λόγω της ευκολίας χρήσης, τις απλές ανάγκες ελέγχου και τον ακριβή έλεγχο, οι βηματικοί χρησιμοποιούνται συνήθως στις εφαρμογές μέτρησης και ελέγχου. Για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται συνήθως στους εκτυπωτές, στις κινήσεις δίσκων, στα ρομπότ και στα εργαλεία μηχανών.

Σε ένα βηματικό κινητήρα είναι δυνατός ο έλεγχος της ταχύτητας και της θέσης μετακίνησης του φορτίου. Έτσι, οι βηματικοί είναι κινητήρες υψηλής ακρίβειας παρουσιάζοντας σφάλμα γωνίας θέσης χαμηλότερο από 5% χωρίς αυτό να είναι αθροιστικό για τον αριθμό των περιστροφών. Όταν ενεργοποιείται ένας τέτοιος κινητήρας, τότε ο δρομέας στρέφεται για ένα ορισμένο αριθμό γωνιακών βημάτων, δηλαδή ο κινητήρας συμπεριφέρεται π.χ. σαν πηνίο. Η περιστροφή κατά γωνιακά βήματα πραγματοποιείται διεγείροντας το κατάλληλο τύλιγμα στο στάτη, ενώ μπορεί και να αντιστραφεί η φορά των βημάτων. Επειδή ο κινητήρας στρέφεται μόνο κατά διακριτά γωνιακά βήματα, ο δρομέας επιταχύνεται και επιβραδύνεται συνεχώς, ακόμη και όταν φαίνεται να περιστρέφεται με "σταθερή" ταχύτητα. Στην πραγματικότητα, η ταχύτητα δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται παλμικά.

Στις διαστημικές εφαρμογές οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως ως ενεργοποιητές των μηχανισμών θέσης για τις κεραίες, τους καθρέφτες, τα τηλεσκόπια ή τα πλήρη ωφέλιμα φορτία.

Ο κινητήρας δεν είναι αθόρυβος, αλλά παράγει θόρυβο που εξαρτάται από τον ρυθμό των παλμών που δέχεται από την οδήγηση.

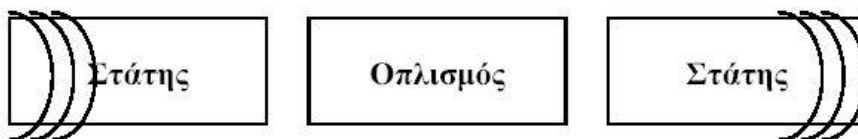
Η γενική συμπεριφορά του κινητήρα εξαρτάται απόλυτα από την οδήγηση, και επομένως το ίδιο ισχύει και για την καμπύλη ροπής-στροφών. Συχνά, η χαρακτηριστική δίνεται σαν ροπή-συχνότητα παλμών, επειδή η τελευταία είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής. Η ροπή μειώνεται με αύξηση των στροφών.



Σχήμα 3.4 Παράδειγμα βηματικού κινητήρα

### 3.2 Αρχή λειτουργίας βηματικών κινητήρων

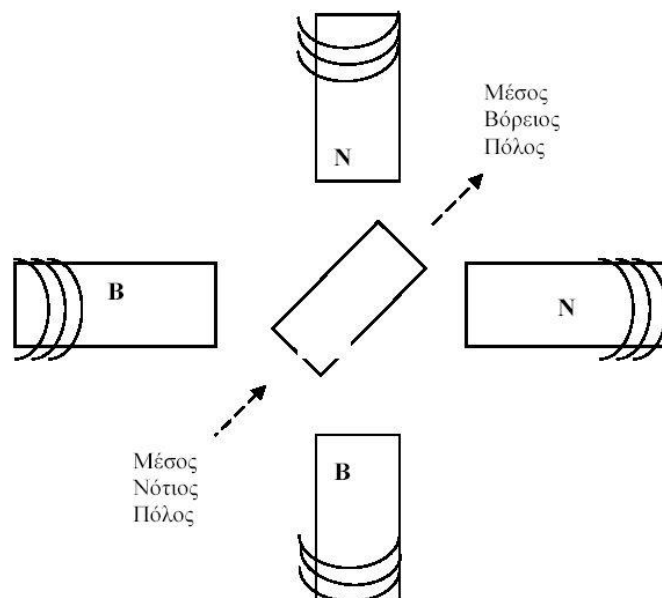
Η αρχή ότι ομώνυμοι μαγνητικοί πόλοι απωθούνται ενώ ετερόνυμοι μαγνητικοί πόλοι έλκονται αποτελεί τη βάση της λειτουργίας των βηματικών κινητήρων. Ο στάτης είναι οι δύο ηλεκτρομαγνήτες A1 και A2 ενώ ο σπλισμός είναι ένας μόνιμος μαγνήτης. Όταν η πολικότητα του ρεύματος είναι τέτοια ώστε ο ηλεκτρομαγνήτης A1 να σχηματίζει Βόρειο πόλο και ο ηλεκτρομαγνήτης A2 να σχηματίζει Νότιο πόλο, τότε, ο σπλισμός ξεκινάει από μια τυχαία θέση και περιστρέφεται προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά μέχρι να βρει την κατάσταση ισορροπίας.



Σχήμα 3.5: Ο σπλισμός (δρομέας) μπορεί να περιστραφεί

Στο Σχήμα 3.6. απεικονίζεται ένας βηματικός κινητήρας με τέσσερις πόλους στο στάτη και δύο στον σπλισμό. Ο σπλισμός περιστρέφεται και σταματάει στον μέσο πόλο που σχηματίζεται μεταξύ των δύο ομώνυμων πόλων του στάτη.

Προκύπτει ότι, ο αριθμός των πόλων του στάτη και του δρομέα καθορίζουν τη γωνία περιστροφής που αντιστοιχεί σε κάθε βήμα.



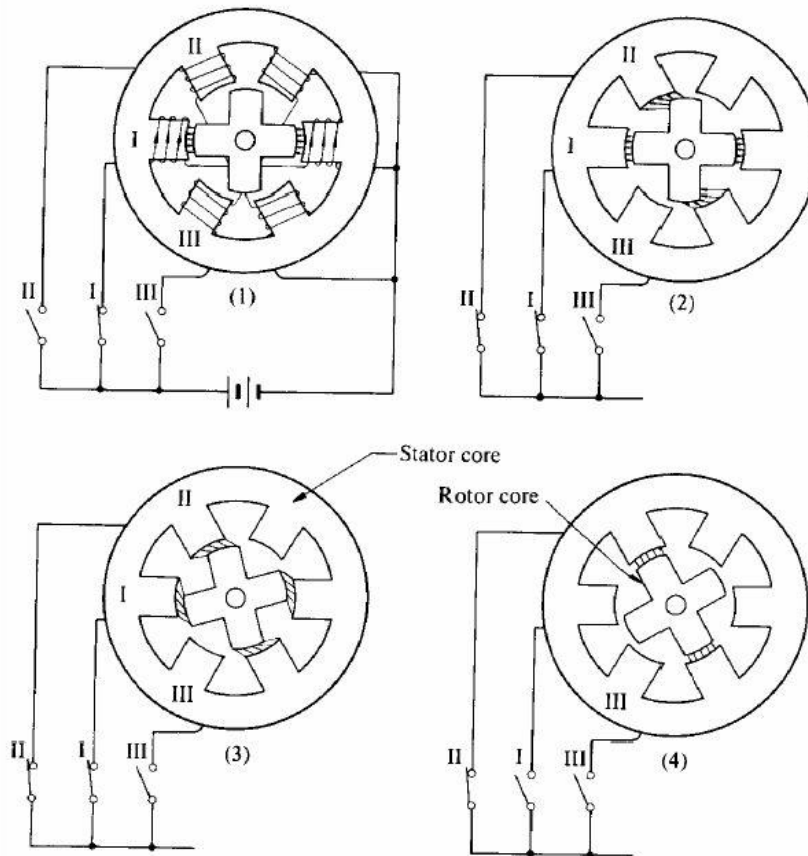
Σχήμα 3.6 Η κίνηση του οπλισμού σταματάει στην γραμμή του μέσου νότιου πόλου μέσου βόρειου πόλου

Στο Σχήμα 3.7 απεικονίζεται μια τομή ενός τυπικού βηματικού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης – variable reluctance stepping motor. Ο πυρήνας του στάτη έχει έξι έκτυπους πόλους ή οδόντες και ο δρομέας έχει τέσσερις πόλους. Τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας είναι κατασκευασμένοι από μαλακό ατσάλι.

Τρεις ομάδες πηνίων είναι τοποθετημένες όπως στο Σχήμα 3.7 και αποτελούν τις τρεις φάσεις του κινητήρα. Κάθε ομάδα έχει δύο πηνία συνδεδεμένα σε σειρά. Επομένως η μηχανή αυτή είναι ένας τριφασικός βηματικός κινητήρας. Η πηγή συνεχούς ρεύματος τροφοδοτεί τα τυλίγματα μέσω διακοπών I, II και III.

Στην κατάσταση I διεγείρονται οι δύο πόλοι της φάσης 1 και ευθυγραμμίζονται με δύο οδόντες του δρομέα επομένως το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας.

Στην συνέχεια, κλείνει ο διακόπτης II, η φάση II διεγείρεται επιπρόσθετα στην φάση I και δημιουργείται μαγνητική ροή στους πόλους του στάτη της φάσης II. Έτσι εμφανίζεται ροπή με αντί-ωρολογιακή φορά λόγω του ότι εξασκείται δύναμη στις κεκλιμένες μαγνητικές γραμμές και ως συνέπεια, ο δρομέας θα μετακινηθεί στην κατάσταση ισορροπίας του Σχήματος 3.7.(3). Ο δρομέας περιστρέφεται κατά ένα βήμα με σταθερή γωνία, η οποία στην περίπτωση αυτή είναι  $15^\circ$  για κάθε μετακίνηση.



Σχήμα 3.7: Αρχή λειτουργίας του βηματικού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης

- i. Φάση I ενεργοποιημένη
- ii. Φάση I και φάση II ενεργοποιημένες
- iii. Θέση ισορροπίας του δρομέα με ενεργοποιημένες τις φάσεις I και II
- iv. Απενεργοποίηση της φάσης I

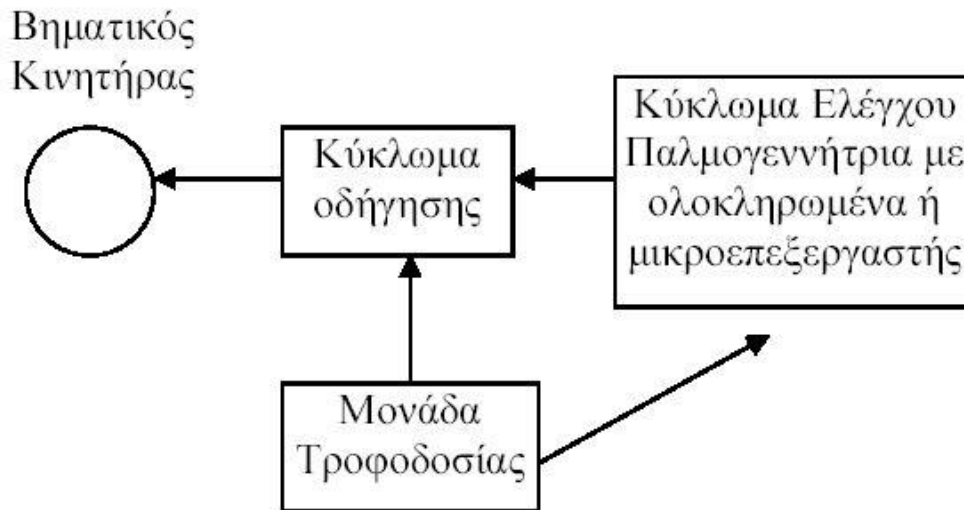
Στη συνέχεια, ο διακόπτης I ανοίγει και η φάση I διακόπτεται και απενεργοποιείται. Για άλλη μια φορά ο δρομέας περιστρέφεται κατά  $15^\circ$  και θα σταματήσει στην θέση που δείχνει το Σχήμα 3.7.4.

Η γωνία περιστροφής κάθε μετάβασης ονομάζεται βηματική γωνία. Μέσω διαδικασίας μετάβασης (switching process) ελέγχεται η γωνία θέσης του δρομέα σε μονάδες βηματικής γωνίας.

Όσο συνεχίζεται η διαδικασία μετάβασης, ο δρομέας περιστρέφεται με μια βηματική κίνηση η οποία έχει ταχύτητα ελεγχόμενη από την ταχύτητα μετάβασης των καταστάσεων ενεργοποίησης και απενεργοποίησης των φάσεων του κινητήρα.

Αν αντιστρέψουμε την ακολουθία ανοίγματος και κλεισίματος των διακοπών I, II, III, σε I, III, II, τότε η φορά περιστροφής αντιστρέφεται.

Τα τελευταία χρόνια, για τον έλεγχο βηματικών κινητήρων χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικές διατάξεις με ολοκληρωμένα κυκλώματα και μικροϋπολογιστές οι οποίες παράγουν τους παλμούς ενεργοποίησης των πηνίων, σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8 Δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου του βηματικού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης – variable reluctance stepping motor

Όπως έχει προαναφερθεί, ο βηματικός κινητήρας μετατρέπει την ψηφιακή είσοδο σε μηχανική κίνηση. Συγκριτικά με άλλες συσκευές που εκτελούν παρόμοιες λειτουργίες, ένα σύστημα ελέγχου που βασίζεται σε βηματικό κινητήρα έχει μερικά πλεονεκτήματα όπως:

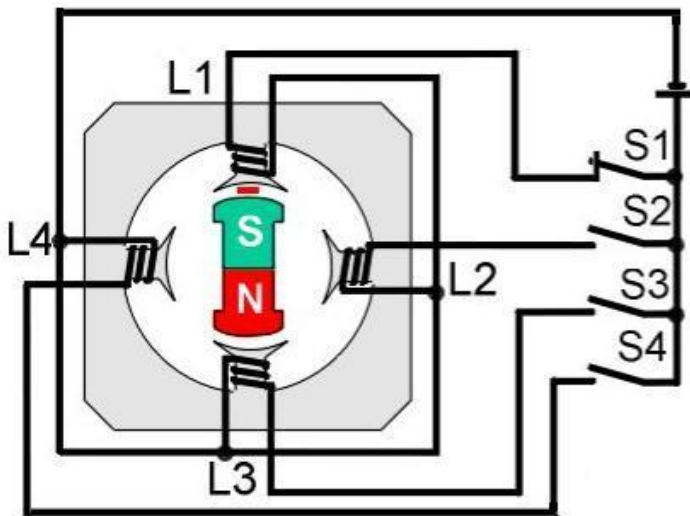
- ✓ Δεν απαιτείται ανάδραση για τον έλεγχο ταχύτητας ή για τον έλεγχο θέσης.
- ✓ Το σφάλμα θέσης δεν είναι αθροιστικό.
- ✓ Οι βηματικοί κινητήρες είναι συμβατοί με τον ψηφιακό εξοπλισμό των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Η λειτουργία του βηματικού κινητήρα εξαρτάται από την πηγή που το τροφοδοτεί, η οποία παράγει παλμούς οι οποίοι, συχνά προέρχονται από μικροεπεξεργαστή. Οι παλμοί μετρούνται και, αυτοί που έχουν την ωρολογιακή φορά θεωρούνται ότι είναι θετικοί (+), ενώ θεωρούνται αρνητικοί (-) αυτοί που έχουν την αντί-ωρολογιακή φορά.

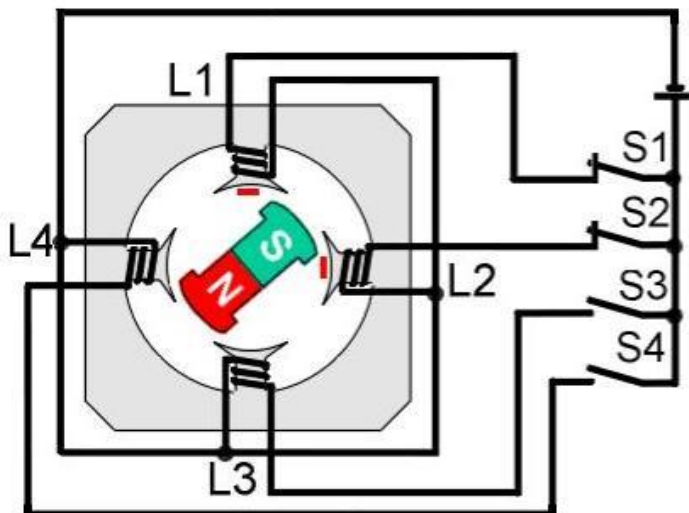
Έτσι, ανά πάσα στιγμή, ο συνολικός αριθμός των παλμών είναι γνωστός, επομένως, ο συνολικός αριθμός περιστροφών του άξονα είναι γνωστός με ακρίβεια ενός βήματος.

Το γεγονός αυτό επιτρέπει την χρήση του βηματικού κινητήρα σε καταγραφικά X-Y, σε ηλεκτρικές γραφομηχανές, σε εκτυπωτές και σε εργαλειομηχανές ακριβείας.

