

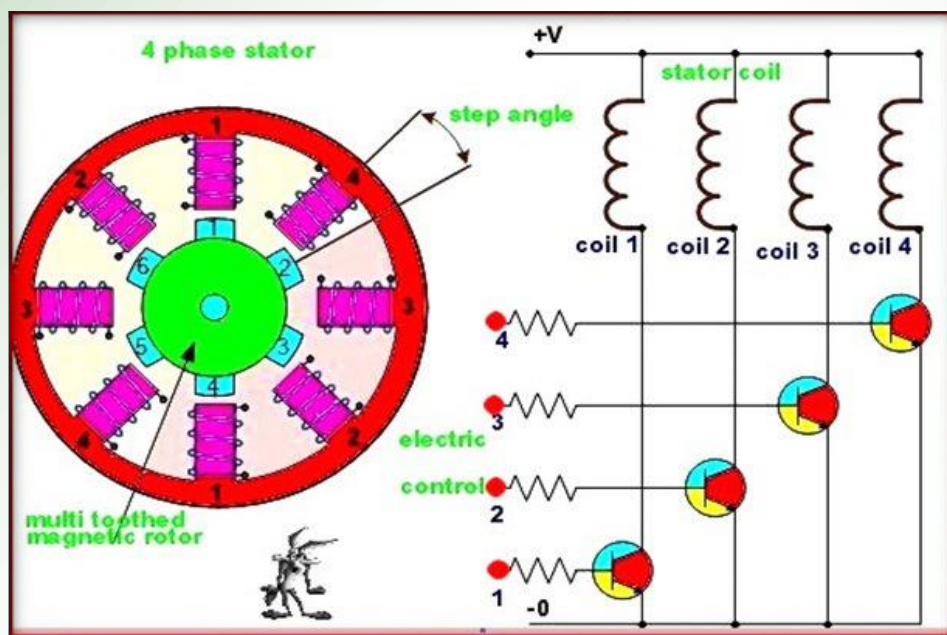
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1461

ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ



ΠΑΝΤΗΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ, ΑΜ:5379

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΜΠΕΛΛΟΥ ΓΕΩΡΓΙΑ

ΠΑΤΡΑ 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή μου Εργασία μετά την ολοκλήρωση του κύκλου σπουδών στ τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Τεχνικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτ. Ελλάδας, και αφορά την μελέτη των Βηματικών Κινητήρων, όσον αφορά την κατασκευή, λειτουργία και τη Μεθοδολογία Ελέγχου τους.

Η εργασία ξεκινάει με αναφορά και περιληπτική παρουσίαση των Ηλεκτρικών Κινητήρων και στη συνέχεια εκτενέστερη παρουσίαση στοιχείων, για τους Βηματικούς Κινητήρες. Ακολουθεί ο σχεδιασμός, η κατασκευή και τέλος η Μεθοδολογία Ελέγχου.

Θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους καθηγητές που είχα όλα αυτά τα χρόνια που σπούδαζα στη σχολή. Για την απεριόριστη υπομονή που είχαν μαζί μου, για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν μέσα από τα μαθήματα που μου δίδασκαν αλλά και έξω από αυτά. Εμπλουτίζοντας, με γνώσεις και εμπειρίες σαν όπλα για την μετέπειτα πορεία μου.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια της Πτυχιακής μου κ. Γεωργία Μπέλλου για την βοήθεια που μου πρόσφερε με τις γνώσεις της πάνω στους Ηλεκτρικούς Κινητήρες, τις σωστές οδηγίες και παρατηρήσεις για την ολοκλήρωση της μελέτης μου πάνω στους Βηματικούς Κινητήρες. Με τρόπο τέτοιο που να αγαπήσω αυτό το αντικείμενο και να θελήσω να εξελιχθώ πάνω σε αυτό τον τομέα.

Ευχαριστώ πολύ.

Παντής Γρηγόριος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στη μελέτη Βηματικών Κινητήρων κυρίως όσον αφορά την κατασκευή, τη λειτουργία και τη μεθοδολογία ελέγχου. Είναι γνωστό ότι σε ένα κινητήριο σύστημα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά του. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος ελέγχου σε μία εφαρμογή είναι αποτέλεσμα της τεχνικής ελέγχου και του είδους του κινητήρα. Διαχρονικά η ανάγκη για κινητήρια συστήματα υψηλής ακρίβειας, σε συνδυασμό με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών και ψηφιακών συστημάτων, οδήγησε στην ανάπτυξη συστημάτων ειδικών ηλεκτρικών κινητήρων.

Η ανάπτυξη του θέματος της εργασίας μου γίνεται σε 4 κεφάλαια.

- Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μία γενική αναφορά στους Ηλεκτρικούς Κινητήρες.
- Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται η βασική μελέτη πάνω στους Βηματικούς Κινητήρες.
- Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται μελέτη σχετικά με τη μεθοδολογία ελέγχου και λειτουργίας των Βηματικών Κινητήρων.
- Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά σε θέματα επιλογής, αναγνώρισης και σύνδεσης των βηματικών κινητήρων

**Αφιερώνεται στους γονείς μου,
ως ελάχιστη ανταπόδοση για την υποστήριξη τους και τους
κόπους τους.**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	8
ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.....	8
1.1 Γενικά.....	8
1.2 Αρχή λειτουργίας.....	9
1.3 Είδη ηλεκτρικών κινητήρων	10
1.4 Γενικά χαρακτηριστικά - Εφαρμογές.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	13
ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.....	13
2.1 Γενικά.....	13
2.2 Κατασκευή.....	14
2.3 Είδη Βηματικών κινητήρων	15
2.3.1 Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη	16
2.3.2 Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης	16
2.3.3 Υβριδικοί Βηματικοί κινητήρες	17
2.4 Αρχή Λειτουργίας.....	18
2.5 Λειτουργία «μισού» βήματος	21
2.6 Χαρακτηριστικές λειτουργίας	24
2.7 Χαρακτηριστικά μεγέθη	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	28
ΕΛΕΓΧΟΣ ΒΗΜΑΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	28
3.1 Γενικά.....	28
3.2 Έλεγχος ανοικτού βρόγχου	29
3.3 Έλεγχος κλειστού βρόγχου.....	29
3.4 Μεθοδολογίες λειτουργίας.....	30
3.4.1 Συνδεσμολογίες τυλιγμάτων.....	31
3.4.2 Οδήγηση R-L.....	32
3.4.3 Μονοπολική οδήγηση	33
3.4.4 Διπολική οδήγηση ή διπλής φάσης	34

3.4.4.1. Παράδειγμα διπολικής οδήγησης διπλής φάσης	35
3.4.4.2 Κώδικας Gray.....	37
3.5 Οδήγηση κατατητού	43
3.6 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	46
ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΗΜΑΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	46
4.1 Γενικά.....	46
4.2 Οδηγός αναγνώρισης βηματικού κινητήρα.....	47
4.2.1 Τύπος κινητήρα	47
4.2.2 Χαρακτηριστικά.....	51
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	54
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	59

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αρχίζοντας την εκπόνηση της μελέτης μου για τους Βηματικούς Κινητήρες, την κατασκευή και την μεθοδολογία ελέγχου που μου ανατέθηκε να εκπληρώσω, ακολούθησα την εξής πορεία.