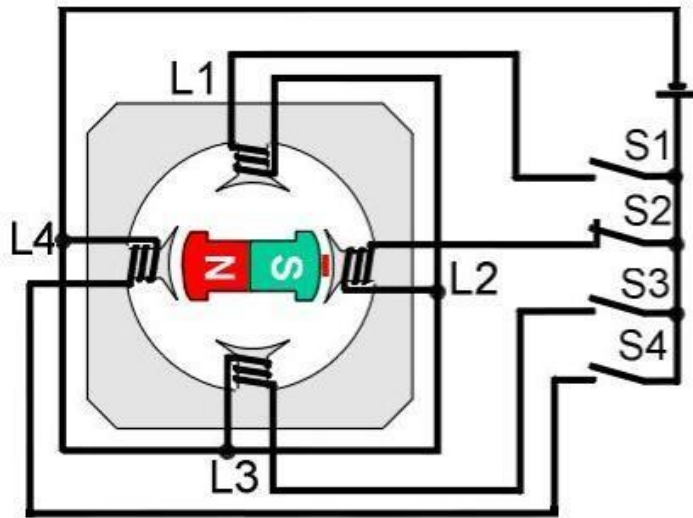
Στη παρακάτω αλληλουχία σχημάτων βλέπουμε μία καλύτερη αναπαράσταση της περιστροφής του δρομέα ενός μονοπολικού βηματικού κινητήρα. Πρόκειται για βηματισμό μισού βήματος, δηλαδή ενεργοποιούνται δύο ηλεκτρομαγνήτες ταυτόχρονα για να πετύχουμε ενδιάμεσα βήματα.



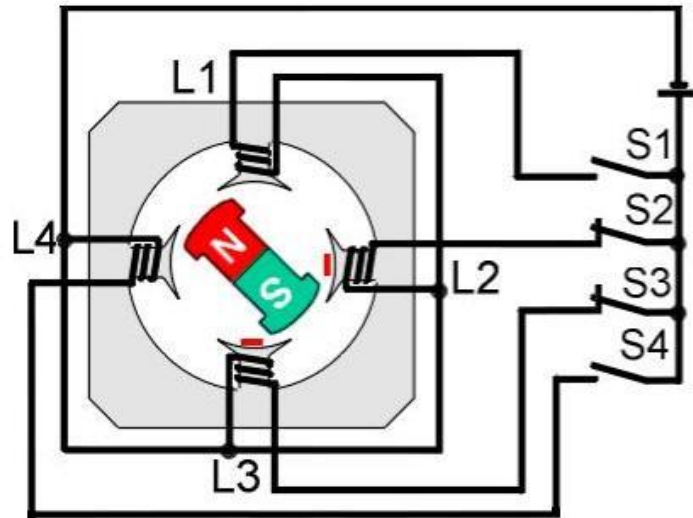
	L1	L2	L3	L4
0	1	0	0	0
1	1	1	0	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	0
5	0	0	1	1
6	0	0	0	1
7	1	0	0	1



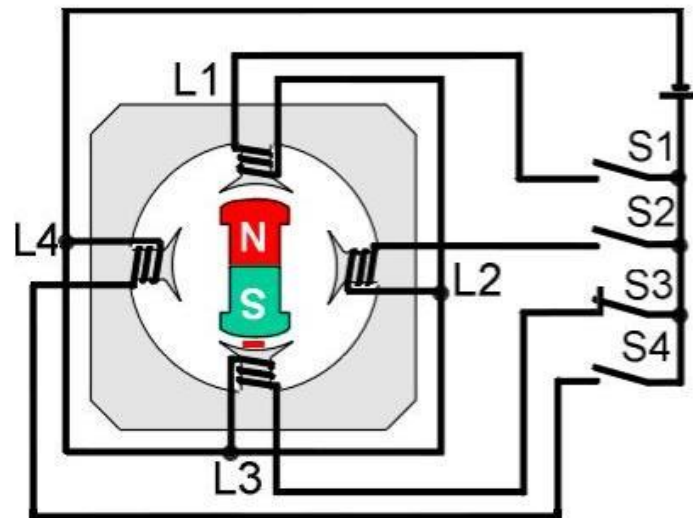
	L1	L2	L3	L4
0	1	0	0	0
1	1	1	0	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	0
5	0	0	1	1
6	0	0	0	1
7	1	0	0	1



	L1	L2	L3	L4
0	1	0	0	0
1	1	1	0	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	0
5	0	0	1	1
6	0	0	0	1
7	1	0	0	1

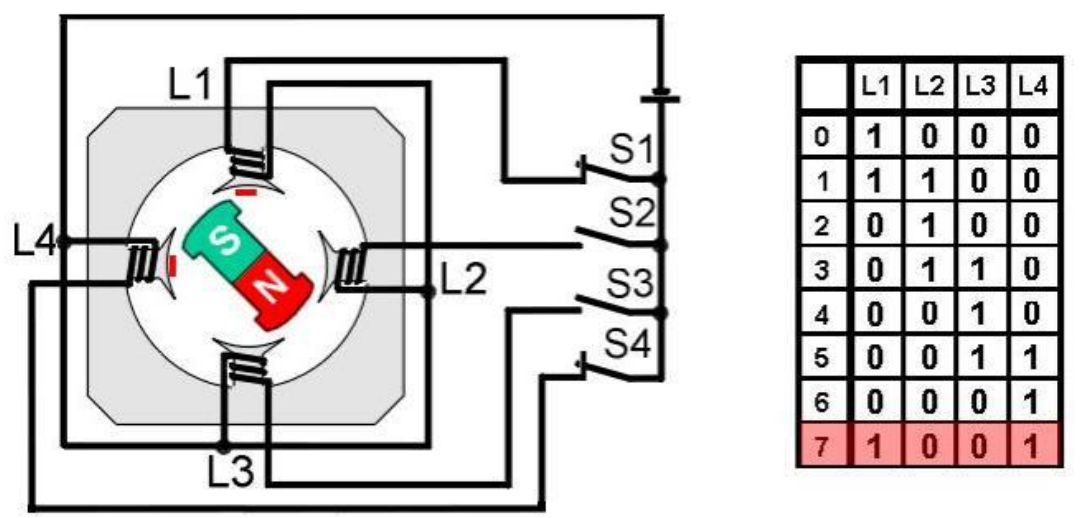
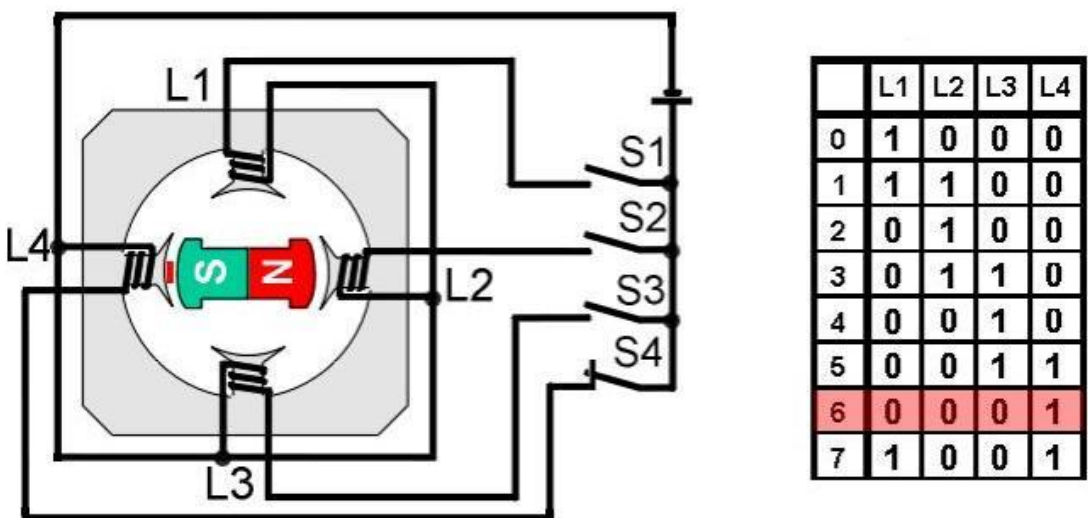
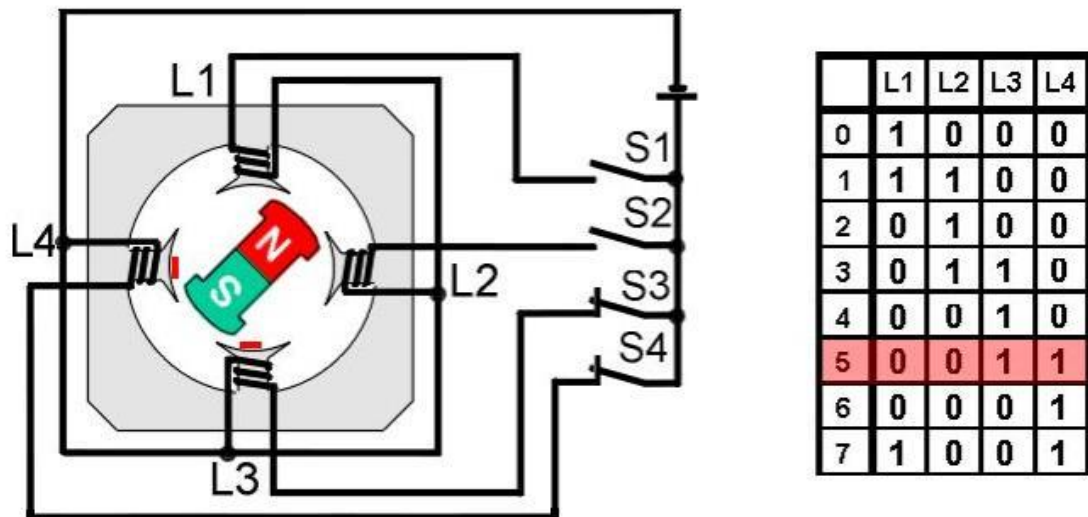


	L1	L2	L3	L4
0	1	0	0	0
1	1	1	0	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	0
5	0	0	1	1
6	0	0	0	1
7	1	0	0	1



	L1	L2	L3	L4
0	1	0	0	0
1	1	1	0	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	0
5	0	0	1	1
6	0	0	0	1
7	1	0	0	1





Σχήμα 3.9 Αναπαράσταση της περιστροφής του δρομέα ενός μονοπολικού βηματικού κινητήρα σε ενδιάμεσα στάδια

### 3.3 Επίδραση αδράνειας και φορτίου

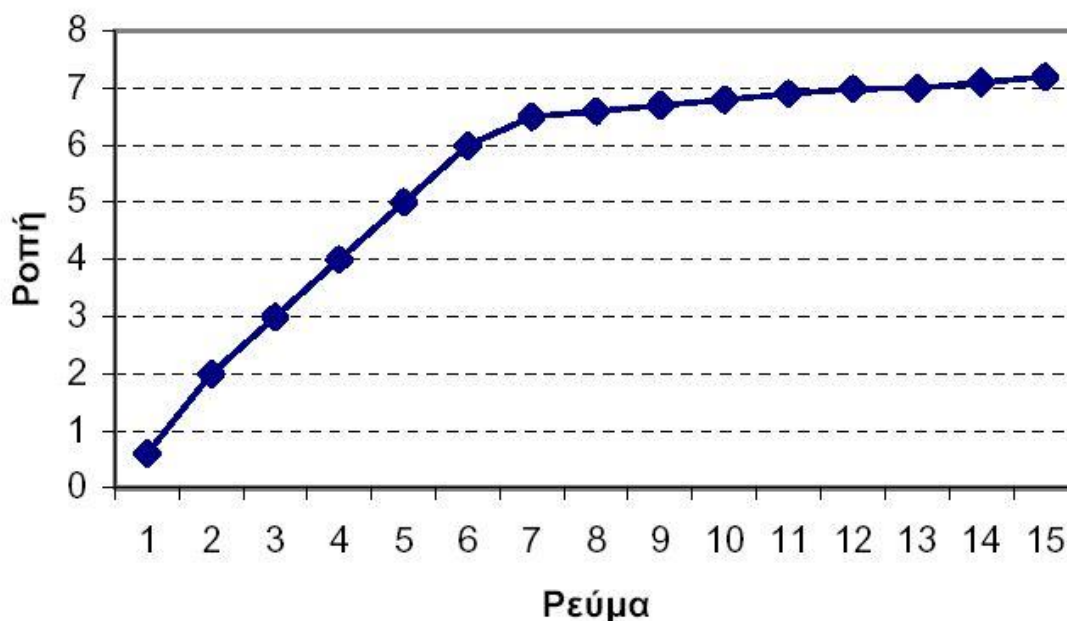
Όταν ο δρομέας περιστρέφεται, χωρίς φορτίο, η αδράνεια του είναι χαμηλή και έχει χαμηλή αντοχή στις τριβές, επομένως παρουσιάζει ταλαντώσεις με αρκετά υψηλή υπερακόντιση και μεγάλο χρόνο απόσβεσης των ταλαντώσεων. Οι ταλαντώσεις αποσβένουν μέσω φρεναρίσματος ή με την αύξηση των τριβών. Στην πράξη χρησιμοποιείται ένα φρένο δινορρευμάτων ή ένας αποσβεστήρας ταλαντώσεων με ρευστό (λάδι ή αέρα) για να φρενάρι τον δρομέα. Η δύναμη φρεναρίσματος του αποσβεστήρα με ρευστό είναι ανάλογη της ταχύτητας, επομένως, μηδενίζεται όταν ο δρομέας σταματάει.

Όταν ο δρομέας συνδέεται με φορτίο, τότε χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να φτάσει το στόχο του, όμως η υπερακόντιση είναι χαμηλότερη και οι ταλαντώσεις αποσβένουν πιο γρήγορα.

Συνοψίζοντας, η αδράνεια και το φορτίο αυξάνουν τον χρόνο βηματισής ο οποίος παρατείνεται και από τις ταλαντώσεις. Έτσι, για να αποδώσει μια ταχεία απόκριση, η αδράνεια του δρομέα πρέπει να είναι πολύ μικρή και οι ταλαντώσεις να καταστέλλονται με αποσβεστήρα με ρευστό. Η αύξηση του ρεύματος στα τυλίγματα αυξάνει τη δύναμη που αναπτύσσεται και μειώνει το χρόνο βηματισμού. Η τεχνική αυτή όμως, έχει τους περιορισμούς που προκύπτουν από το θερμικό φαινόμενο Joule.

### 3.4 Χαρακτηριστική ροπής - ρεύματος & ροπής - ταχύτητας

Η σχέση μεταξύ ροπής και ρεύματος απεικονίζεται στο σχήμα 3.10, όπου φαίνεται ότι η ροπή είναι σχεδόν ανάλογη του ρεύματος.



Σχήμα 3.10 Χαρακτηριστική ροπής-ρεύματος του βηματικού κινητήρα

Η ροπή που αναπτύσσεται όταν ο δρομέας μετακινείται κατά ένα βήμα ονομάζεται ροπή μετακίνησης (pull – over torque).

Όταν ο κινητήρας σταματάει, χρειάζεται να παραμένει ένα ρεύμα στο τελευταίο τύλιγμα που είχε διεγερθεί, έτσι ώστε ο δρομέας να κρατηθεί σταθερός στη θέση του.

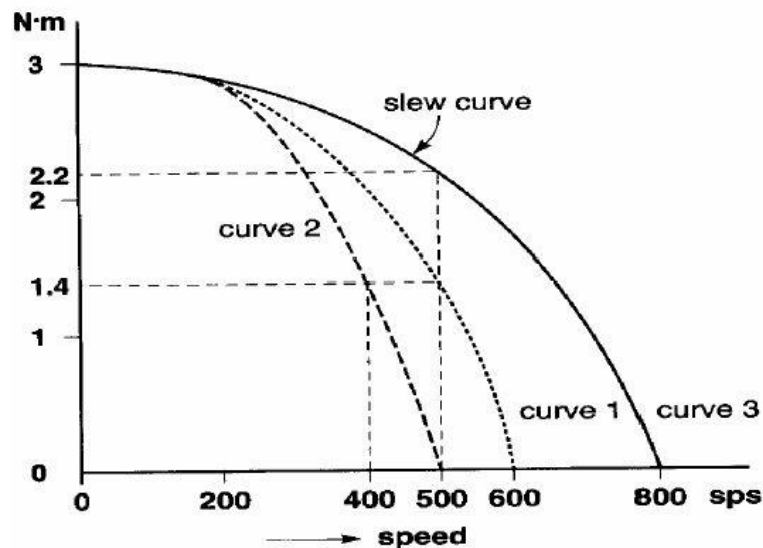
Υπάρχει ένα ανώτατο όριο στην ταχύτητα των παλμών ώστε ο δρομέας να μπορεί να ακολουθεί με ακρίβεια τους παλμούς. Όταν ξεπεραστεί το όριο αυτό, ο κινητήρας χάνει βήματα. Είναι απαραίτητο να σταματάει το ένα βήμα πριν προχωρήσει στο επόμενο βήμα, επειδή μόνο έτσι ο κινητήρας διατηρεί τον συγχρονισμό του.

Η ταχύτητα βηματισμού εκφράζεται σε βήματα ανά λεπτό – ΒΑΛ, (steps per minute – spm), ή σε βήματα ανά δευτερόλεπτο - ΒΑΔ, (steps per second sps).