Ξεκίνησα με την εισαγωγή στους Ηλεκτρικούς Κινητήρες κάνοντας μια γενική αναφορά στους τύπους των Ηλεκτρικών Κινητήρων για να ανακαλύψω και τους Βηματικούς Κινητήρες που θα αναλύσω στην πορεία.

Στην συνέχεια της μελέτης μου ανέλυσα τα βασικά χαρακτηριστικά των τύπων των βηματικών κινητήρων τον έλεγχο και τη μεθοδολογία λειτουργίας/οδήγησης την οποία και ανέλυσα

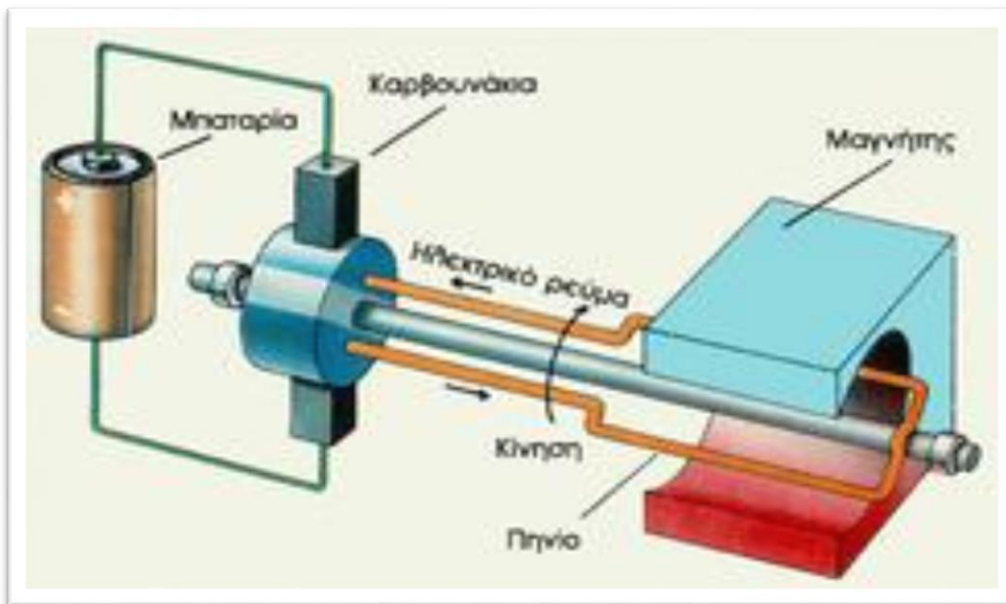
Τελειώνοντας παραθέτω στη μελέτη μου την διαδικασία επιλογής, αναγνώρισης και σύνδεσης των βηματικών κινητήρων σαν συμπέρασμα της εργασίας μου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

1.1 Γενικά

Οι Ηλεκτρικοί κινητήρες (**Ηλεκτροκινητήρες**) είναι μια ηλεκτρομαγνητική διάταξη η οποία τροφοδοτείται στην είσοδό της με ηλεκτρική ενέργεια ($P=VI$, $P=VI\cos\phi$, $P=\sqrt{3}VI\cos\phi$) την οποία μετατρέπει στην έξοδό της με μηχανική (κινητική) ενέργεια ($P=M \omega$).



Εικόνα 1.1: Ηλεκτρικός κινητήρας. Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας ενός ηλεκτρικού κινητήρα.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας, η στοιχειώδης μορφή του οποίου φαίνεται στην εικόνα 1.1, παράγει κίνηση, όταν τυλίγματα διαρρεόμενα από ρεύμα βρεθούν μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Ηλεκτρομαγνήτες ή μόνιμοι μαγνήτες είναι προσαρμοσμένοι συνήθως στο ακίνητο τμήμα (στάτορα) και παράγουν το μαγνητικό πεδίο. Ο ρότορας (οπλισμός) αποτελείται από κατάλληλα συρμάτινα τυλίγματα/πλαίσια. Μέσω ψηκτρών το κάθε τύλιγμα τροφοδοτείται με ρεύμα. Το μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος αλληλεπιδρά με αυτό του στάτορα και ο ρότορας στρέφεται ελαφρά. Επειδή κάθε τύλιγμα τροφοδοτείται με γρήγορη διαδοχή, ο ρότορας περιστρέφεται.

Αρχικά ο στοιχειώδης κινητήρας DC λειτουργεί μόνο με συνεχές ρεύμα από μπαταρία. Έτσι, το ρεύμα διοχετεύεται στο πλαίσιο πηνίο και αυτό περιστρέφεται ανάμεσα στους πόλους ενός μόνιμου μαγνήτη. Το μαγνητικά πεδία του πηνίου και του

μαγνήτη αλληλεπιδρούν και αναγκάζουν το πηνίο να στραφεί. Στην περίπτωση εναλλασσομένου ρεύματος (AC), ένας «εναλλάκτης» αντιστρέφει κατάλληλα τις συνδέσεις στην μπαταρία σε κάθε μισή στροφή και διατηρεί τη φορά περιστροφής του πηνίου σταθερή.

Ο κινητήρας βηματισμού, τον οποίο θα αναλύσουμε παρακάτω, δεν περιστρέφεται συνεχώς αλλά με σταθερό βήμα. Οι μόνιμοι μαγνήτες του ρότορα έλκονται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργούν τα πηνία στο στάτορα, τα οποία ενεργοποιούνται με σταθερή διαδοχή.

Η βασική αυτή θεωρία των ηλεκτρικών κινητήρων παρέμεινε αμετάβλητη εδώ και χρόνια. Αυτό που αλλάζει είναι η βελτίωση στον έλεγχο λειτουργίας σε πολλές εφαρμογές που στηρίζεται κυρίως στην ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος και της θεωρίας του αυτομάτου ελέγχου.