Προκύπτει ότι ο μέγιστος αριθμός ΒΑΔ εξαρτάται και είναι αντίστροφα ανάλογος από τη ροπή του φορτίου και την αδράνεια του συστήματος. Ο ίδιος κινητήρας μπορεί να οδηγηθεί σε δύο λειτουργικές καταστάσεις:

- i. λειτουργική κατάσταση εκκίνησης – ακινητοποίησης, start – stop mode, ή start without error mode
- ii. λειτουργική κατάσταση συνεχόμενης περιστροφικής κίνησης, χωρίς εκκίνηση – ακινητοποίηση, ή slew mode.

Στο σχήμα 3.11 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας για τις δύο αυτές λειτουργικές καταστάσεις. Συχνά, η χαρακτηριστική δίνεται σαν ροπή-συχνότητα παλμών, επειδή η τελευταία είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής. Η ροπή μειώνεται με αύξηση των στροφών. Η χαρακτηριστική 1 αντιστοιχεί στην κατάσταση εκκίνησης – ακινητοποίησης, η καμπύλη 2 είναι για την ίδια κατάσταση όμως με αυξημένη φόρτιση του κινητήρα. Η καμπύλη 3 είναι η κατάσταση συνεχόμενης περιστροφικής κίνησης.

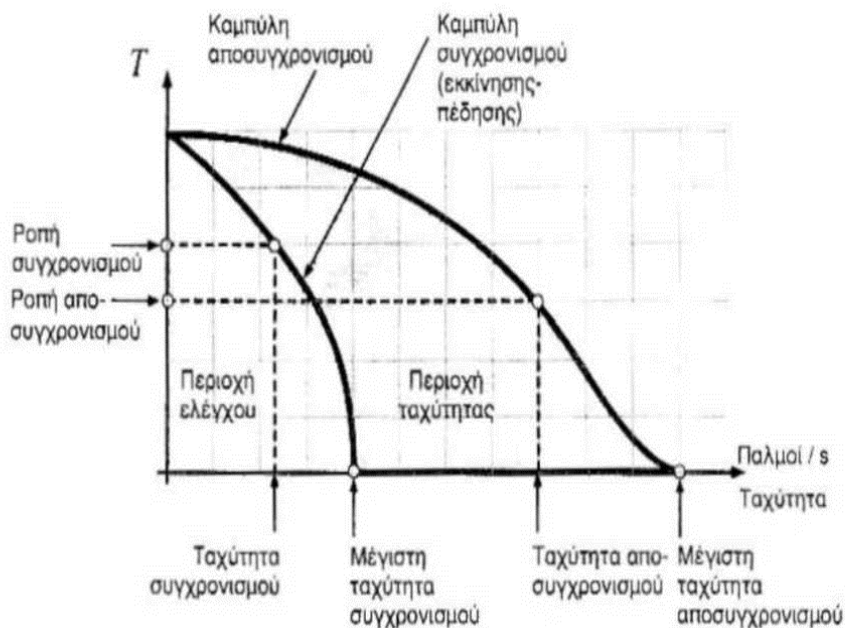


Σχήμα 3.11 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του βηματικού κινητήρα

Στην περίπτωση της συνεχόμενης περιστροφικής κίνησης, ο κινητήρας παρουσιάζει αυξημένη ικανότητα και οδηγεί μεγαλύτερη ροπή.

Η λειτουργική κατάσταση κατά την επιτάχυνση και την επιβράδυνση του κινητήρα συνοδεύεται από αύξηση ή μείωση, αντίστοιχα, του αριθμού των παλμών τροφοδοσίας ανά δευτερόλεπτο. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται οδήγηση σε ράμπα ή ramping.

Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας των βηματικών κινητήρων περιλαμβάνει δύο καμπύλες, την καμπύλη συγχρονισμού (puII-in) και την καμπύλη αποσυγχρονισμού (puII-out). Αυτές χωρίζουν το διάγραμμα ροπής ταχύτητας σε δύο περιοχές. Στην πρώτη, την περιοχή ελέγχου, ο κινητήρας μπορεί να εκκινήσει, να σταματήσει, ή να αλλάξει φορά με ένα μόνο παλμό. Στην περιοχή αυτή, ο κινητήρας μπορεί να εργάζεται σαν διάταξη ελέγχου θέσης ανοικτού βρόχου.



Σχήμα 3.12 Χαρακτηριστικές ροπής στροφών για βηματικούς κινητήρες.

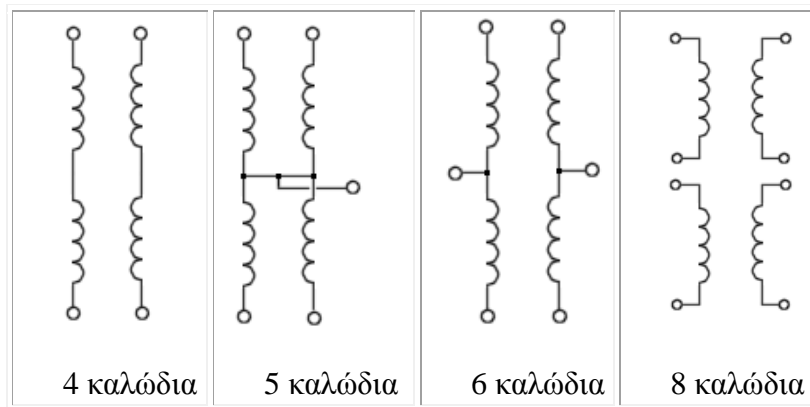
Στη δεύτερη περιοχή, την περιοχή ταχύτητας, ο κινητήρας εργάζεται αφού επιταχυνθεί από την πρώτη. Ο κινητήρας στρέφεται χωρίς να αποσυγχρονίζεται, αλλά δεν μπορεί να σταματήσει ή να αλλάξει φορά περιστροφής. Για να συμβεί αυτό, ο κινητήρας θα πρέπει πρώτα να οδηγηθεί στην περιοχή ελέγχου.

### 3.5 Οδήγηση βηματικού κινητήρα

Οι βηματικοί κινητήρες είναι απλοί, στιβαροί, αξιόπιστοι και είναι καλά κατασκευασμένοι για ανοικτούς ή κλειστούς ελεγχόμενους βρόχους συστημάτων ελέγχου. Οι τρόποι οδήγησης που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι οι εξής:

- Οδήγηση R-L ( R-L Drive)
- Μονοπολική οδήγηση ( Unipolar Drive)
- Διπολική οδήγηση ( Bipolar Drive)
- Οδήγηση καταταμητού (Chopper Drive)

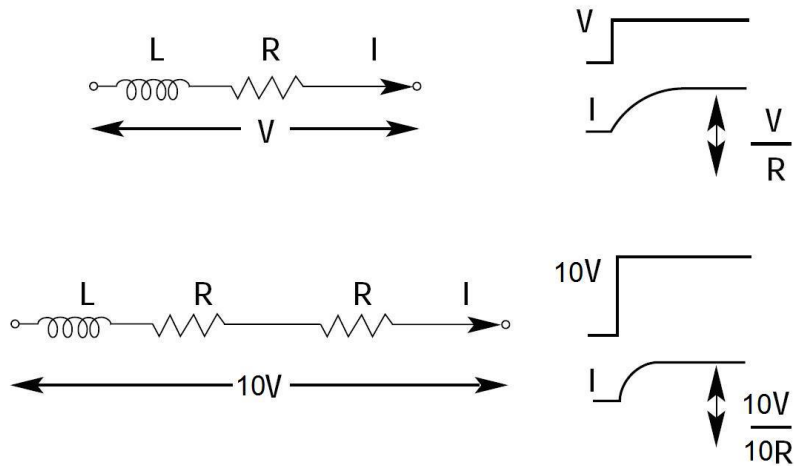
Οι διαφορετικές μέθοδοι οδήγησης έγκειται στις διαφορετικές συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων του στάτη οι οποίες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.13 Διαφορετικές συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων του στάτη

#### 3.5.1 Οδήγηση R-L ( R-L Drive)

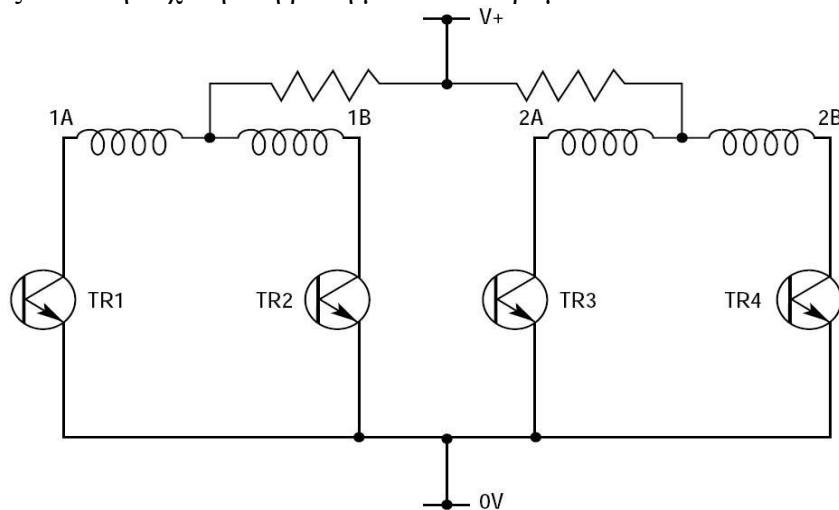
Η οδήγηση R – L, η οποία είναι η πιο απλή μορφή κυκλώματος ισχύος και φαίνεται στο σχήμα 3.14, χρησιμοποιείται αποκλειστικά για χαμηλές ισχύς. Το κύκλωμα περιλαμβάνει μία αντίσταση σε σειρά σύνδεσμένη με το κάθε τύλιγμα του στάτη. Αν χρησιμοποιήσουμε παλμό με εφαρμοσμένη τάση 10 φορές την ονομαστική τάση της μηχανής, το ρεύμα θα φθάσει το ονομαστικό στο ένα δέκατο του χρόνου. Έτσι θα πάρουμε μια χρήσιμη και σημαντική αύξηση στην ταχύτητα. Εντούτοις υπάρχει τίμημα για αυτήν την πρόσθετη απόδοση. Οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων του στάτη παράγουν μια σημαντική ποσότητα της θερμότητας που σημαίνει αυξημένες απώλειες. Επιπλέον, η πρόσθετη ισχύς που προέρχεται απο το τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος απαιτεί και μεγαλύτερη ισχύ στην έξοδο του. Επομένως η οδήγηση R-L χρησιμοποιείται μόνο στις χαμηλής ισχύος εφαρμογές, επιτυγχάνοντας άμεση και γρήγορη απόκριση περιστροφής του δρομέα.



Σχήμα 3.14 Αρχή λειτουργίας οδήγησης R - L

### 3.5.2 Μονοπολική οδήγηση (Unipolar Drive)

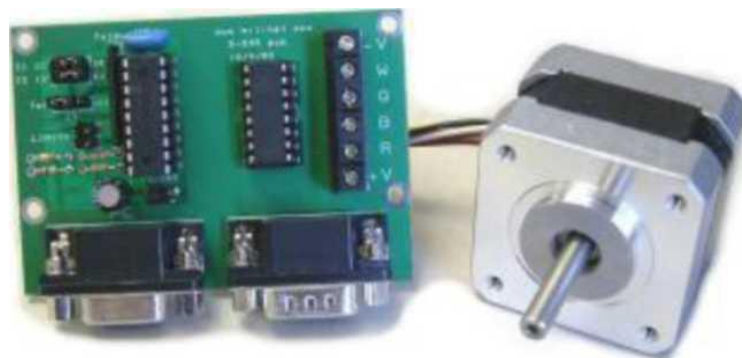
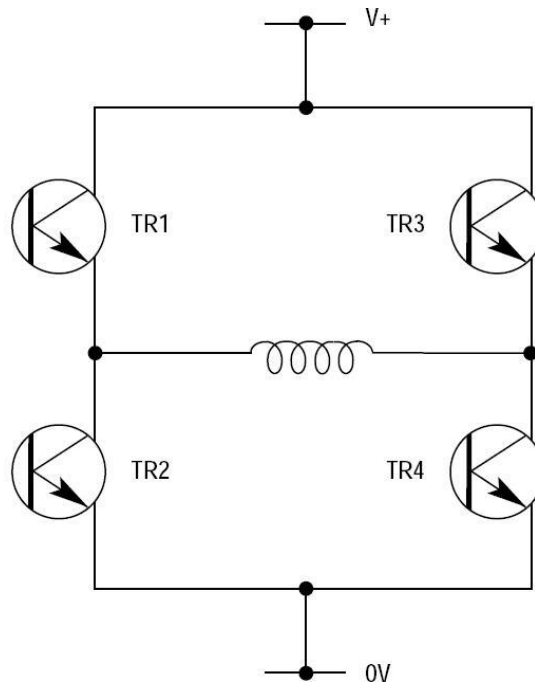
Η μονοπολική οδήγηση (unipolar drive) η οποία είναι η πιο απλή μορφή κυκλώματος ισχύος και φαίνεται στο σχήμα 3.15, απαιτεί κινητήρες που έχουν τύλιγμα με μεσαία λήψη. Αναφέρεται ως μονοπολική διάταξη γιατί το ρεύμα έχει μόνο μια συγκεκριμένη φορά. Για την λειτουργία αυτού του τύπου οδήγησης (drive) απαιτείται κινητήρας με διπλή σπείρα σε κάθε πόλο αφού η εναλλαγή στα τυλίγματα του στάτη πραγματοποιείται από τη μεταφορά ρεύματος στο δεύτερο τύλιγμα. Σε αυτή την απλή μορφή drive το ρεύμα καθορίζεται από την αντίσταση των τυλιγμάτων και από την τάση τροφοδοσίας. Η τάση στα τυλίγματα εφαρμόζεται μεταξύ της μεσαίας λήψης και ενός από τους ελεύθερους ακροδέκτες του τυλίγματος. Η φορά περιστροφής του δρομέα εξαρτάται από το ποιος ακροδέκτης συνδέεται με την τροφοδοσία. Αυτή είναι μία απλή οδήγηση, που όμως έχει το μειονέκτημα της μη αποδοτικής χρήσης των τυλιγμάτων του κινητήρα. Ένα τέτοιο είδος κύκλωμα οδήγησης (drive) λειτουργεί καλά σε χαμηλούς βηματικούς ρυθμούς, αλλά όσο αυξάνεται η ταχύτητα η ροπή μειώνεται δραματικά.



Σχήμα 3.15 Σύστημα ελέγχου βηματικών κινητήρων - μονοπολική οδήγηση

### 3.5.3 Διπολική οδήγηση (Bipolar Drive)

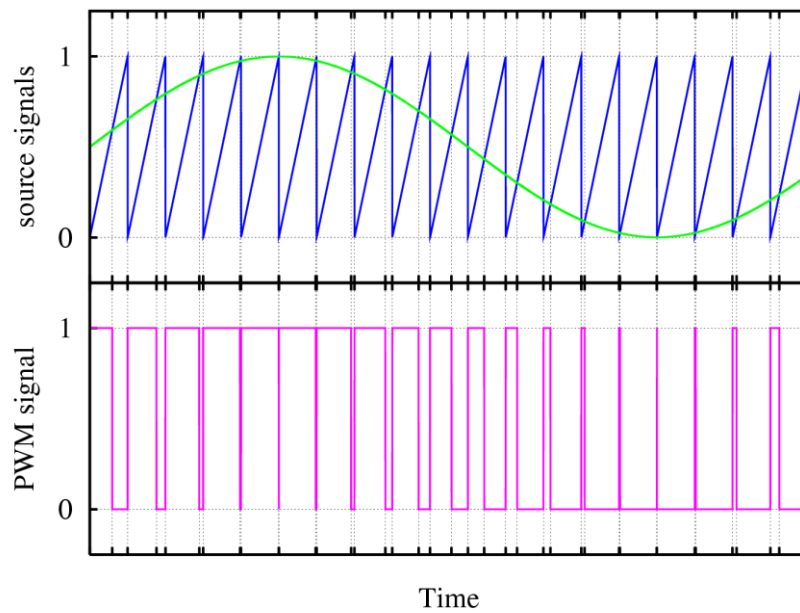
Για να πετύχουμε καλύτερα αποτελέσματα χρησιμοποιείται η διπολική οδήγηση (bipolar drive) σε σχήμα γέφυρας όπως φαίνεται στο σχήμα 3.16. Στην περίπτωση αυτή τα τυλίγματα του στάτη δεν έχουν μεσαία λήψη. Για να αλλάξει η φορά περιστροφής πρέπει να αλλάξει το ρεύμα φορά και στις δύο φάσεις. Οι οδηγίες αυτές παράγουν μεγαλύτερη ροπή, ιδίως στις χαμηλές ταχύτητες, αλλά ηλεκτρονικά είναι πλέον πολύπλοκες.