1.2 Αρχή λειτουργίας

Η Αρχή Λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα είναι ο νόμος Laplace η ανάπτυξη δηλαδή δύναμης Laplace κατάλληλης διεύθυνσης που να οδηγεί στην ανάπτυξη ροπής δηλαδή στην περιστροφή του. Είναι γνωστό ότι όταν ένας αγωγός ο οποίος διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο ασκείται πάνω του δύναμη με μέτρο ίσο με:

$$F = I * \lambda * B * \eta \mu \phi$$

Όπου:

- I = Ένταση Ρεύματος
- λ = Μήκος Αγωγού
- B = Μαγνητική επαγωγή του πεδίου
- ϕ = η γωνία που σχηματίζει ο αγωγός με τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών (B).

Το διάνυσμα της δύναμης είναι κάθετο στο επίπεδο που ορίζουν ο ρευματοφόρος αγωγός και το πεδίο και η κατεύθυνση δίνεται με τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού ($I \rightarrow$:αντίχειρας, $B \rightarrow$:δείκτης, $F \rightarrow$:δύναμη)

Η κατάλληλη διαμόρφωση του αγωγού (στοιχειώδες πλαίσιο) έχει σαν αποτέλεσμα την εξάσκηση ζεύγους δυνάμεων πάνω σε αυτό, δηλαδή την ανάπτυξη ροπής και την περιστροφή του.

1.3 Είδη ηλεκτρικών κινητήρων

Αρχικά οι ηλεκτροκινητήρες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC motors- DC) και
- κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC motors - AC), οι οποίοι καλύπτουν και την πλειοψηφία των εφαρμογών, μετά και την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος.

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε **μονοφασικούς** και **πολυφασικούς**. Τόσο οι μονοφασικοί όσο και οι πολυφασικοί κινητήρες διακρίνονται σε σύγχρονους κινητήρες και σε κινητήρες επαγωγής (επαγωγικούς) ή ασύγχρονους. Οι **τριφασικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος** είναι οι περισσότερο εύχρηστοι από τους πολυφασικούς.

Στις προαναφερόμενες γενικές κατηγορίες αντιστοιχούν διάφοροι τύποι κινητήρων που μπορεί να διαφέρουν στην αρχή λειτουργίας, στον τρόπο διέγερσης ακόμη και στη χρήση τους. Βασικές υποκατηγορίες κινητήρων είναι:

➤ **DC κινητήρες:**

- Ξένης διέγερσης.
- Παράλληλης διέγερσης.
- Διέγερσης σειράς.
- Μικτής ή σύνθετης διέγερσης.

➤ **AC κινητήρες:**

- **Τριφασικοί:** Σύγχρονοι, Ασύγχρονοι ή επαγωγικοί.
- **Μονοφασικοί:** Σύγχρονοι, Ασύγχρονοι ή επαγωγικοί

➤ **Ειδικοί κινητήρες π.χ.**

- **Βηματικοί κινητήρες**
- **Σερβοκινητήρες**

Όλοι οι παραπάνω κινητήρες είναι ηλεκτρομαγνητικοί κινητήρες. Επιπλέον κατηγορίες κινητήρων αποτελούν κινητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα ρομποτικής:

- Πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες
- Ηλεκτροστατικοί κινητήρες

1.4 Γενικά χαρακτηριστικά - Εφαρμογές

Στις μέρες μας, η χρήση των ηλεκτροκινητήρων είναι ευρύτατα διαδεδομένη από τους ηλεκτρικούς σιδηρόδρομους τα μαγνητόφωνα και τα ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς, τραίνα, τρόλεϋ, κ.λπ. μέχρι και τα υποβρύχια. Οι ηλεκτροκινητήρες καλύπτουν μια τεράστια σειρά εφαρμογών από τα μηχανήματα οικιακής χρήσης μέχρι τις μεγαλύτερες και πολυπλοκότερες βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Πιο αναλυτικά οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), καλύπτουν το μεγαλύτερο όγκο εφαρμογών στη βιομηχανία. Ιδίως μετά την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος, που προσφέρουν αξιόπιστο και ακριβή έλεγχο λειτουργίας. Το πλεονέκτημα τους, σε σχέση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι ότι μπορούν να προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη ισχύ για το ίδιο μέγεθος κινητήρα. Επίσης ο βαθμός απόδοσης τους είναι αρκετά μεγάλος και η οικονομικότητά τους ως προς την κατανάλωση ρεύματος ικανοποιητική, με αποτέλεσμα να επιλέγονται για εφαρμογές όπου έχουμε μηχανήματα πολύ μεγάλης ισχύος που εργάζονται στο βιομηχανικό πεδίο σε συνεχή βάση. Ορισμένα παραδείγματα αποτελούν οι αντλίες και οι συμπιεστές με πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις τα πολύ μεγάλα φυγοκεντρικά μηχανήματα (είτε αντλίες είτε συμπιεστές) η ισχύς των οποίων μπορεί να είναι της τάξης μέχρι και ενός (η περισσότερων) MW. Ωστόσο και τα βιομηχανικά μηχανήματα μικρής ισχύος και όχι ειδικών απαιτήσεων στην πλειοψηφία τους ενεργοποιούνται από ηλεκτροκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.

Σε βιομηχανικές εφαρμογές οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος λόγω του ότι διαθέτουν μεγάλη ευκολία στον έλεγχο της ταχύτητας του άξονά τους προσφέρουν σημαντική ευκολία στον αξιόπιστο έλεγχο των κινήσεων. Ένα ακόμη πλεονέκτημα σε σχέση με τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι, ότι για δεδομένη ισχύ έχουν τη δυνατότητα να αναπτύσσουν σημαντικά μεγαλύτερη μηχανική ροπή στο άξονα τους με αποτέλεσμα να είναι οι πλέον κατάλληλοι για τον έλεγχο των κινήσεων σε βιομηχανικούς μηχανισμούς, στους οποίους χρειάζεται να διαχειριστούν σημαντικά μηχανικά φορτία.

Επιπλέον πρέπει να προσθέσουμε:

- ✓ Οι **κινητήρες παράλληλης διέγερσης** ότι χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές που έχουμε σταθερή ταχύτητα κινητήρα.
- ✓ Οι **κινητήρες διέγερσης εν σειρά** χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή μηχανική ροπή εκκίνησης(γερανοί, αναβατόρια).
- ✓ Οι **κινητήρες σύνθετης διέγερσης** προσφέρουν τη μεγαλύτερη ευελιξία που είναι χρήσιμη για τις εφαρμογές ελέγχου κίνησης γιατί δίνει τη δυνατότητα με κατάλληλο σχεδιασμό να προσαρμόζεται η καμπύλη ταχύτητας -

ροπής στις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε φορτίου λειτουργίας.

Τέλος, οι βηματικοί ηλεκτρικοί κινητήρες βρίσκουν εφαρμογή σε τομείς όπως:

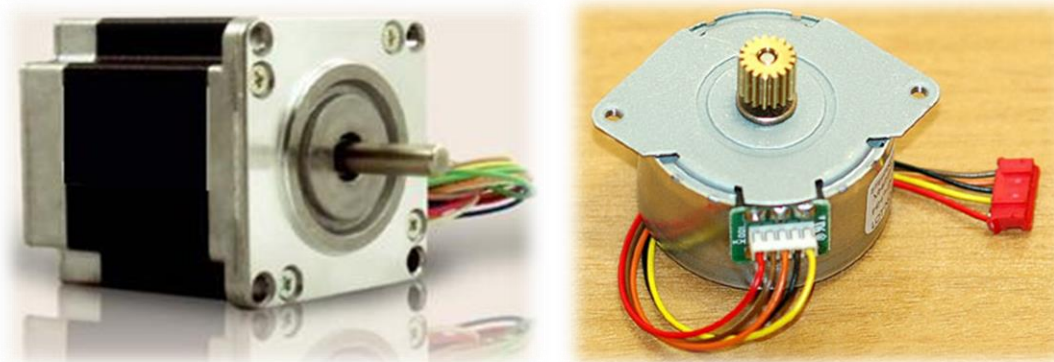
- Μηχανισμοί ελέγχου θέσης της κεφαλής σε εκτυπωτές και σε σχεδιογράφους
- Μονάδες ανάγνωσης (οπτικοί δίσκοι)
- Συστήματα αριθμητικού ελέγχου (CNC)
- Ρομπότ
- Φωτοτυπικά μηχανήματα
- Fax
- Δορυφόροι
- Διαστημικά οχήματα
- Ιατρικά όργανα
- Μηχανές συσκευασίας τροφίμων
- Συστήματα αυτόματης βαφής
- Ρολόγια
- Κάμερες
- Χρονοδιακόπτες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

2.1 Γενικά

Ο **Βηματικός κινητήρας** ή **κινητήρας σταδιακών βημάτων** (stepping motor), είναι ένας κινητήρας επαγωγής, ο οποίος τροφοδοτείται από ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα, χρησιμοποιεί δηλαδή ηλεκτρονικούς παλμούς για την κίνησή του. Είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή, η οποία όταν ενεργοποιείται ηλεκτρικά, περιστρέφεται με διακριτή κίνηση βημάτων κατά μία ιδιαίτερη γωνία κάθε φορά (γωνία βημάτων). Αφού ο άξονας περιστραφεί κατά ένα βήμα, σταματά μέχρι να πάρει την επόμενη εντολή οδήγησης.

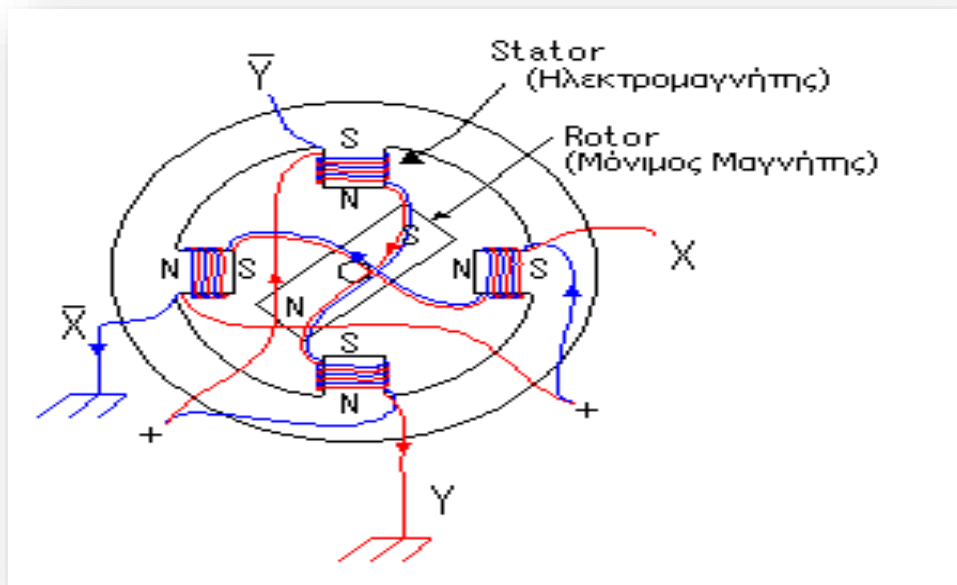


Εικόνα 2.1. Μορφή Βηματικών κινητήρων.

Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η γωνία βημάτων είναι ανάλογη προς τον αριθμό δοντιών του στροφέα (δρομέα). Οι Βηματικοί κινητήρες σε σύγκριση με άλλους τύπους μηχανών, έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να περιστραφούν μέσω των ελεγχόμενων γωνιών της περιστροφής (=βήματα), με μεταβολή των παλμών εντολής από ένα κύκλωμα «οδηγό». Όταν έχει εφαρμοστεί ένας ορισμένος αριθμός παλμών, ο άξονας θα έχει περιστραφεί κατά μία ορισμένη γωνία.

Ετσι ένας βηματικός κινητήρας εκθέτει τις άριστες λειτουργικές ιδιότητες όπως είναι: η γρήγορη έναρξη και παύση, και γενικά η ακριβής οδήγηση δηλαδή η ελέγξιμη ταχύτητα ή θέση, σαν απάντηση στους παλμούς βημάτων εισαγωγής που εφαρμόζονται συνήθως από ένα κατάλληλο κύκλωμα ελέγχου.

Μία γενική παράσταση της δομής και λειτουργίας ενός βηματικού κινητήρα φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί η οποία θα αναλυθεί στη συνέχεια.