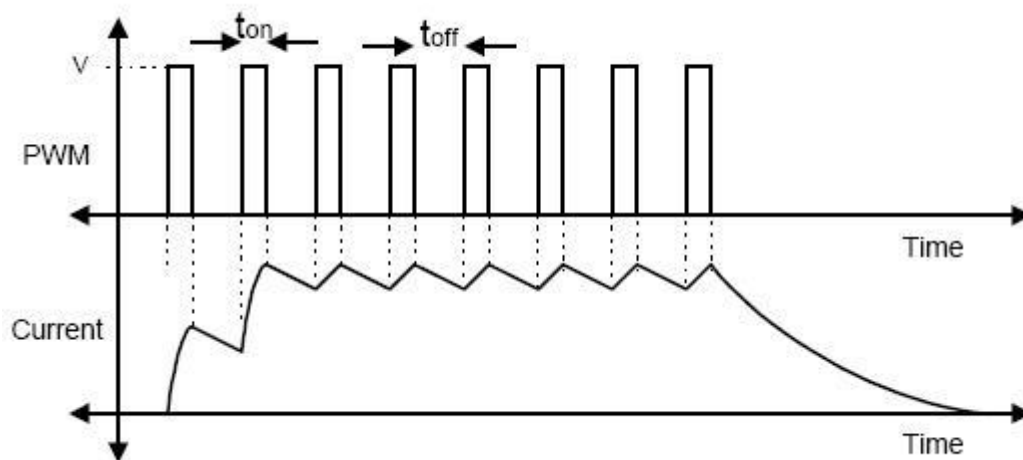
Σχήμα 3.16 Διπολική οδήγηση βηματικού κινητήρα

### 3.5.4 Οδήγηση κατατμητού (Chopper Drive)

Η οδήγηση κατατμητού (chopper drive), χρησιμοποιεί διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation - PWM) για να ελέγξει το μέσο ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη. Η τάση εξόδου που εφαρμόζεται στο κινητήρα (ροζ χρώμα) είναι αποτέλεσμα δύο άλλων σημάτων, ενός ημιτόνου και μιας τριγωνικής τάσης. Η τάση μπορεί να ελεγχθεί από το πλήθος και το πλάτος των σημάτων εισόδου. Ωστόσο αυτή η μέθοδος παράγει ηλεκτρικό θόρυβο (αρμονικές).



Σχήμα 3.17 Οδήγηση κατατμητού βηματικού κινητήρα

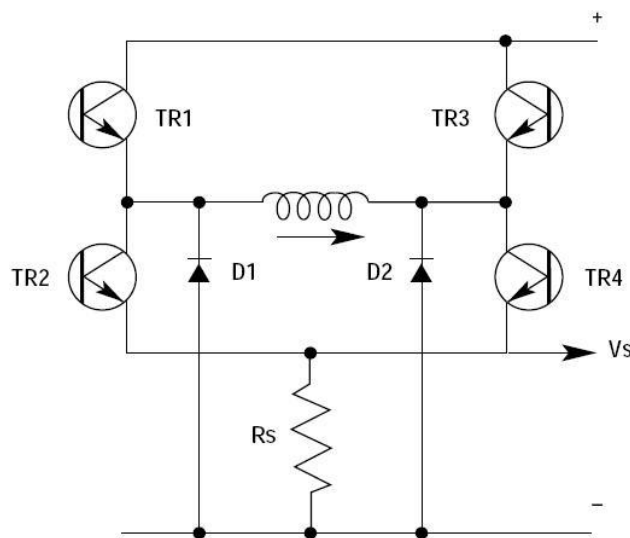


Σχήμα 3.18 Κυματομορφή ρεύματος στάτη με διαμόρφωση εύρους παλμών



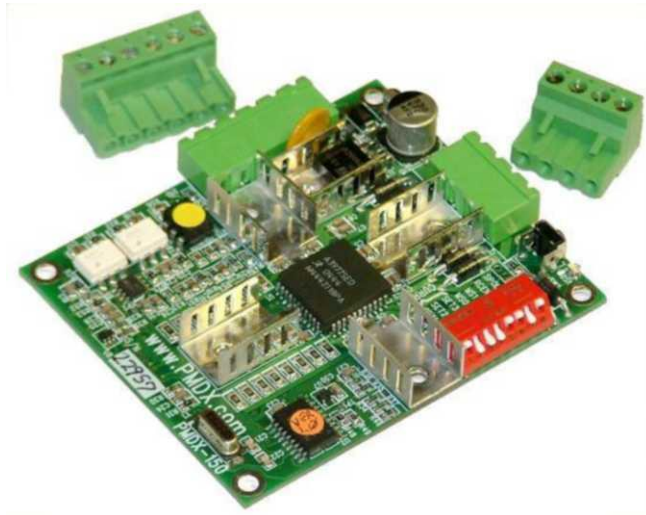


Σχήμα 3.19 Κάρτα οδήγησης βηματικού κινητήρα και κινητήρας. Η κάρτα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κινητήρες με μονοπολικά ή διπολικά τυλίγματα



Σχήμα 3.20 Οδήγηση καταμητού βηματικού κινητήρα (chopper drive)

Υπάρχουν οδηγίες και για τις περιπτώσεις που χρειάζεται η εφαρμογή υποπολλαπλασίων του βήματος, δηλαδή όταν εφαρμόζουμε μικροβηματισμό (microstepping). Αυτή είναι μία τεχνική που επιτυγχάνει υποπολλαπλάσια του βήματος του κινητήρα με ηλεκτρονικό τρόπο.



Σχήμα 3.21 Κάρτα οδήγησης βηματικού κινητήρα με οδήγηση καταμητού για διπολική οδήγηση με μικροβηματισμό.

### 3.6 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Βηματικών

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται κάποια από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των βηματικών κινητήρων.

Τα πλεονεκτήματα του βηματικών κινητήρων είναι τα παρακάτω:

- ✓ Ο βηματικός κινητήρας όταν βρίσκεται σε κατάσταση ακινησίας ασκεί μαγνητική δύναμη στο ρότορα, που δεν του επιτρέπει να περιστραφεί ελεύθερα (εφόσον τα πηνία τροφοδοτούνται με ρεύμα). Έτσι, σε αντίθεση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, δεν χρειάζονται φρένα για να μένουν ακίνητοι.
- ✓ Οι μετακινήσεις είναι ακριβείς καθώς οι βηματικοί κινητήρες έχουν ακρίβεια 35% σε κάθε βήμα. Δηλαδή μεγάλη ακρίβεια θέσης χωρίς συσσωρευτική απόκλιση.
- ✓ Έχουν εξαιρετική απόκριση στην εκκίνηση τους. Επίσης δεν απαιτείται μηχανικό φρένο για την επιβράδυνση τους.
- ✓ Είναι πολύ αξιόπιστοι καθώς για τη λειτουργία τους δεν απαιτούνται κινούμενες ηλεκτρικές επαφές όπως στον κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Επομένως η ζωή του κινητήρα εξαρτάται μόνο από τη ζωή του εδράνου κύλισης.
- ✓ Η απόκριση του κινητήρα σε εισερχόμενους ψηφιακούς παλμούς δίνει την δυνατότητα ελέγχου ανοικτού βρόχου (Open Loop operation) με μεγάλη ακρίβεια, κάνοντας τον κινητήρα ευκολότερα και φθηνότερα ελέγξιμο. Για τον έλεγχο

ανοιχτού βρόχου δεν χρειάζεται να υπάρχει ανάδραση πληροφορίας στο σύστημα ελέγχου για τη θέση του συστήματος, κάτι που είναι απαραίτητο στον έλεγχο κλειστού βρόχου. Αυτό σημαίνει ότι αποφεύγονται έξοδα για ακριβούς αισθητήρες θέσης και συσκευές ανάδρασης. Η θέση του συστήματος μπορεί εύκολα να υπολογιστεί σε κάθε στιγμή αν κρατούνται ως δεδομένα οι εισερχόμενοι παλμοί στον κινητήρα. Έτσι ξεκινώντας από μία θέση μπορεί, μετρώντας τον αριθμό και τις εναλλαγές των παλμών, να υπολογιστεί η θέση του συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή.

- ✓ Ο βηματικός κινητήρας μπορεί να επιτύχει πολύ χαμηλές ταχύτητες περιστροφής
- ✓ Ο βηματικός κινητήρας μπορεί να επιτύχει μεγάλο εύρος ταχυτήτων περιστροφής.
- ✓ Στις μικρές ταχύτητες περιστροφής, αλλά και κατά την εκκίνησή του παράγει μεγάλες τιμές ροπής.
- ✓ Είναι εύκολη η διασύνδεση και ο έλεγχός τους από μικροεπεξεργαστή, σε αντίθεση με τους κινητήρες DC

Τα μειονεκτήματα των βηματικών κινητήρων είναι τα ακόλουθα:

- ✗ Η λειτουργία του κινητήρα μπορεί να είναι ιδιαίτερα θορυβώδης ειδικά εάν αυτός δεν ελέγχεται σωστά.
- ✗ Δεν είναι εύκολη η λειτουργία τους σε υψηλές ταχύτητες.
- ✗ Είναι σχετικά αδύναμοι για το μέγεθός τους. Η ύπαρξη του φαινομένου του μαγνητικού κορεσμού και η ανάγκη ψύξης είναι η αιτία για την οποία έχουν χαμηλό λόγο ισχύος προς βάρος μηχανής.
- ✗ Κατά τη μετακίνηση φορτίων μεγάλης μάζας μπορεί να μη σταματήσει ακαριαία ο κινητήρας, λόγω της αυξημένης αδράνειας.

### 3.7 Είδη Βηματικών Κινητήρων

Υπάρχουν τρεις μεγάλες ομάδες βηματικών κινητήρων.

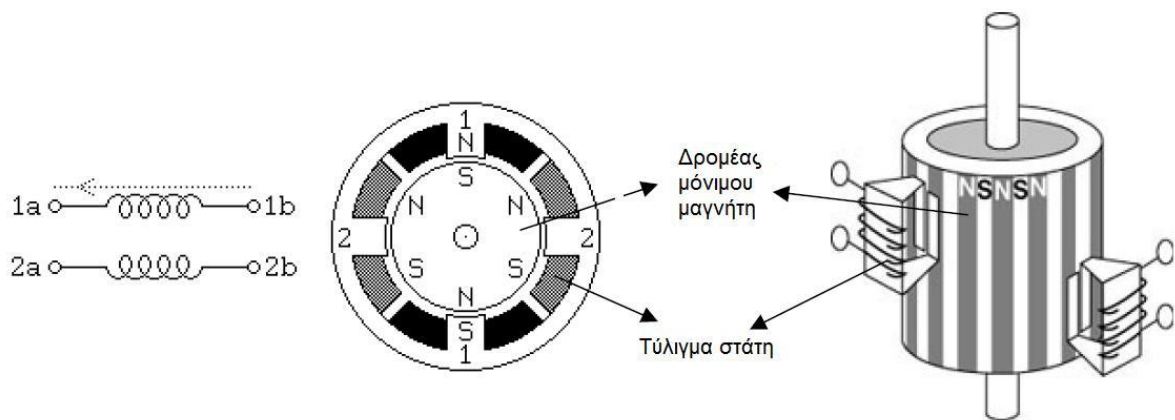
- Βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης ή αλλιώς μεταβλητής απροθυμίας – variable reluctance stepper motor (VR)
- Βηματικός κινητήρας μονίμου μαγνήτη – permanent magnet stepping motor (PM)
- Υβριδικός βηματικός κινητήρας – hybrid stepping motor (HB)

### 3.7.1 Βηματικοί Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη (Permanent Magnet- PM)

Οι βηματικοί κινητήρες που στο στροφέα χρησιμοποιούν ένα μόνιμο μαγνήτη καλούνται βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Ο δρομέας του κινητήρα του μόνιμου μαγνήτη αποτελείται από κυλινδρικούς τομείς μόνιμων μαγνητών που προσαρμίζονται στην ίδια άτρακτο. Οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν πόλους που τείνουν να ευθυγραμμίζονται με το πεδίο πόλων του στάτη. Η κατασκευή του κινητήρα δεν επιτρέπει μικρά γωνιακά βήματα, όμως γίνεται πολύ οικονομικά.

Οι βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν ένα χαρακτηριστικό που δεν το συναντάμε στους βηματικούς κινητήρες μεταβλητής απροθυμίας. Η φορά περιστροφής τους αλλάζει εάν αλλάξει η φορά του ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη. Επιπλέον, οι μόνιμοι μαγνήτες συντελούν στην τάση του κινητήρα να ευθυγραμμίζεται στις διευθύνσεις που έχει. Μετά από μια μικρή διαταραχή ο δρομέας επανέρχεται σε μια θέση ισορροπίας. Αυτό συμβαίνει γιατί ο κινητήρας εμφανίζει μια ροπή επαναφοράς ή ροπή συγκράτησης ακόμα και αν διακοπεί η τροφοδοσία.

Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν απλή κατασκευή, μικρή ροπή αδράνειας, παράγουν χαμηλή ροπή σε χαμηλές στροφές και έχουν το χαμηλότερο κόστος. Για τους παραπάνω λόγους, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη αποτελούν μια ιδανική επιλογή για τις μη βιομηχανικές εφαρμογές και είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενοι (π.χ. εκτυπωτής, μηχανές γραφείου κτλ).



Σχήμα 3.22 Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη

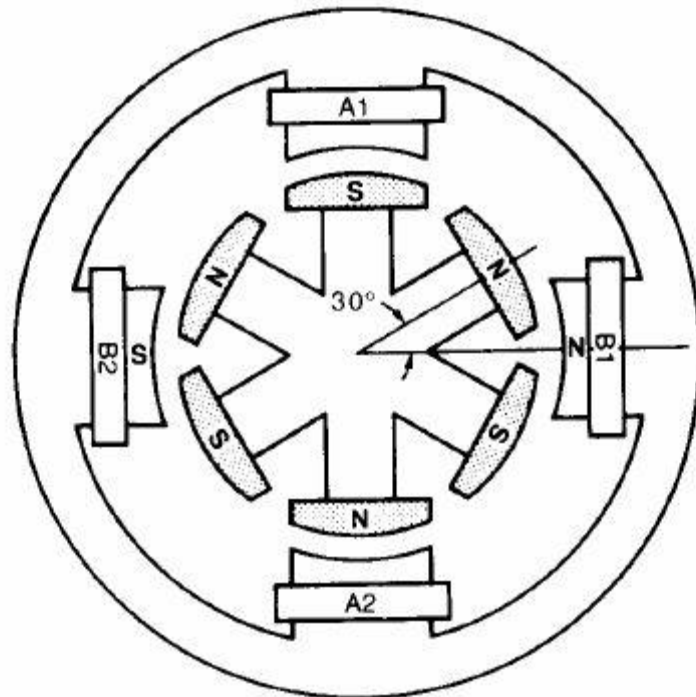
Βήμα μικρής γωνίας μέχρι  $1,8^\circ$  όπως έχει προαναφερθεί επιτυγχάνεται όταν ο δρομέας είναι κυλινδρικός με σχισμές γύρω από την περιφέρεια του. Οι οδόντες που δημιουργούνται κατά αυτό τον τρόπο είναι οι έκτυποι πόλοι του δρομέα και φτάνουν στους 100.

Ο στάτης έχει τρεις, τέσσερις, πέντε ή οκτώ πόλους, οι επιφάνειες των οποίων είναι με σχισμές ώστε να δημιουργούνται οδοντώσεις. Διάφοροι κατασκευαστικοί τύποι βηματικών κινητήρων οδηγούνται σε βήματα των  $18^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $7,5^\circ$ ,  $5^\circ$  και  $1,8^\circ$ .

Οι βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη είναι παρόμοιοι με τους κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης, όμως έχουν μόνιμους βόρειους και νότιους πόλους.

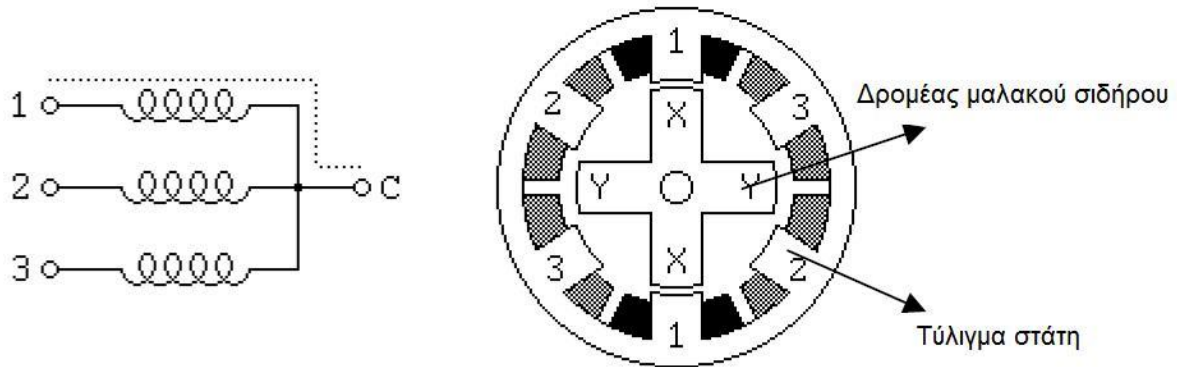
Στο σχήμα 3.23 απεικονίζεται ένας βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη με τέσσερις πόλους στον στάτη και έξι στον δρομέα. Τα πηνία A1 και A2 είναι συνδεδεμένα σε σειρά και τα πηνία B1 και B2 επίσης είναι σε σειρά.

Η φορά περιστροφής εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος στα πηνία. Ο κινητήρας αναπτύσσει μια ροπή συγκράτησης (detent torque), η οποία ακινητοποιεί τον δρομέα ακόμη και όταν το ρεύμα στα τυλίγματα του στάτη μηδενίζεται.