Εικόνα 2.2: Γενική Παράσταση Βηματικού Κινητήρα

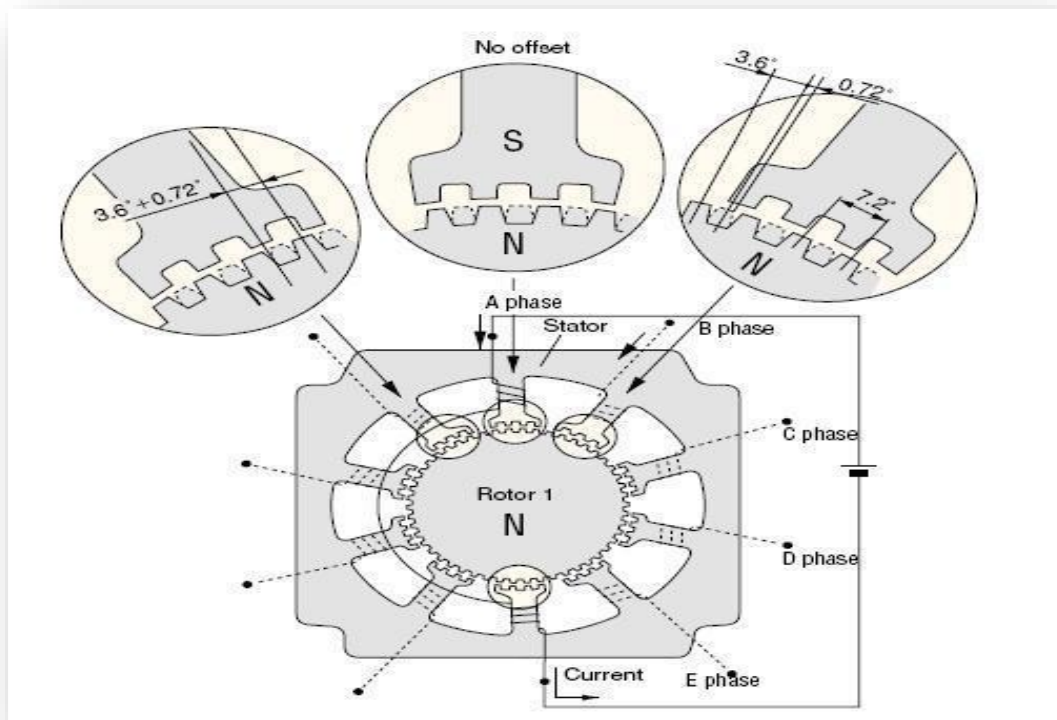
2.2 Κατασκευή

Η κατασκευή των Βηματικών κινητήρων είναι απλή. Ο στάτης είναι το μόνο τμήμα της μηχανής που φέρει τυλίγματα τα οποία περιελίσσονται στον πυρήνα των πόλων οι οποίοι είναι σε ζεύγη και προεξέχουν (έκτυποι). Σε κάθε ζεύγος τα τυλίγματα του κάθε πόλου είναι σε σειρά και περιελιγμένα κατά τρόπο έτσι ώστε το ένα να δρα σαν βόρειος και το άλλο σαν νότιος πόλος.

Ο ρότορας είναι είτε ένας μόνιμος μαγνήτης είτε, στην περίπτωση των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης, ένας οδοντωτός κύλινδρος μαλακού μαγνητικού υλικού όπως φαίνεται και στο σχέδιο της λεπτομέρειας στην εικόνα 2.3. που ακολουθεί..

Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι ο βηματικός κινητήρας είναι παρόμοιος με έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμων μαγνητών.

Το μαγνητικό υλικό του πυρήνα του στάτη και του δρομέα είναι σε φύλλα ή και ενιαίο, από μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό. Τα μαγνητικά αυτά υλικά πρέπει να παρουσιάζουν υψηλή μαγνητική διαπερατότητα ώστε να δημιουργούν υψηλή μαγνητική ροή, ακόμα κι αν εφαρμόζεται μια χαμηλή ηλεκτρική τάση. Σε πολλές περιπτώσεις ο πυρήνας του στάτη και ο πυρήνας του δρομέα αποτελούνται από ελάσματα συνήθως κράματος χάλυβα με πυρίτιο



Εικόνα 2.3: Παράσταση με λεπτομέρειες βηματικού κινητήρα

2.3 Είδη Βηματικών κινητήρων

Η κατασκευή του στάτη σε όλα τα είδη των βηματικών κινητήρων είναι κοινή. Ο στάτης αποτελείται από μια συστοιχία ατσάλινων ελασμάτων (συνήθως κράμα χάλυβα με πυρίτιο) με προεξέχοντα τμήματα στα οποία είναι ισομερώς κατανομημένα τα πεδία των πόλων, συνήθως δύο, τριών ή τεσσάρων ζευγών πόλων. Σε κάθε ζεύγος ο ένας πόλος δρα σαν βόρειος και το άλλο σαν νότιος πόλος

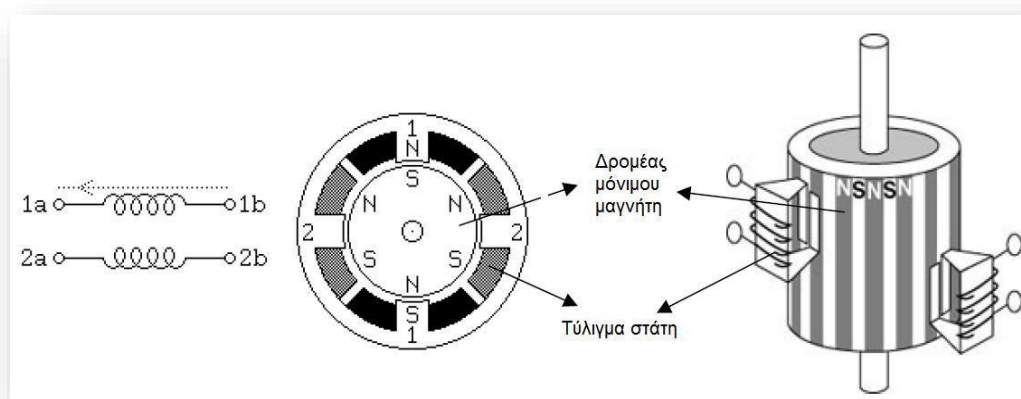
Ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα, διακρίνουμε τα παρακάτω είδη των Βηματικών κινητήρων :

- 1) **Βηματικός κινητήρας μονίμου μαγνήτη** – permanent magnet stepping motor (PM).
- 2) **Βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης** – variable reluctance stepper motor (VR).
- 3) **Υβριδικός βηματικός κινητήρας** – hybrid stepping motor (HB).

2.3.1 Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη

Οι Βηματικοί κινητήρες που στο δρομέα φέρουν ένα μόνιμο μαγνήτη καλούνται Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.

Ο ρότορας είναι ένας συμπαγής κύλινδρος με «τμήματα» μόνιμων μαγνητών σε εναλλαγή, δηλαδή μία συστοιχία συνήθως δύο, τεσσάρων, έξι ή οκτώ πόλων με εναλλαγή (βόρειος-νότιος). Έτσι η περιστροφή του ρότορα επιτυγχάνεται με την εναλλαγή του ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη αλλάζοντας δηλαδή τη φορά του μαγνητικού πεδίου. Ο ρότορας περιστρέφεται σε συγχρονισμό με τη συχνότητα εναλλαγής των παλμών, δηλαδή ελέγχοντας το μαγνητικό πεδίο το οποίο σχηματίζεται στα τυλίγματα του στάτη.



Εικόνα 2.4.: Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη

Η κατασκευή βέβαια τέτοιου είδους κινητήρα καταλήγει συνήθως σε μεγάλες γωνίες βηματισμού-κίνησης. Πρέπει να αναφέρουμε ότι ο βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη είναι ένας κινητήρας χαμηλής ροπής, χαμηλής ταχύτητας και φυσικά χαμηλού κόστους ο οποίος βρίσκει εφαρμογή σε διάφορα πεδία, για παράδειγμα στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Για τους παραπάνω λόγους, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη αποτελούν μια ιδανική επιλογή για τις μη βιομηχανικές εφαρμογές. Είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενοι σε εκτυπωτές και γενικά σε μηχανές γραφείου.

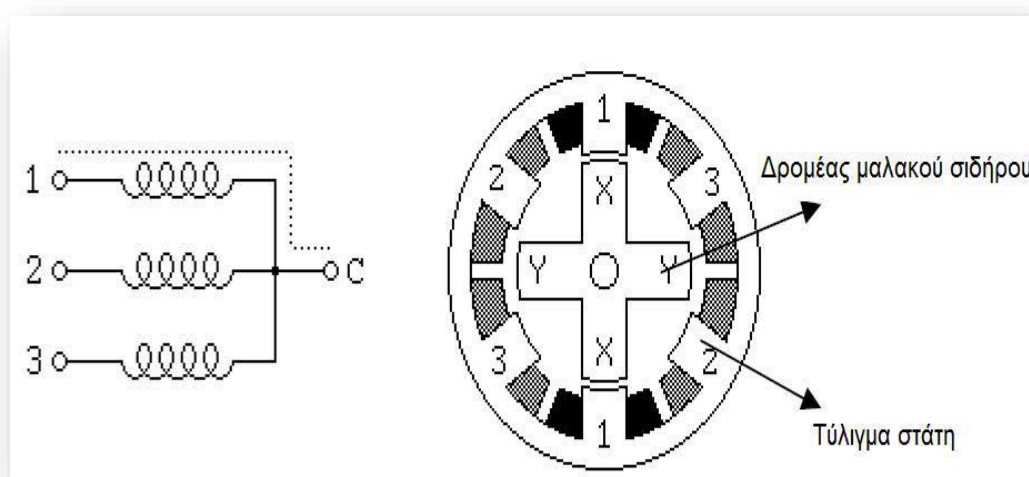
2.3.2 Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης

Είναι οι πλέον διαδεδομένοι και τους συναντάμε στις περισσότερες εφαρμογές.

Οι Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης κατασκευάζονται με ένα «τμήμα» δρομέα ή με πολλαπλά τμήματα δρομέα προσαρμοσμένα στην ίδια άτρακτο με τον βόρειο και το νότιο πόλο να εναλλάσσονται, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται και στο σχέδιο 2.5. που ακολουθεί. Με την αύξηση των τμημάτων επιτυγχάνεται η βελτίωση της αποδιδόμενης ροπής, η υψηλή συχνότητα παλμών και το μικρό ή μεσαίο γωνιακό βήμα.

Τα υλικά του δρομέα και του στάτη πρέπει να παρουσιάζουν υψηλή διαπερατότητα ώστε να δημιουργούν υψηλή μαγνητική ροή, ακόμα κι αν εφαρμόζεται μια χαμηλή ηλεκτρική τάση. Συχνά ο δρομέας είναι μη ελασματοποιημένος.

Ο δρομέας αναγκάζεται να περιστραφεί από τη διέγερση του τυλίγματος του κατάλληλου έκτυπου πόλου του στάτη έτσι ώστε κάποιο ζεύγος πόλων να ευθυγραμμιστεί με τους έκτυπους πόλους του ενεργοποιημένου τυλίγματος. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της μαγνητικής αντίστασης στη διαδρομή της μαγνητικής ροής.

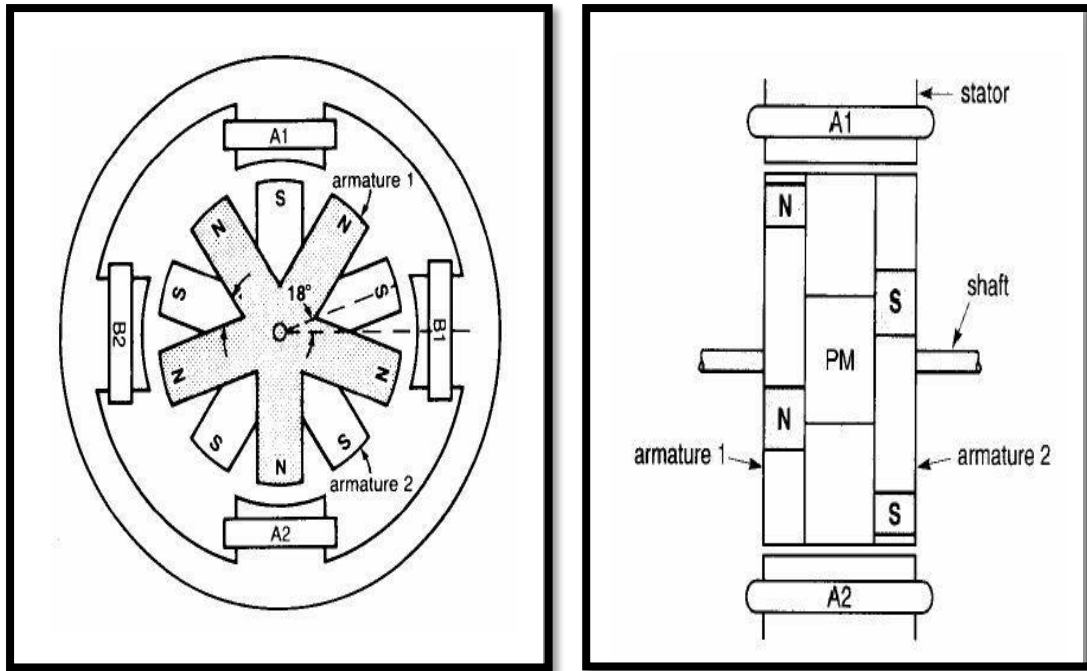


Εικόνα 2.5.: Βηματικός κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης

2.3.3 Υβριδικοί Βηματικοί κινητήρες

Οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες συνδυάζουν τα κύρια χαρακτηριστικά των προαναφερομένων κινητήρων.