Σχήμα 3.23 Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη

### 3.7.2 Βηματικοί Κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης (Variable Reluctance - VR)



Σχήμα 3.24 Τυλίγματα βηματικού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης

Οι βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης είναι οι πιο διαδεδομένοι γι' αυτό τους συναντάμε και στις περισσότερες εφαρμογές. Οι κινητήρες αυτοί παράγονται με ένα τμήμα δρομέα (single stack rotor) ή με πολλαπλά τμήματα δρομέα (multiple stack rotor) προσαρμοσμένα στην ίδια άτρακτο. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η βελτίωση της αποδιδόμενης ροπής. Μπορούν να έχουν μικρό ή μεσαίο γωνιακό βήμα και υψηλή συχνότητα παλμών.

Ο στάτης και ο πυρήνας στροφών αποτελούνται κανονικά από τον τοποθετημένο σε στρώματα πυριτίου χάλυβα, αλλά εκτενώς υιοθετούνται και οι στερεοί στροφέες πυριτίου ράλυβα. Τα υλικά στατών και στροφών πρέπει να έχουν την υψηλή διαπερατότητα και να είναι ικανά για υψηλή μαγνητική ροή, για να περάσουν ακόμα κι αν εφαρμόζεται μια χαμηλή μαγνητική δύναμη. Η συγκεκριμένη κατηγορία βηματικών κινητήρων περιλαμβάνει ένα στάτη που κρατιέται σε θέση με το εξωτερικό περίβλημα του κινητήρα και τα τυλίγματα. Ο στροφέας κατασκευάζεται ως ενιαία μονάδα, που υποστηρίζεται σε κάθε άκρη της μηχανής από τα ρουλεμάν, και περιλαμβάνει έναν άξονα προβολής για τη σύνδεση των εξωτερικών φορτίων. Ο δρομέας του κινητήρα μεταβλητής απροθυμίας έχει έκτυπους πόλους (οδόντες), όπου διαφέρουν σε πλήθος από αυτό των πόλων του στάτη. Επομένως, πάντα υπάρχουν οδόντες που δεν είναι ευθυγραμμισμένοι με αυτούς του στάτη.

Ο δρομέας αναγκάζεται να περιστραφεί από τη διέγερση του τυλίγματος του κατάλληλου οδόντα έτσι ώστε κάποιο ζεύγος οδόντων να ευθυγραμμιστεί με τους πόλους του ενεργοποιημένου τυλίγματος. Αποτέλεσμα είναι η ελαχιστοποίηση της μαγνητικής αντίστασης στο δρόμο της μαγνητικής ροής.

### 3.7.3 Υβριδικοί Βηματικοί Κινητήρες

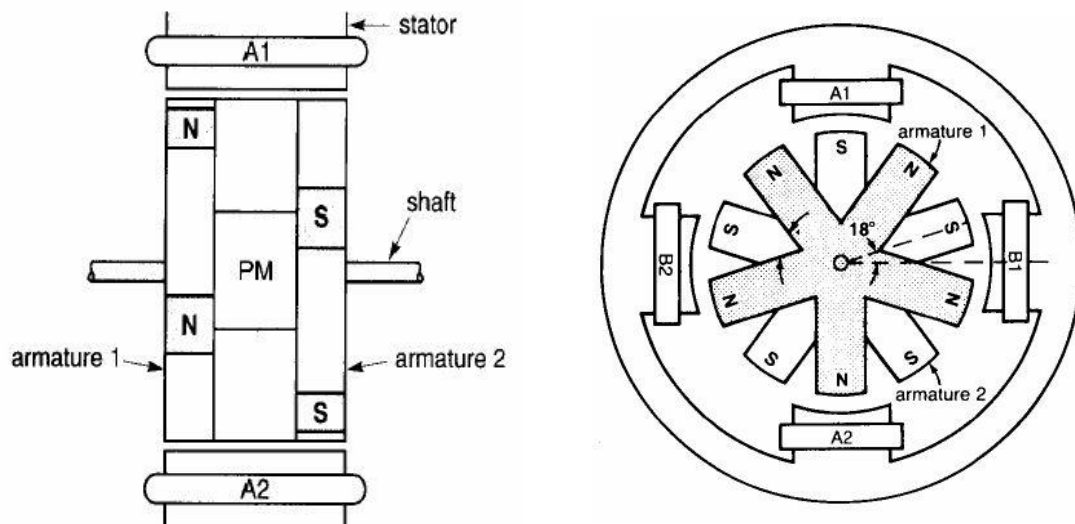
Οι Υβριδικοί Βηματικοί Κινητήρες συνδυάζουν τα κύρια χαρακτηριστικά των άλλων δύο προηγούμενων τύπων. Ο δρομέας αποτελείται, όπως και στους βηματικούς κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, από μόνιμους μαγνήτες σε μορφή κυλίνδρου. Στα άκρα των μαγνητών, προσαρμίζονται τμήματα με μορφή οδοντωτών τροχών. Λόγω του ενδιάμεσου μαγνήτη αυτά μετατρέπονται σε βόρειο και σε νότιο πόλο.

Ο δρομέας αποτελείται από ζεύγη τμημάτων και επειδή είναι μόνιμος μαγνήτης υπάρχει πάντα κάποια ροπή συγκράτησης. Ο στάτης έχει έκτυπους πόλους ή οδόντες και τα τυλίγματα του είναι συνεχή και κατά μήκος του άξονα.

Οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες είναι οι πλέον διαδεδομένοι στις βιομηχανικές εφαρμογές. Έχουν δύο πανομοιότυπους σπλισμούς στο ίδιο άξονα. Στο σχήμα 3.25 απεικονίζεται υβριδικός κινητήρας με τετραπολικό στάτη και δύο πενταπολικούς σπλισμούς εκ των οποίων ο ένας είναι μαγνητισμένος ώστε οι πέντε πόλοι του να είναι βόρειοι και ο άλλος είναι μαγνητισμένος ώστε όλοι οι πέντε πόλοι του να είναι νότιοι.

Τα πηνία A1 και A2 είναι σε σειρά, το ίδιο τα πηνία B1 και B2. Ο κινητήρας αναπτύσσει ροπή συγκράτησης που κρατάει τον δρομέα ακίνητο. Όταν διεγείρονται τα πηνία B, τότε ο δρομέας περιστρέφεται κατά  $18^\circ$  και ευθυγραμμίζεται με τους πόλους B του στάτη.

Μεταξύ των δύο σπλισμών βρίσκεται ένας μόνιμος μαγνήτης ο οποίος παράγει ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο μαγνητίζει τον έναν σπλισμό ως βόρειο και τον άλλο σπλισμό ως νότιο. Ο μόνιμος μαγνήτης απεικονίζεται στην τομή του βηματικού κινητήρα στο Σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.25 Τομή υβριδικού κινητήρα

# 4

## Κατασκευαστικά στοιχεία βηματικού κινητήρα

### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρών κεφάλαιο θα επιχειρήσουμε να εξηγήσουμε κάποια κατασκευαστικά στοιχεία του βηματικού κινητήρα ώστε να έχουμε μία εποπτική εικόνα του κατανοώντας τις μεθόδους επίτευξης του επιθυμητού βήματος για την εκάστοτε εφαρμογή .

### 4.2 Μέθοδοι βηματισμού (Step modes)

Οι διαφορετικές μέθοδοι οδήγησης έγκειται στις διαφορετικές συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων του στάτη όπως έχει προαναφερθεί. Για την επίτευξη του επιθυμητού βήματος όμως, ανεξάρτητα απο τις συνδεσμολογίες αυτών των τυλιγμάτων παίζει ρόλο η σειρά και η ταχύτητα ενεργοποίησής τους.

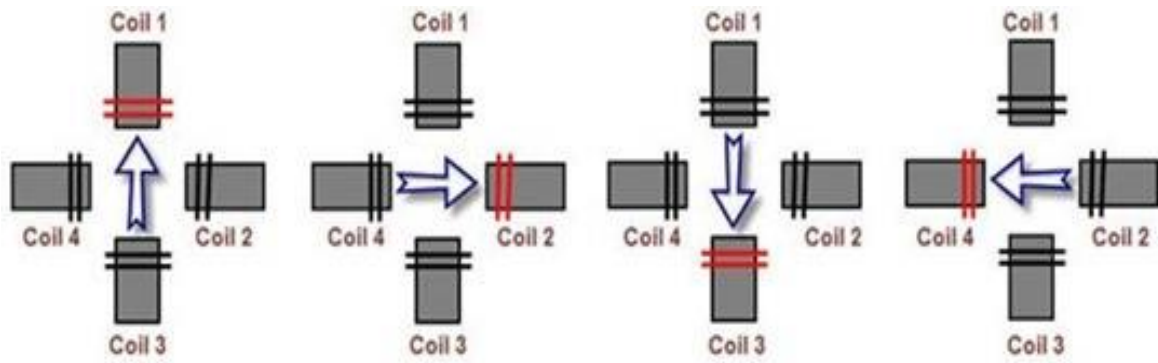
#### 4.2.1 Μονό βήμα - διέγερση μίας σπείρας (Single Step – Single Coil Excitation)

Αυτός είναι ο πιο απλός τρόπος βηματισμού ενός κινητήρα. Σε αυτή την περίπτωση ενεργοποιείται ένας ηλεκτρομαγνήτης κάθε φορά. Έτσι ένας κινητήρας χρειάζεται 48 παλμούς για μία περιστροφή. Κάθε παλμός κινεί το ρότορα κατά  $7,5^\circ$ . Η επόμενη ακολουθία παλμών πρέπει να επαναληφθεί 12 φορές για μία πλήρη περιστροφή. Παρακάτω φαίνεται η ακολουθία παλμών για τη μέθοδο μονού βήματος:

Παλμός	Πηνίο 1	Πηνίο 2	Πηνίο 3	Πηνίο 4
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

Πίνακας 4.1 Ακολουθία παλμών για μονό βήμα





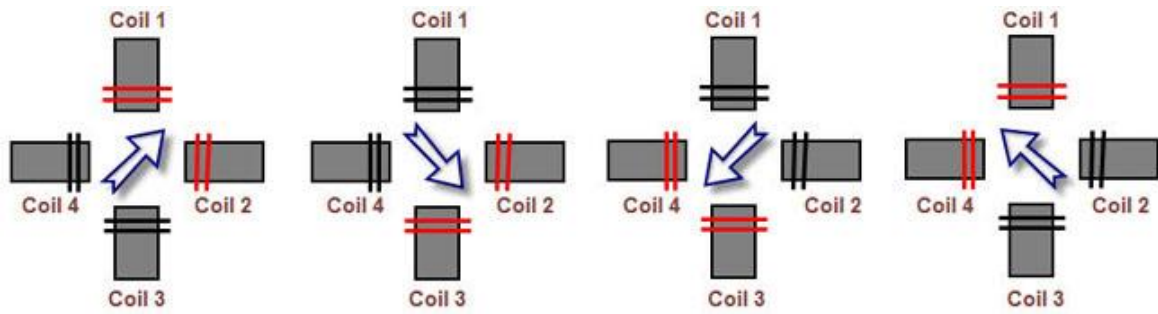
Σχήμα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση μονού βήματος

#### 4.2.2 Βηματισμός για υψηλή ροπή (*High Torque Step – Two Coil Excitation*)

Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε μεγάλες τιμές ροπής στην περιστροφή του ρότορα. Σε αυτή την περίπτωση ενεργοποιούνται δύο ηλεκτρομαγνήτες συγχρόνως κάθε φορά. Και στη μέθοδο για βηματισμό υψηλής ροπής ένας κινητήρας χρειάζεται 48 παλμούς για μία περιστροφή, γυρίζοντας κάθε παλμός το ρότορα κατά  $7,5^\circ$ . Παρακάτω φαίνεται η ακολουθία παλμών για βηματισμό υψηλής ροπής και η οποία πρέπει να επαναληφθεί 12 φορές για μία πλήρη περιστροφή.

Παλμός	Πηνίο 1	Πηνίο 2	Πηνίο 3	Πηνίο 4
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

Πίνακας 4.2 Ακολουθία παλμών για βηματισμό υψηλής ροπής



Σχήμα 4.2 Σχηματική αναπαράσταση για βηματισμό υψηλής ροπής

### 4.2.3 Μισό βήμα (Half step)

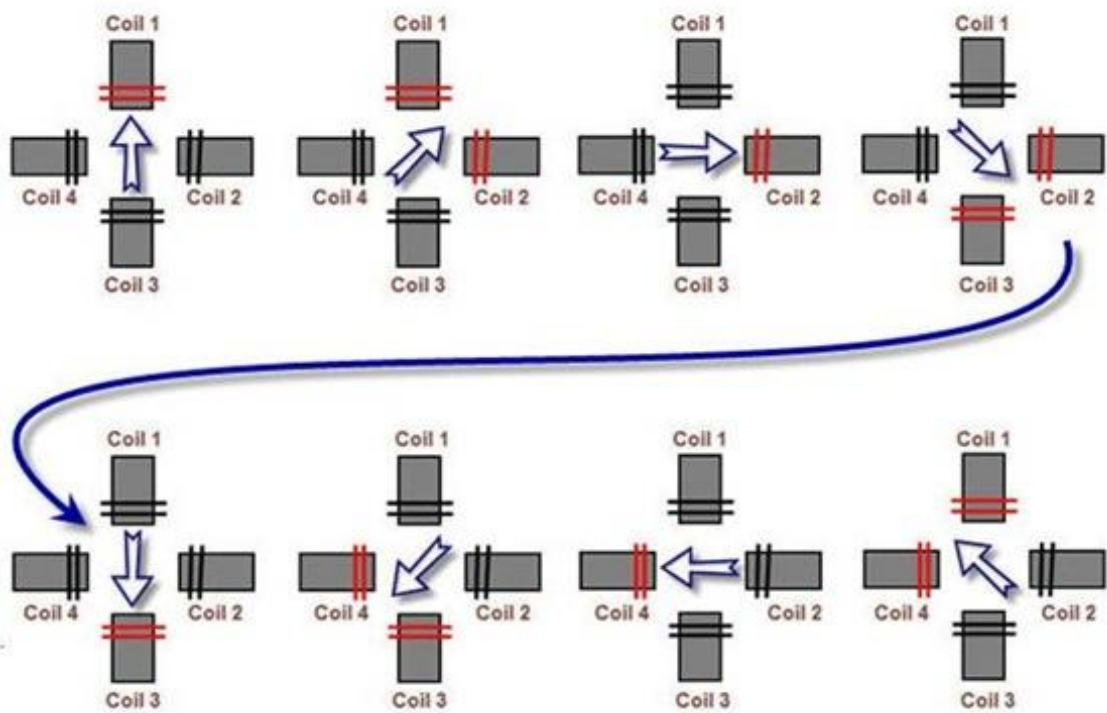
Η διαφορά μεταξύ μονού και μισού βήματος είναι ότι για το ίδιο γωνιακό βήμα, η μέθοδος του μισού βήματος δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια κίνησης αφού ο ρότορας κινείται μισό βήμα τη φορά. Ωστόσο αυτό επιτυγχάνεται με τη μισή ταχύτητα περιστροφής.

Έτσι ένας κινητήρας χρειάζεται διπλό βηματισμό, δηλαδή 96 παλμούς για μία περιστροφή. Έτσι ο κάθε παλμός κινεί το ρότορα κατά  $3,75^\circ$ . Παρακάτω φαίνεται πως δουλεύει ο βηματισμός μισού βήματος:

Παλμός	Πηνίο 1	Πηνίο 2	Πηνίο 3	Πηνίο 4
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

	- μέθοδος μονού βήματος, φυσιολογική ροπή, αθόρυβη λειτουργία
	- βηματισμός υψηλής ροπής, υψηλή ροπή, θορυβώδης λειτουργία

Πίνακας 4.3 Ακολουθία παλμών για μισό βήμα



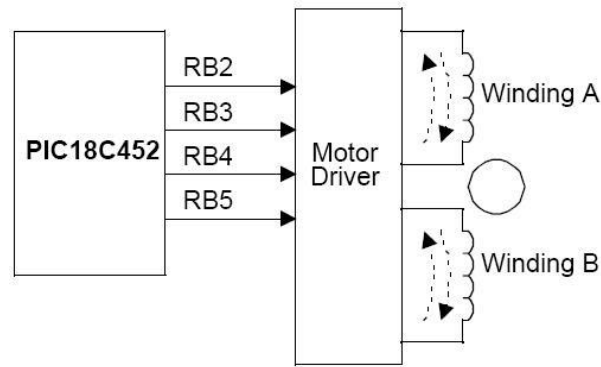
Σχήμα 4.3 Σχηματική αναπαράσταση μισού βήματος

Παρατηρούμε ότι ενεργοποιούνται δύο ηλεκτρομαγνήτες ταυτόχρονα για να πετύχουμε ενδιάμεσα βήματα. Αυτή η μέθοδος είναι ένας συνδυασμός του μονού βηματισμού και εκείνου για επίτευξη υψηλής ροπής.

Ωστόσο διαφέρει από το βηματισμό υψηλής ροπής στο ότι κάθε φορά είναι ενεργοποιημένοι και οι δύο γειτονικοί ηλεκτρομαγνήτες.

#### 4.2.4 Μικροβηματισμός (Microstep)

Ο μικροβηματισμός είναι σχετικά μία νέα τεχνολογία στην οδήγηση βηματικών κινητήρων. Ελέγχοντας με ηλεκτρονικό τρόπο τα ρεύματα των τυλιγμάτων του στάτη δίνοντας παλμούς μέσω ενός μικροεπεξεργαστή, επιτυγχάνουμε υποπολλαπλάσια του βήματος. Αυτή η τεχνική είναι ικανή να οδηγήσει το δρομέα σε 1/256 του βήματος του κινητήρα, ή αλλιώς πάνω από 50.000 βήματα σε μία πλήρη περιστροφή.

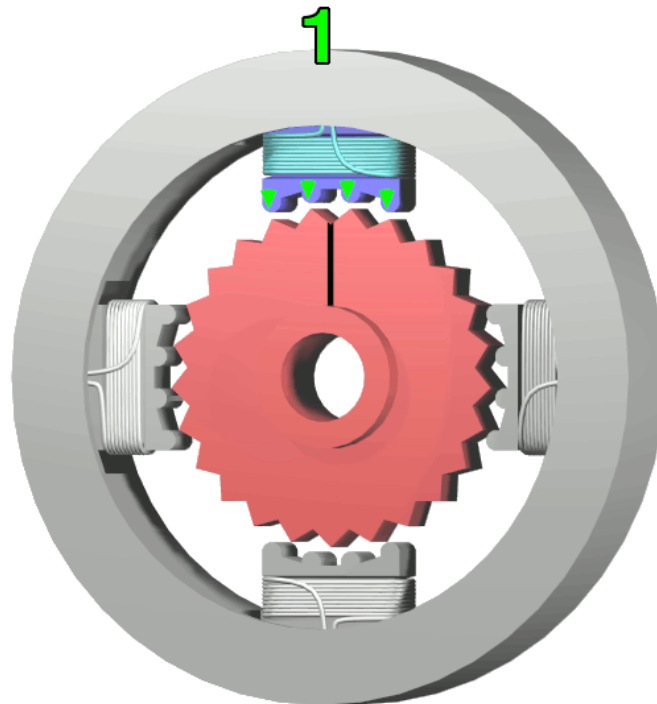


Σχήμα 4.4 Σχηματική αναπαράσταση μικροβηματισμού (Block diagram)

### 4.3 Οδοντωτός ρότορας

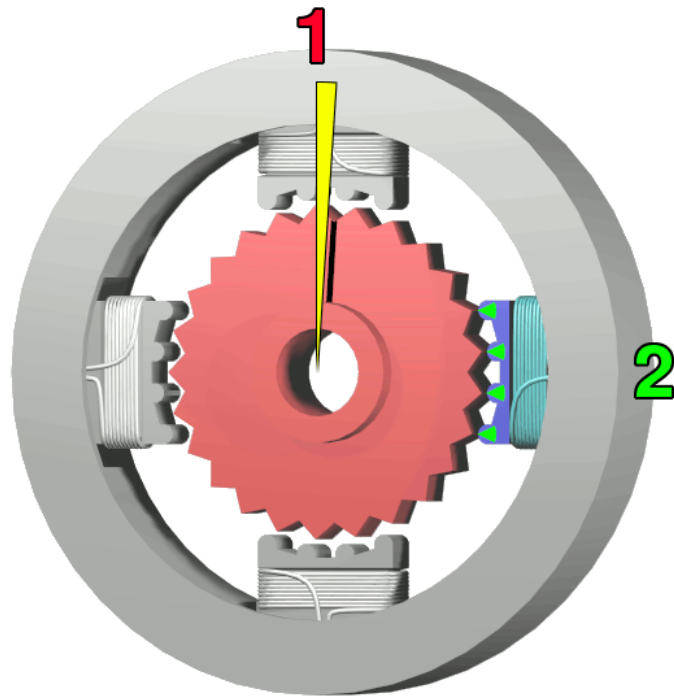
Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο βηματικός κινητήρας είναι ένας τύπος σύγχρονου κινητήρα ο οποίος σχεδιάζεται να περιστρέφεται για ένα ειδικό αριθμό μοιρών για κάθε ηλεκτρικό παλμό που δέχεται από την μονάδα ελέγχου. Τυπικά βήματα είναι  $2^\circ$ ,  $2.5^\circ$ ,  $3.75^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $7.5^\circ$ , και  $15^\circ$  για κάθε παλμό. Για να αυξήσουμε το βηματισμό του δρομέα αλλά και να καθορίσουμε ακριβώς το βήμα του κινητήρα, ο οδοντωτός ρότορας μαλακού σιδήρου κατάσκευάζεται με συγκεκριμένο αριθμό οδοντώσεων για το επιθυμητό βήμα.

Ετσι παρατηρώντας το σχήμα 4.5 βλέπουμε οτι όταν ο πάνω ηλεκτρομαγνήτης είναι ενεργοποιημένος έλκει τα πλησιέστερα δόντια του ρότορα. Με τα δόντια ευθυγραμμισμένα με τον ηλεκτρομαγνήτη 1, βρίσκονται σε μικρή απόκλιση με τον ηλεκτρομαγνήτη 2.



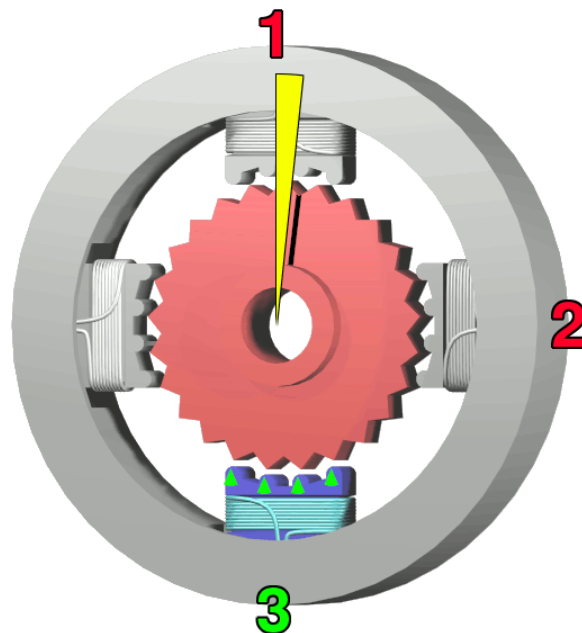
Σχήμα 4.5 Αναπαράσταση βηματικού κινητήρα (βήμα 1)

Όταν απενεργοποιηθεί το πηνίο 1 και ενεργοποιηθεί το 2 τότε αυτό τραβάει τα πλησιέστερα δόντια του ρότορα δεξιά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να τον στρέψει τον κατά  $3.6^\circ$  όπως δείχνει και το σχήμα 4.6.



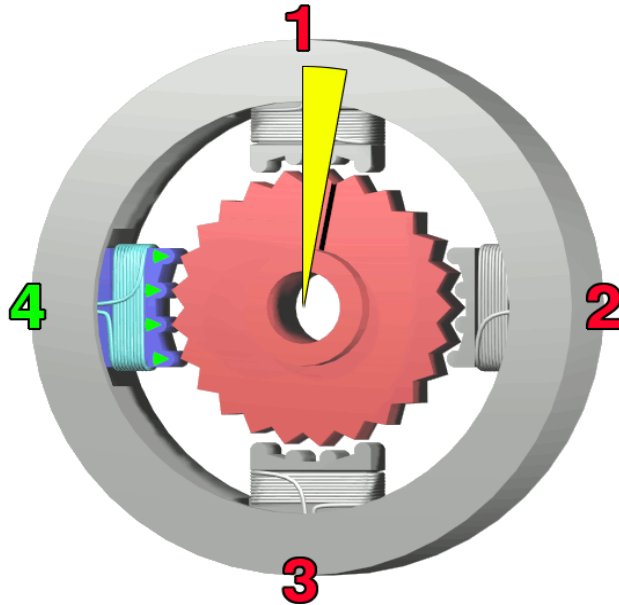
Σχήμα 4.6 Αναπαράσταση βηματικού κινητήρα (βήμα 2)

Όταν διεγερθεί ο κάτω ηλεκτρομαγνήτης ο ρότορας θα περιστραφεί για ακόμη  $3.6^\circ$ .



Σχήμα 4.7 Αναπαράσταση βηματικού κινητήρα (βήμα 3)

Στο σχέδιο 4.8 ο αριστερός ηλεκτρομαγνήτης είναι ενεργοποιημένος στρέφοντας το ρότορα για άλλες  $3.6^\circ$ . Όταν ο πρώτος ηλεκτρομαγνήτης διεγερθεί ξανά, όλος ο ρότορας θα έχει περιστραφεί κατά ένα δόντι, και αφού όλα τα δόντια είναι 25 στον αριθμό, θα χρειαστεί 100 βήματα για μία πλήρη περιστροφή.



Σχήμα 4.8 Αναπαράσταση βηματικού κινητήρα (βήμα 4)

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται κάποιες λεπτομέρειες κατασκευής ενός βηματικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη, όπως ο οδοντωτός κύλινδρος μόνιμου μαγνήτη και τα τυλίγματα του στάτη με τους επίσης οδοντωτούς πόλους.



Σχήμα 4.9 Λεπτομέρειες κατασκευής βηματικού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίδραση

# 5 Παράλληλη θύρα

## 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τον έλεγχο ενός βηματικού κινητήρα με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Πιο συγκεκριμένα, ο κινητήρας θα συνδεθεί στη παράλληλη θύρα (parallel port), όπου με την εφαρμογή κάποιου προγράμματος είμαστε σε θέση να ελέγξουμε τη κίνησή του. Ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε ένα έτοιμο πρόγραμμα με γραφικό περιβάλλον.

Θα αρχίσουμε τη παρουσίαση με τις βασικές πληροφορίες για τον έλεγχο μιας παράλληλης θύρας ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή και θα παραθέσουμε κάποια επιπλέον σχήματα για την καλύτερη κατανόηση των βηματικών κινητήρων σε συνδιασμό με το κύκλωμα οδήγησης.

## 5.2 Χαρακτηριστικά παράλληλης θύρας

Η παράλληλη θύρα (Parallel Port - DB-25) είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιημένη θύρα για διασύνδεση με διάφορες περιφερειακές μονάδες όπως οι εκτυπωτές, οι σαρωτές (scanners) και οι διαμορφωτές (modems). Σε πολλούς υπολογιστές και ιδιαίτερα στους φορητούς (laptops) η παράλληλη υποδοχή παραλείπεται λόγω κόστους. Εντούτοις υπάρχει πρόσβαση σε τέτοια θύρα μέσω εξωτερικής μονάδας.

Βρίσκεται συνήθως στο πίσω μέρος του PC ως D-type 25 θηλυκός σύνδεσμος. Μπορεί επίσης να υπάρξει ένας D-type 25 αρσενικός σύνδεσμος. Αυτή θα είναι όμως μια σειριακή θύρα RS-232 και έτσι, είναι ένας τελείως διαφορετικός τύπος θύρας. Η ονομασία DB, D-sub ή D-subminiature είναι συνηθισμένη στα βύσματα, κυρίως αυτά που χρησιμοποιούν οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Ο χαρακτηρισμός τους ως μικροσκοπικές (subminiature) ήταν κατάλληλος την εποχή που είχαν πρωτοεμφανιστεί αλλά σήμερα είναι ίσως η μεγαλύτερη σε μέγεθος θύρα που χρησιμοποιείται. Τελεί υπό κατάργηση αφού τη θέση της παίρνει η περισσότερο ευέλικτη θύρα USB. Παρόλα αυτά, αποτελεί μία εύκολη λύση για την έξοδο/είσοδο πολλών ψηφιακών σημάτων παράλληλα και γι' αυτό ακόμα και σήμερα παραμένει σε χρήση και έχει τη θέση της στις μητρικές κάρτες των υπολογιστών.

Το νούμερο 25 στο όνομα DB-25 δηλώνει τον αριθμό των ακίδων που χρησιμοποιεί



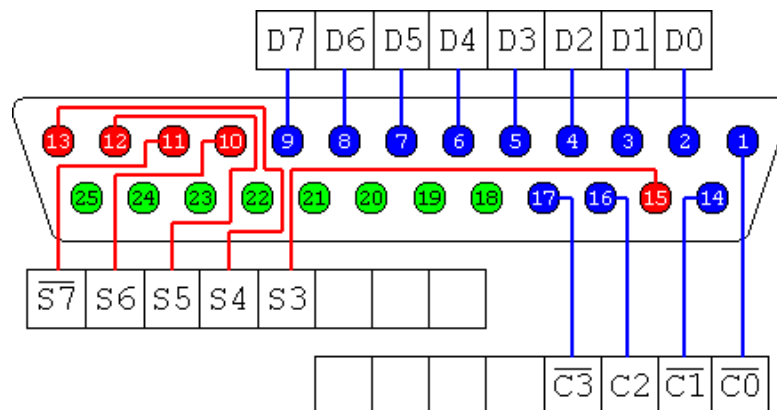
Παρακάτω φαίνεται η εικόνα μίας παράλληλης θύρας DB-25 στο πίσω μέρος ενός Η/Υ.



Σχήμα 5.1 Η παράλληλη θύρα στο πίσω μέρος ενός Η/Υ (desktop)

Η παράλληλη θύρα είναι εύκολη στο προγραμματισμό και ταχύτερη σε σύγκριση με τη σειριακή. Αλλά το κύριο μειονέκτημά της είναι ότι χρειάζεται περισσότερες γραμμές μετάδοσης, δηλαδή περισσότερα καλώδια. Λόγω αυτού του μειονεκτήματος δεν χρησιμοποιούνται για επικοινωνία σε μεγάλη απόσταση. Όπως μαρτυρά και η ονομασία τους, η παράλληλη θύρα στέλνει δεδομένα παράλληλα που φτάνουν τα 8 bit ή 1 byte και λαμβάνει 5 bit, ενώ η σειριακή μεταδίδει τα ίδια δεδομένα σειριακά και 1 bit τη φορά. Έτσι στη σειριακή επικοινωνία θα έχουμε μόνο 2 γραμμές μετάδοσης. Μία για εκπομπή και μία για λήψη, ενώ στη παράλληλη περισσότερες.

Στο παρακάτω σχήμα και πίνακα 5.1 αντίστοιχα φαίνονται το νούμερο και το σύμβολο της κάθε ακίδας (pin) καθώς και η περιγραφή της.



Σχήμα 5.2 Συμβολισμός κάθε ακίδας



Αποτελείται από 4 γραμμές ελέγχου, 5 γραμμές κατάστασης και 8 γραμμές δεδομένων. Οι νεώτερες παράλληλες θύρες είναι τυποποιημένες κάτω από το IEEE 1284 πρότυπο που παρουσιάστηκε το 1994. Αυτό το πρότυπο καθορίζει 5 τρόπους λειτουργίας που είναι οι ακόλουθοι:

- i. Compatibility Mode
- ii. Nibble Mode (Protocol not Described in this Document)
- iii. Byte Mode (Protocol not Described in this Document)
- iv. PP Mode (Enhanced Parallel Port)
- v. ECP Mode (Extended Capabilities Port)

Ο στόχος ήταν να σχεδιαστούν νέοι οδηγοί και συσκευές που θα ήταν συμβατοί μεταξύ τους και προς τα πίσω συμβατοί στη διασύνδεση τους με μια τυποποιημένη παράλληλη θύρα.

Η λειτουργίες Compatibility, Nibble & Byte χρησιμοποιούν ακριβώς το τυποποιημένο διαθέσιμο υλικό στις αρχικές παράλληλες κάρτες ενώ οι λειτουργίες του EPP & ECP απαιτούν πρόσθετο υλικό που μπορεί να τρέξει με γρηγορότερες ταχύτητες, ενώ ακόμη όντας προς τα πίσω συμβατό με την τυποποιημένη παράλληλη θύρα.

Η λειτουργία Compatibility ή "Centronics" όπως είναι περισσότερο γνωστή, μπορεί μόνο να στείλει τα στοιχεία εμπρός με μια χαρακτηριστική ταχύτητα 50 kbyte ανά δευτερόλεπτο αλλά μπορεί να είναι και υψηλότερη όπως 150 kbyte το δευτερόλεπτο. Προκειμένου να παραληφθούν τα στοιχεία, πρέπει να αλλάξετε σε λειτουργία nibble ή byte. Η λειτουργία nibble μπορεί να εισαγάγει 4 bit στην αντίστροφη κατεύθυνση. Π.χ. από τη συσκευή στον υπολογιστή. Η λειτουργία byte χρησιμοποιεί το αμφίδρομο χαρακτηριστικό γνώρισμα της παράλληλης (που βρίσκεται μόνο σε μερικές κάρτες) για να εισαγάγει μια ψηφιολέξη (8 bit) στην αντίστροφη κατεύθυνση. Οι παράλληλες EPP & ECP χρησιμοποιούν πρόσθετο υλικό για να παραγάγουν και να διαχειριστούν χειραψία (handshaking). Αυτό περιορίζει την ταχύτητα με την οποία η θύρα μπορεί να λειτουργήσει.

Παράλληλη θύρα (Parallel Port) :

- i. Ακίδες για αποστολή και λήψη δεδομένων (Data Ports):  
Για την αποστολή των δεδομένων γίνεται χρήση των ακίδων D0 έως και D7
- ii. Ακίδες για σήματα κατάστασης (Status Ports):  
Οι ακίδες ελέγχου χρησιμοποιούνται για να διαβάζουν σήματα. Είναι οι S0 έως και S7. Ωστόσο οι ακίδες S0 έως και S2 είναι αόρατες στη παράλληλη θύρα.
- iii. Ακίδες για σήματα ελέγχου (Control Ports):  
Χρησιμοποιούνται και αυτές για αποστολή και λήψη δεδομένων. Είναι οι C0 έως και C7 αλλά και εδώ οι ακίδες C4 έως και C7 είναι αόρατες στη παράλληλη θύρα
- iv. Ακίδες για την γείωση (Ground Pins)  
Χρησιμοποιούνται οι ακίδες G0 - G7 ή αλλιώς 18 ως 25 στο σχήμα 5.2.