Ο δρομέας αποτελείται, όπως και στους Βηματικούς κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, από μόνιμους μαγνήτες σε μορφή κυλίνδρου. Στα άκρα των μαγνητών, προσαρμόζονται τμήματα με μορφή οδοντωτών τροχών. Λόγω του ενδιάμεσου μαγνήτη αυτά μετατρέπονται σε βόρειο και σε νότιο πόλο εναλλάξ.



Εικόνα 2.6.: Υβριδικός Βηματικός κινητήρας.

2.4 Αρχή Λειτουργίας

Η χαρακτηριστική συμπεριφορά ενός βηματικού κινητήρα βρίσκεται στην «βηματική» περιστροφή του άξονα του. Ένα γωνιακό βήμα εκτελείται κάθε φορά που μία εντολή εκτελείται, δηλαδή εφαρμόζεται ένας παλμός στο στάτη. Η κατασκευή του βηματικού κινητήρα δηλαδή ο αριθμός των πόλων, ορίζει τον ακριβή αριθμό των γωνιακών βημάτων που απαιτούνται για μια πλήρη στροφή του άξονα. Έτσι προκύπτει η χρήση του σε εφαρμογές κίνησης στην περιοχή των συστημάτων αυτόματου ελέγχου.

Η λειτουργία των Βηματικών κινητήρων στηρίζεται στην βασική αρχή του μαγνητισμού: ομώνυμοι μαγνητικοί πόλοι απωθούνται ενώ ετερόνυμοι μαγνητικοί πόλοι έλκονται. Όπως φαίνεται και στην βασική αναπαράσταση στην εικόνα 2.7. που ακολουθεί, ο στάτης είναι οι δύο ηλεκτρομαγνήτες A1 και A2 ενώ ο δρομέας είναι ένας μόνιμος μαγνήτης δηλαδή έχει καθορισμένη και σταθερή φορά μαγνητικού πεδίου.

Όταν η πολικότητα του ρεύματος που διαρρέει το τύλιγμα του στάτη είναι τέτοια ώστε ο πόλος A1 να είναι Βόρειος πόλος και ο πόλος A2 να είναι Νότιος, δηλαδή η φορά του μαγνητικού πεδίου να είναι B_{A1A2} τότε, ο δρομέας υφίσταται την επίδραση ροπής και περιστρέφεται από μια τυχαία θέση προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά (ανάλογα με τη θέση του βορείου και νοτίου πόλου στον οπλισμό) μέχρι να βρει την κατάσταση ισορροπίας

δηλαδή την ευθυγράμμιση των μαγνητικών πεδίων στάτη και δρομέα (βήμα λειτουργίας-γωνία περιστροφής).

A1

A2



Εικόνα 2.7. Λειτουργική αναπαράσταση βηματικού κινητήρα

Γίνεται φανερό ότι η διάταξη των πηνίων του στάτη (αριθμός φάσεων) και ο αριθμός των δοντιών του δρομέα θα καθορίσουν τη γωνία περιστροφής (γ) που αντιστοιχεί σε κάθε βήμα λειτουργίας.

$$\gamma = (2\pi / (p \cdot N)) \text{ σε ακτίνια}$$

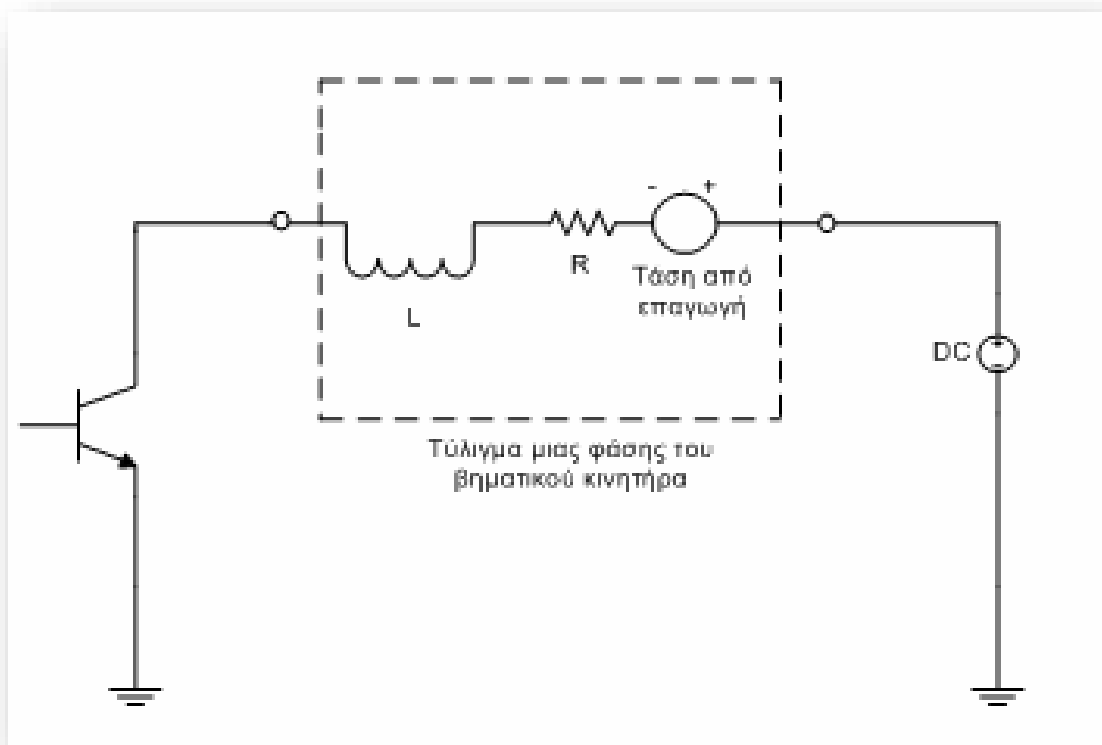
όπου p = αριθμός δοντιών ρότορα

N = αριθμός φάσεων του στάτη

Οι βηματικοί κινητήρες είναι ικανοί να χειριστούν γωνία βήματος από 90° έως και $0,72^\circ$. Η φορά περιστροφής εξαρτάται από την πολικότητα της παλμοδότησης των τυλιγμάτων του στάτη.