Pin No.	Pin Name	Περιγραφή
1	Strobe	Συνήθως είναι ενεργοποιημένο (+5V), αλλά απενεργοποιείται (0V) όταν ο υπολογιστής στέλνει δεδομένα
2 - 9	D0 - D7	Αποστολή και λήψη δεδομένων.Θα τις χρησιμοποιήσουμε στη κατασκευή μας
10	nAck	Σήμα αναγνώρισης από συσκευή που είναι συνδεδεμένη στη παράλληλη θύρα π.χ. εκτυπωτής, στον υπολογιστή
11	Busy	Αν ο εκτυπωτής είναι απασχολημένος , η ακίδα θα ενεργοποιηθεί(+5V).Μόλις απενεργοποιηθεί, ο υπολογιστής είναι έτοιμος να λάβει επιπλέον δεδομένα
12	Error	Ενεργοποιείται όταν δημιουργηθεί κάποιο σφάλμα όπως να τελειώσει το χαρτί στον εκτυπωτή.
13	Select	Ενεργοποιείται για να δείξει ότι η συνδεδεμένη συσκευή είναι έτοιμη να λειτουργήσει
14	Autofeed	Ο υπολογιστής στέλνει ένα σήμα ελέγχου
15	Error	Ενεργοποιείται όταν δημιουργηθεί κάποιο σφάλμα
16	Initalize	Ο υπολογιστής απενεργοποιεί την ακίδα όταν μία νέα εκτύπωση είναι έτοιμη
17	Select-In	Η ακίδα 17 χρησιμοποιείται για να απενεργοποιεί ο υπολογιστής την συνδεδεμένη συσκευή
18-25	Ground	Χρησιμοποιούνται για γείωση

Πίνακας 5.1 Επεξήγηση κάθε ακίδας

### 5.3 Διευθύνσεις θυρών

Η παράλληλη θύρα έχει συνήθως τρεις χρησιμοποιούμενες διευθύνσεις. Αυτές παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα 2. Η διεύθυνση 3BCh εισήχθη αρχικά χρησιμοποιημένη για τις παράλληλες θύρες στις παλαιότερες κάρτες βίντεο. Αυτή η διεύθυνση εξαφανίστηκε έπειτα για μια στιγμή, όταν αφαιρέθηκαν οι παράλληλες θύρες από τις κάρτες βίντεο. Έχουν επανεμφανιστεί τώρα ως επιλογή για τις παράλληλες θύρες που ενσωματώνονται επάνω στις μητρικές κάρτες, στις οποίες η διαμόρφωσή τους μπορεί να αλλάξει χρησιμοποιώντας το BIOS.LPT1 ορίζεται κανονικά η διεύθυνση βάσεων 378h, ενώ LPT2 ορίζεται η 278h. Εντούτοις αυτό μπορεί να μην συμβαίνει πάντα όπως εξηγείται στη συνέχεια. Η 378h & 278h χρησιμοποιούνται συνήθως για τις παράλληλες θύρες.Ο δείκτης h δείχνει ότι είναι σε δεκαεξαδικό σύστημα. Αυτές οι διευθύνσεις μπορούν να αλλάξουν από μηχανήμα σε μηχανήμα.

Όταν ο υπολογιστής ανοίγεται αρχικά, το BIOS (Basic System Input/Output) θα καθορίσει τον αριθμό θυρών που έχετε και ορίζει τις ετικέτες των συσκευών σε LPT1, LPT2 & LPT3.Το BIOS εξετάζει αρχικά τη διεύθυνση 3BCh. Εάν μια παράλληλη θύρα βρίσκεται εκεί, ορίζεται ως LPT1, έπειτα ψάχνει στη θέση 378h.Εάν μια παράλληλη κάρτα βρεθεί εκεί παίρνει το αμέσως επόμενο διαθέσιμο όνομα. Αυτό ορίζεται σε LPT1 εάν δε βρεθεί κάρτα στην 3BCh , στη συνέχεια συμβαίνει το ίδιο και για την 278h.Επομένως είναι δυνατό να υπάρχει LPT2 στην 378h και όχι στην αναμενόμενη διεύθυνση 278h.

Διεύθυνση	Περιγραφή
3BCh - 3BFh	Χρησιμοποιούνταν για τις παράλληλες θύρες στις παλαιότερες κάρτες βίντεο, τώρα επανεμφανίζονται ως επιλογή για τις παράλληλες θύρες που ενσωματώνονται επάνω στις μητρικές κάρτες, στις οποίες η διαμόρφωσή τους μπορεί να αλλάξει χρησιμοποιώντας το BIOS
378h- 3BFh	Συνήθως για τη διεύθυνση της LPT1
278h- 27Fh	Συνήθως για τη διεύθυνση της LPT2

Πίνακας 5.2 Χρησιμοποιούμενες διευθύνσεις

Αυτό που μπορεί να κάνει αυτήν την διαδικασία ακόμη πιο πολύπλοκη, είναι ότι μερικοί κατασκευαστές των παράλληλων καρτών, έχουν ακίδες βραχυκύκλωσης (jumpers) που επιτρέπουν σε μας να θέσουμε τη θύρα σε LPT1, LPT2, LPT3. Τώρα ποια διεύθυνση είναι LPT1; Στην πλειοψηφία των καρτών η LPT1 είναι η 378h, και LPT2 η 278h, αλλά μερικοί θα χρησιμοποιήσουν την 3BCh ως LPT1, 378h ως LPT2 και 278h σαν LPT3.

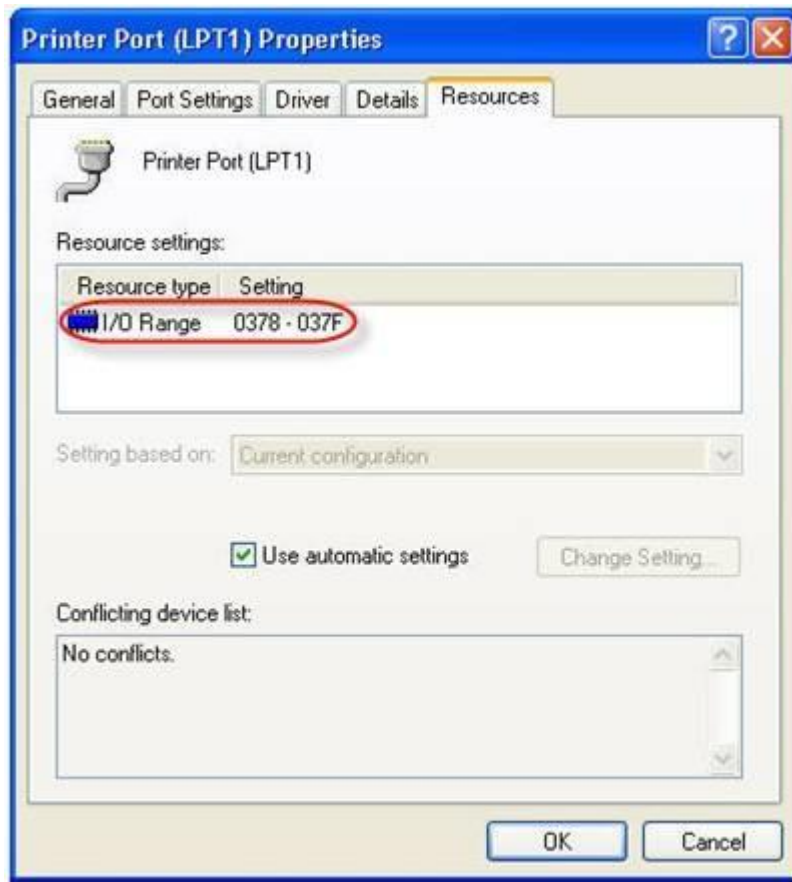
Η ανάθεση των ονομασιών LPT1, LPT2 & LPT3 δεν πρέπει να ανησυχούν αυτούς που επιθυμούν να διασυνδέσουν τις συσκευές στα PC τους. Τις περισσότερες φορές η διεύθυνση βάσης χρησιμοποιείται για να διασυνδέσει τη θύρα, παρά το όνομα LPT1 κ.λπ. Εντούτοις εάν θελήσετε να βρείτε τη διεύθυνση LPT1 ή οποιοσδήποτε από τις συσκευές, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε έναν πίνακα αντιστοίχισης που παρέχεται από το BIOS. Όταν το BIOS ορίζει τις διευθύνσεις στις συσκευές σας, αποθηκεύει τη διεύθυνση στις συγκεκριμένες θέσεις στη μνήμη, έτσι μπορούμε να τους βρούμε.

Αρχική διεύθυνση	Λειτουργία
0000:0408	Διεύθυνση βάσης της LPT1
0000:040A	Διεύθυνση βάσης της LPT2
0000:040C	Διεύθυνση βάσης της LPT3
0000:040E	Διεύθυνση βάσης της LPT4

Πίνακας 5.3 LPT διευθύνσεις στην περιοχή δεδομένων του BIOS

Ο ανωτέρω πίνακας, πίνακας 5.3, παρουσιάζει τη διεύθυνση στην οποία μπορούμε να βρούμε τις διευθύνσεις της θύρας των συσκευών στην περιοχή δεδομένων του BIOS. Κάθε διεύθυνση θα καταλάβει 2 byte.

Για να μπορούμε να έχουμε πρόσβαση και έλεγχο της παράλληλης θύρας πρέπει να γνωρίζουμε δύο παραμέτρους, τη διεύθυνση και τη τιμή της. Για να μάθουμε τη διεύθυνση της παράλληλης θύρας πηγαίνουμε Control Panel > System > Hardware > Device Manager > Ports (COM & LPT) > Printer Port (LPT1/LPT2) > Properties > Resources > Resource Settings. Σε αυτή τη τοποθεσία βλέπουμε τη διεύθυνση σε δεκαεξαδική μορφή.



Σχήμα 5.3 Διεύθυνση παράλληλης θύρας στα Windows

Όπως βλέπουμε στην παραπάνω εικόνα, το εύρος εισόδου εξόδου είναι "0378 - 037F". Η δεκαεξαδική μορφή "0x378" είναι ίση με τον αριθμό "888" στο δεκαδικό σύστημα. Τώρα μία πιθανή κλήση της θύρας αυτής είναι:

VB:  
PortAccess. Output (888, 255)

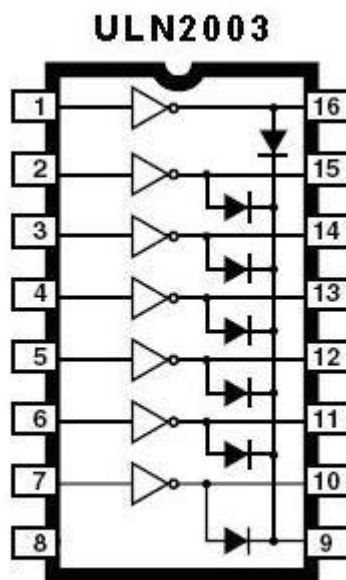
Εδώ το δεκαδικό νούμερο "255" είναι ίσο με το "1111 1111" σε δυαδικό. Στέλνοντας το "255", όλες οι ακίδες εξόδου της παράλληλης θύρας (D0 - D7) θα τεθούν σε κατάσταση high. Ομοίως, στέλνοντας το "0", όλες οι ακίδες εξόδου της παράλληλης θύρας θα τεθούν σε κατάσταση low.

## 5.4 Κύκλωμα οδήγησης

Για την κατασκευή του κυκλώματος οδήγησης χρειάζονται κάποια ηλεκτρονικά εξαρτήματα τα οποία μπορούμε να προμηθευτούμε απο οποιοδήποτε κατάστημα πώλησης ηλεκτρονικών εξαρτημάτων αλλά και απο το διαδίκτυο. Το βασικό εξάρτημα που χρησιμοποιούμε και το οποίο είναι ο "οδηγός" του κινητήρα είναι το ολοκληρωμένο κύκλωμα ULN2003. Αυτό το ολοκληρωμένο κύκλωμα επιλέγεται διότι οι ψηφιακές έξοδοι της παράλληλης θύρας του ηλεκτρονικού υπολογιστή δεν μπορούν να οδηγήσουν τα τυλίγματα (πηνία) του βηματικού κινητήρα. Δεν μπορούν πρακτικά να δώσουν αρκετό ρεύμα για να λειτουργήσει αξιόπιστα. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα κυκλώματα αυτά είναι πολύ εύκολα σε κατασκευή και το κόστος τους είναι πολύ μικρό.

### 5.4.1 Ολοκληρωμένο κύκλωμα ULN2003

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ULN2003 είναι ένας οδηγός που αποτελείται απο επτά ζεύγη Darlington. Έχει τάση εξόδου μέχρι και 50V – 500mA. Στην ουσία ένα ζεύγος Darlington χρησιμεύει για τη "μετατροπή" της τάσης εξόδου της παράλληλης θύρας 5V σε μεγαλύτερες τάσεις, όπως για παράδειγμα στα 12V που είναι η τάση λειτουργίας των περισσότερων βηματικών κινητήρων. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ULN2003 φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.4 Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ULN2003

Περιλαμβάνει επτά διατάξεις τρανζίστορ σε συνδεσμολογία Darlington. Σε κάθε κύκλωμα εξόδου υπάρχει ενσωματωμένη μια δίοδος η οποία χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις οδήγησης επαγωγικών φορτίων και λειτουργεί ως δίοδος ελεύθερης ροής για την προστασία των τρανζίστορ από αιχμές τάσης. Όταν το τρανζίστορ μεταβαίνει από αγωγιμότητα σε αποκοπή, στο πηνίο του βηματικού κινητήρα εμφανίζεται ροή ρεύματος η οποία δημιουργεί υψηλή τάση και η οποία τάση εξαλείφεται μέσο της προστατευτικής διόδου.

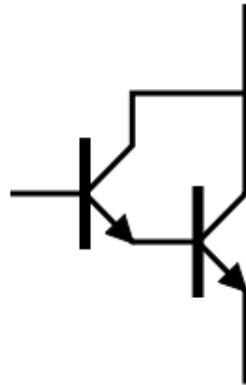
Ο οδηγός ισχύος ULN2003 είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα τεχνολογίας TTL. Τυπικές χρήσεις αυτού του ολοκληρωμένου είναι η οδήγηση διαφόρων τύπων ηλεκτρονόμων, DC κινητήρων, μονάδων απεικόνισης με LED, κεφαλές θερμικής εκτύπωσης, κ.λ.π. Για κάθε ένα από τα επτά εσωτερικά κυκλώματα εξόδου υπάρχει μια δίοδος, της οποίας η άνοδος συνδέεται στον αντίστοιχο ακροδέκτη εξόδου και η κάθοδος της συνδέεται σε έναν κόμβο κοινό για όλα τα κυκλώματα εξόδου, στον οποίον συνδέονται και οι επτά εσωτερικές δίοδοι. Οι έξοδοι του ολοκληρωμένου είναι τύπου ανοικτού συλλέκτη, που σημαίνει ότι το εξωτερικό φορτίο συνδέεται μεταξύ της αντίστοιχης εξόδου και της γραμμής τροφοδοσίας. Η τιμή της τάσης τροφοδοσίας μπορεί να είναι οποιαδήποτε θετική τιμή, μικρότερη από τα 50 V, όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά και στα σχετικά φυλλάδια τεχνικών προδιαγραφών που εκδίδει ο κατασκευαστής του ολοκληρωμένου αυτού. Τα φορτία του συνδέονται στις εξόδους του οδηγού ισχύος, θα πρέπει να απαιτούν μόνιμα ρεύματα το πολύ 500 mA, ενώ θα πρέπει να αντέχουν ρεύματα κορυφής μέχρι 600 mA, ανά κύκλωμα οδήγησης. Τα πιο βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του ολοκληρωμένου κύκλωματος ULN2003 παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα:

ULN2003	
Output Voltage(Max)(V)	50
Switching Voltage(Max)(V)	50
Peak Output Current(mA)	500
Drivers Per Package	7
Input Compatibility	TTL
Delay Time(Typ)(ns)	250
Operating Temperature Range(°C)	-20 to 70
Pin/Package	16PDIP

Πίνακας 5.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά ULN2003

### 5.4.2 Ζεύγη Darlington

Ένα ζεύγος Darlington σποτελείται από δύο τρανζίστορ συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο ώστε το ρεύμα διερχόμενο από το πρώτο τρανζίστορ να ενισχύεται με έναν συντελεστή ενίσχυσης  $\beta$  και διερχόμενο από το δεύτερο τρανζίστορ να δέχεται περαιτέρω ενίσχυση. Δηλαδή σχηματίζεται από ακολουθητές εκπομπού συνδεδεμένους σε καταρράκτη. Ανήκει στη κατηγορία συνδεσμολογίας ενισχυτή κοινού συλλέκτη. Η συνδεσμολογία των τρανζίστορ σε ζεύγος Darlington φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



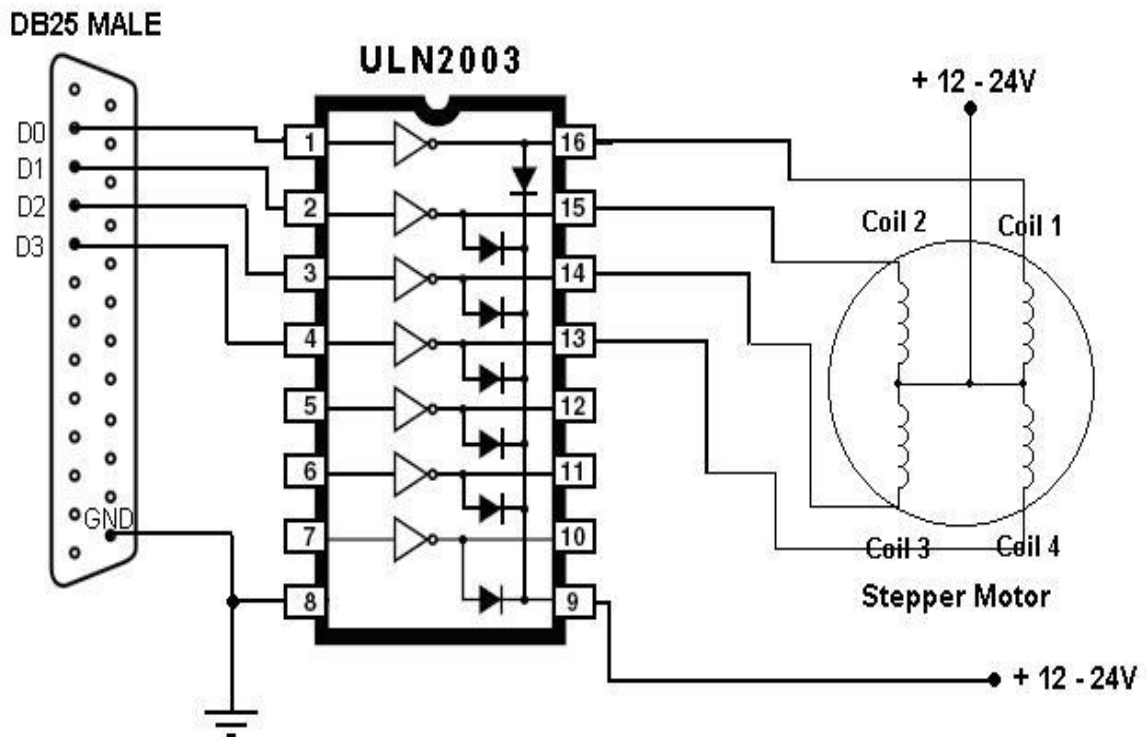
Σχήμα 5.5 Ζεύγος Darlington

Η διαταξη αυτή, εκτός από τη χρήση της ως ενισχυτής DC ρεύματος σε περιπτώσεις προσαρμογής σταθεροποιημένης τάσης μικρής ισχύος σε φορτίο μεγάλης ισχύος που απαιτεί σταθερή τάση και μεγάλο ρεύμα όπως στην οδήγηση του βηματικού κινητήρα, χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που απαιτείται ακόμη μεγαλύτερη αντίσταση εισόδου από αυτή του ενός τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη.

Το μειονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι το ρεύμα διαρροής του πρώτου τρανζίστορ ενισχύεται από το δεύτερο, με αποτέλεσμα το τελικό ρεύμα διαρροής να είναι μεγαλύτερο από αυτό της διάταξης CC (Common Collector - συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη).

# 6 Διάταξη και έλεγχος

## 6.1 Περιγραφή διάταξης



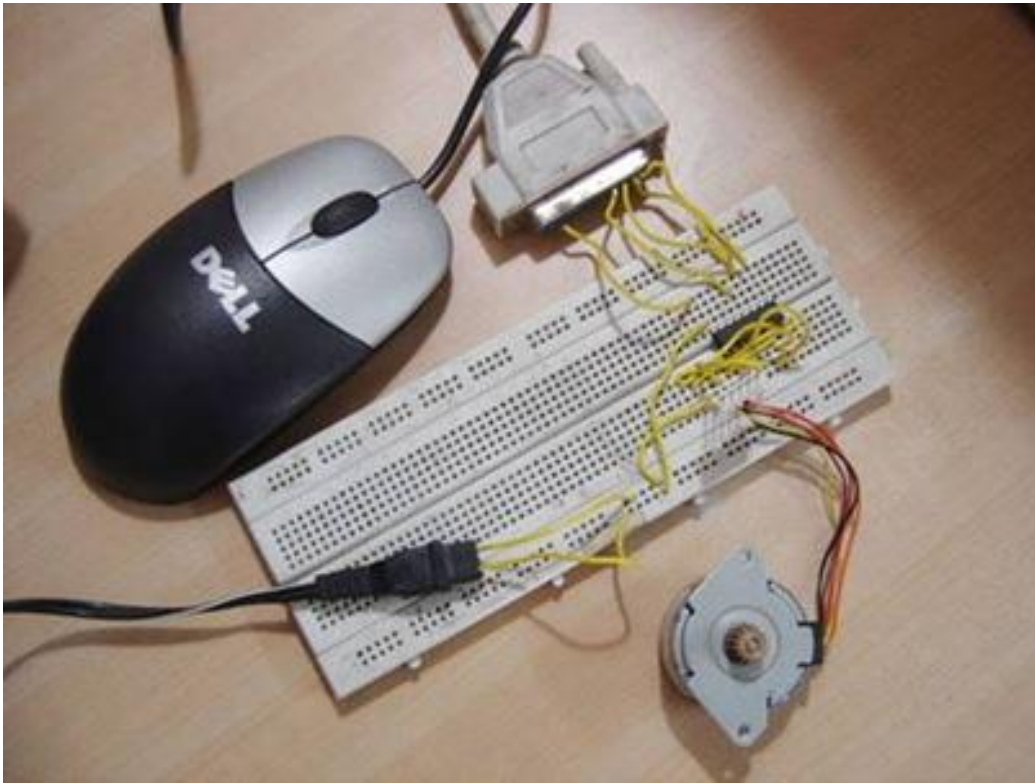
Σχήμα 6.1 Διάγραμμα

Όπως φαίνεται και στο σχεδιάγραμμα:

- Η ακίδα D0 (Pin 2) της παράλληλης θύρας συνδέεται στο ποδαράκι 1 (Pin 1) του ολοκληρωμένου ULN2003.
- Η ακίδα D2 (Pin 4) συνδέεται στο ποδαράκι 3 (Pin 3).
- Η ακίδα D3 (Pin 5) συνδέεται στο ποδαράκι 4 (Pin 4).



Τα καλώδια των βηματικών κινητήρων ακολουθούν κάποιο χρωματικό κώδικα. Για να εντοπίσουμε ποιο καλώδιο αντιστοιχεί σε κάθε πηνίο μπορούμε να ψάξουμε στο διαδίκτυο για τα χαρακτηριστικά του κινητήρα. Αν δεν κατορθώσουμε να βρούμε πληροφορίες, τότε θα χρησιμοποιήσουμε ένα πολύμετρο για να εντοπίσουμε τα καλώδια.



Σχήμα 6.2 Συνδέσεις σε πλακέτα δοκιμών

## 6.2 Νεότερες εκδόσεις του περιβάλλοντος Windows

Κάτω από το περιβάλλον του DOS και των Windows 3.1 ήταν σχετικά εύκολος ο έλεγχος του υλικού μέρους (hardware) του υπολογιστή, με τη βοήθεια κάποιων γλωσσών προγραμματισμού υψηλού επιπέδου, όπως η BASIC ή η PASCAL. Τότε, εκείνο που χρειαζόνταν μόνο ήταν η συνάρτηση IN/OUT της BASIC ή η αντίστοιχη συνάρτηση PORT της PASCAL.

Σε νεότερες εκδόσεις του γραφικού περιβάλλοντος Windows (από την έκδοση των Windows 95 και μετά), ο χρήστης απομονώνεται ολοένα και περισσότερο το υλικό (hardware), ενώ δεν είναι πλέον εφικτή (και μάλιστα απαγορευμένη στα Windows 95) η άμεση επικοινωνία με τους διάφορους καταχωρητές και τις θέσεις μνήμης. Το είδος αυτό του μικρού “διαλόγου” εξαρτάται αποκλειστικά από το περιβάλλον του λειτουργικού συστήματος σε συνεργασία με διάφορα προγράμματα οδηγών (device drivers).

Όπως προαναφέρθηκε, στα λειτουργικά συστήματα όπως στα XP η πρόσβαση στην παράλληλη θύρα είναι εμποδισμένη. Αυτό το πρόβλημα λύνεται με χρήση της βιβλιοθήκης InpOut32.dll, η οποία επιτρέπει τη διαχείριση των σημάτων της παράλληλης θύρας, κάνοντας τα Windows 98, Windows NT/2000/XP να "ξεχάσουν" τις απαγορεύσεις που επιβάλλουν σε όποιον επιχειρεί να προσπελάσει άμεσα το υλικό του υπολογιστή. Ο οποιοσδήποτε μπορεί να την καταβάσει από τη διεύθυνση <http://logix4u.net>. Αυτή η ελεύθερη βιβλιοθήκη έγινε γρήγορα ο τυποποιημένος τρόπος να προσεγγιστεί η παράλληλη θύρα σε οποιαδήποτε έκδοση των Windows. Το ίδιο πρόγραμμα δουλεύει εξ ίσου καλά και με τα Windows 98 και Me, αλλά αρνείται να συνεργαστεί με τα 95.

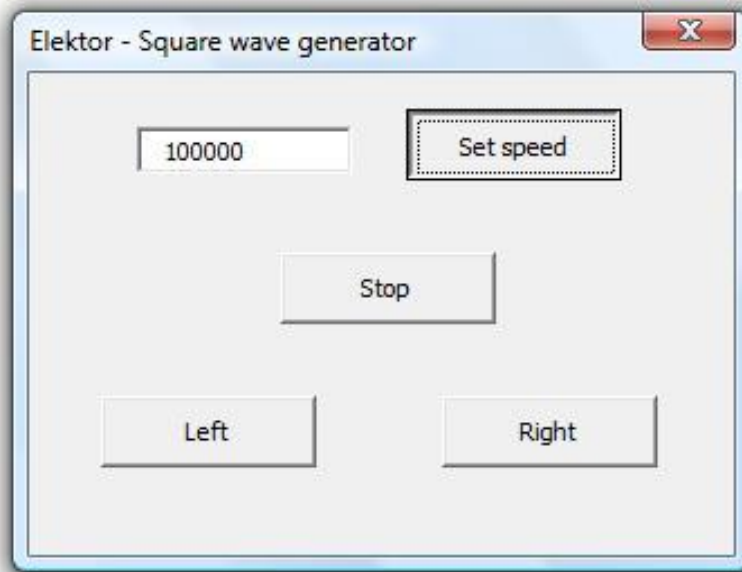
Για τη χρησιμοποίηση της βιβλιοθήκης inpout32.dll με τον κώδικά μας, πρέπει να τοποθετήσουμε το dll αρχείο στο φάκελλο \windows\system32 του υπολογιστή. Έτσι τον έλεγχο του κινητήρα αναλαμβάνει ένα απλό πρόγραμμα γραμμένο σε Visual Basic. Η γλώσσα αυτή φιλοξενείται, σε μια απλή μορφή της, στο πακέτο εφαρμογών γραφείου Office της Microsoft. Το πρόγραμμα που ελέγχει τον κινητήρα είναι στην πραγματικότητα μια μακροεντολή κατάλληλη να τρέχει μέσα από τον επεξεργαστή κειμένου Word.

Εδώ ξεκινούμε με τις απαραίτητες δηλώσεις, για να ακολουθήσουν η ρουτίνα καθυστέρησης, η συνάρτηση που εμφανίζει το παράθυρο μακροεντολής ελαχιστοποιώντας προσωρινά το Word και, τέλος μια ακόμα συνάρτηση που αλλάζει την κατάσταση των ακίδων εξόδου σύμφωνα με μια προκαθορισμένη σειρά. Προτού το ανοίξουμε, ακυρώνουμε την προστασία από μακροεντολές που είναι εξ ορισμού ενεργοποιημένες μέσα από το περιβάλλον του Word. Για να το καταφέρουμε, αρκεί ένα κλικ στα Εργαλεία/Μακροεντολή/Ασφάλεια και να τσεκάρουμε στο παράθυρο που ανοίγει την 'μεσαία' ή την 'χαμηλή' προστασία. Αν μετά από αυτήν την κίνηση ανοίξουμε το παραπάνω έγγραφο και απαντήσουμε καταφατικά στο ερώτημα για το άνοιγμα της μακροεντολής που περιέχει, θα δούμε να εμφανίζεται το σχετικό παράθυρο του προγράμματος. Μέσα από αυτό θα μπορούσατε να ελέγξετε τον κινητήρα. Μόλις το κλείσουμε, θα εμφανιστεί και πάλι το γνώριμο περιβάλλον του Word.

Μπορούμε τώρα να ανοίξουμε τον κειμενογράφο της Visual Basic πιέζοντας απλώς το F11. Στο δεξί του μέρος θα δούμε ένα μικρό παράθυρο με το όνομα Project (Square\_wave\_gen). Κάτω από αυτό το όνομα εμφανίζονται αρκετοί φάκελοι με το έγγραφο που περιέχει την μακροεντολή, τον κώδικα μαζί με την περιγραφή της φόρμας ελέγχου του κινητήρα, ένα τμήμα με το πραγματικό πρόγραμμα και ενδεχόμενες αναφορές και παραπομπές σε άλλα αρχεία.

### 6.3 Λειτουργία μακροεντολής

Ο κώδικας της Visual Basic είναι "κρυμμένος" μέσα στο έγγραφο του Word και εκτελείται αυτόματα μόλις ο χρήστης ανοίξει το έγγραφο. Στο παράθυρο που ανοίγει, θα πρέπει να εισάγουμε έναν αριθμό που καθορίζει τη συχνότητα των σημάτων στη παράλληλη θύρα (αρχική ρύθμιση: 10000). Τα αποτελέσματα που επιφέρει αυτός ο αριθμός εξαρτώνται από την υπολογιστική ισχύ ή καλύτερα τη συχνότητα χρονισμού του επεξεργαστή. Το ίδιο καθοριστικό ρόλο στη συχνότητα των παραγόμενων σημάτων παίζουν και τα υπόλοιπα προγράμματα που τρέχουν ταυτόχρονα με το Word και κουράζουν τον μικροεπεξεργαστή. Για να βρούμε τον αριθμό που ταιριάζει περισσότερο στο δικό μας υπολογιστή θα χρειαστεί να κάνουμε μια σειρά δοκιμών.



Σχήμα 6.3 Γραφικό περιβάλλον ελέγχου βηματικού κινητήρα με Visual Basic

Η μακροεντολή που είναι αποθηκευμένη μέσα σε ένα συνηθισμένο αρχείο του Word παράγει σήματα στις ακίδες της παράλληλης θύρας επαρκή για τον έλεγχο του κινητήρα. Με το πάτημα του 'Set speed' ο κινητήρας ξεκινά να περιστρέφεται. Η τιμή "10000" μέσα στο λευκό πεδίο καθορίζει τη ταχύτητα περιστροφής (τη συχνότητα των σημάτων στη παράλληλη θύρα). Επιλέγοντας το 'Left' ή 'Right' καθορίζουμε τη φορά περιστροφής. Τέλος με το 'Stop' ο κινητήρας σταματά.

# 7 Επίλογος

## 7.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είχε σκοπό την παρουσίαση του ελέγχου ενός βηματικού κινητήρα μέσω υπολογιστή.

Συμπερασματικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο βηματικός κινητήρας έχει ένα ευρύ πεδίο για πειραματισμούς για εκπαιδευτικό σκοπό συνδιάζοντας τόσο θέματα ηλεκτρικής ισχύος όσο και προγραμματισμού.

Όλα αυτά μπορούμε να τα επιτύχουμε με ελάχιστο κόστος χάρη σε εργαλεία που χρησιμοποιούμε καθημερινά όπως ο ηλεκτρονικός υπολογιστής.

## Βιβλιογραφία

- [1] Μαρία Γ. Ιωαννίδου, ‘Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών’, ΕΜΠ, Αθήνα 2003
- [2] T. Kenjo, A. Sugawara, “Stepping Motors and their Microprocessor controls”, Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford 1994
- [3] Στέφανος Ν. Μανιάς, ‘Ηλεκτρονικά Ισχύος’, Εκδόσεις Συμεών 2000
- [4] Stephen J. Charman, ‘Ηλεκτρικές Μηχανές DC-AC’, Εκδόσεις Τζιόλα 2003
- [5] Σημειώσεις μαθήματος Ηλεκτρικής Κίνησης
- [6] Σημειώσεις μαθήματος Ηλεκτρικών Μηχανών

## Αναφορές διαδικτύου

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Stepper\\_motors](http://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motors)
- [2] <http://www.doc.ic.ac.uk/~ih/doc/stepper/>
- [3] <http://www.automotsys.com.au>
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/Darlington\\_transistor](http://en.wikipedia.org/wiki/Darlington_transistor)
- [5] <http://www.luberth.com/cstep/steppers.htm>
- [6] <http://channel9.msdn.com/coding4fun/articles/Computer-Controlled-Stepper-Motor>
- [7] [http://www.mechatronics.gr/RD/Step\\_MotorsEL.html](http://www.mechatronics.gr/RD/Step_MotorsEL.html)
- [8] [http://www.sapiensman.com/step\\_motor/](http://www.sapiensman.com/step_motor/)