Η λειτουργία βέβαια του βηματικού κινητήρα δηλαδή η ταχύτητά του εξαρτάται από την διαμόρφωση των παλμών της πηγής που τον τροφοδοτεί. Οι παλμοί 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 ισοδύναμο κύκλωμα ενός βηματικού κινητήρα φαίνεται στην εικόνα 2.8. Το ισοδύναμο κύκλωμα της κάθε φάσης του στάτη είναι ένα πηνίο σε σειρά με μια αντίσταση. Κατά τη λειτουργία του κινητήρα εμφανίζεται τάση από επαγωγή (ΑΗΕΔ) στο τύλιγμα που επάγεται λόγω της περιστροφής του δρομέα.

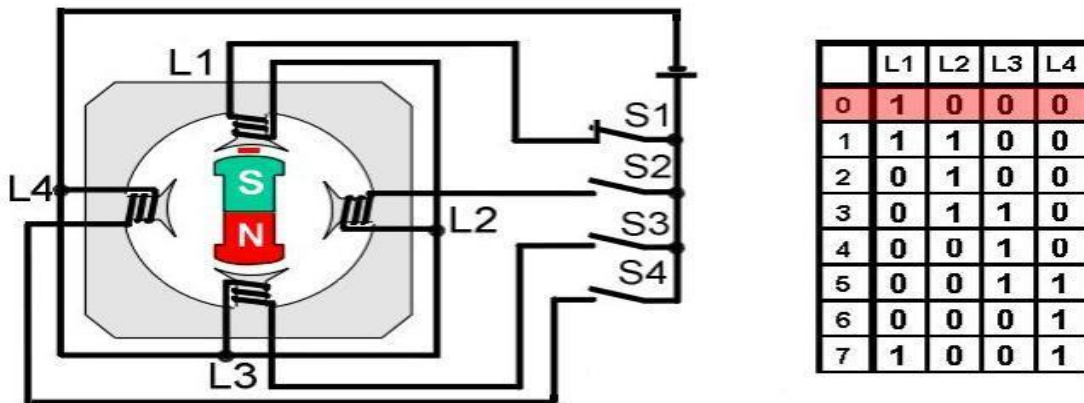


Εικόνα 2.8.: Το ισοδύναμο κύκλωμα μίας φάσης του βηματικού κινητήρα.

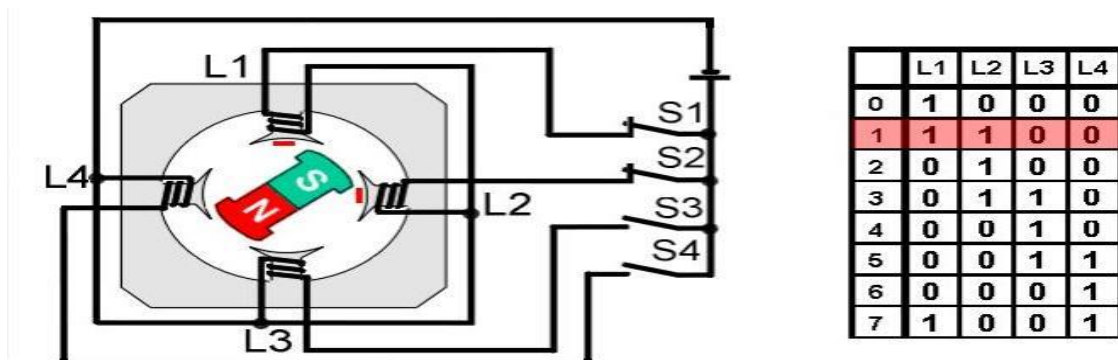
2.5 Λειτουργία «μισού» βήματος

Η επικρατέστερη χρήση του βηματικού κινητήρα είναι η μετατροπή της ψηφιακής εισόδου σε μηχανική κίνηση. Όταν ένα ψηφιακό σήμα παλμού εισάγεται στο βηματικό κινητήρα, ο στρόφας του περιστρέφεται κατά μια σταθερή γωνία, δηλαδή μια γνωστή βηματική γωνία ή γωνία βήματος. Η δυνατότητα ενδιάμεσου βηματισμού, πχ. μισού βήματος είναι σημαντική λειτουργική ικανότητα ενός βηματικού κινητήρα ιδίως στον ψηφιακό τομέα. Στην αλληλουχία σχημάτων που ακολουθεί, βλέπουμε μία καλύτερη αναπαράσταση της περιστροφής του δρομέα ενός μονοπολικού βηματικού κινητήρα με βηματισμό μισού βήματος. Η λειτουργία αυτή σημαίνει ότι ενεργοποιούνται δύο ηλεκτρομαγνήτες ταυτόχρονα για να πετύχουμε τα ενδιάμεσα βήματα.

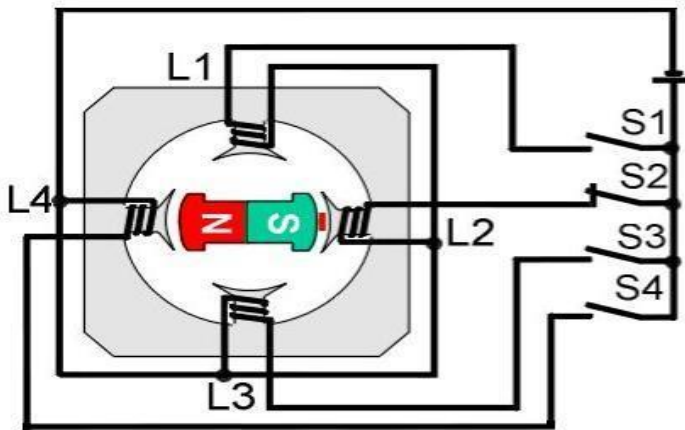
Εναρξη



1° βήμα

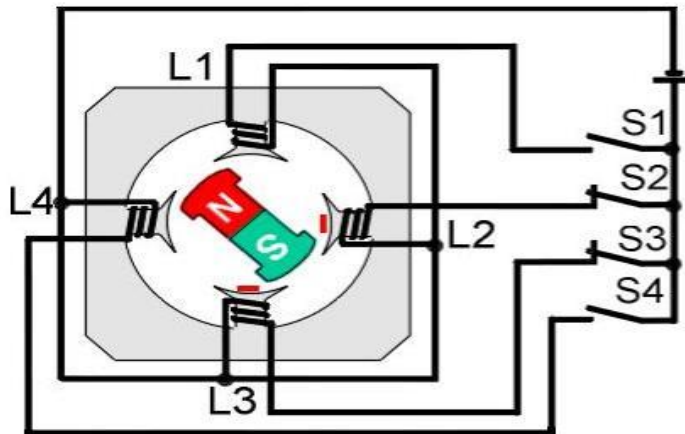


2° βήμα



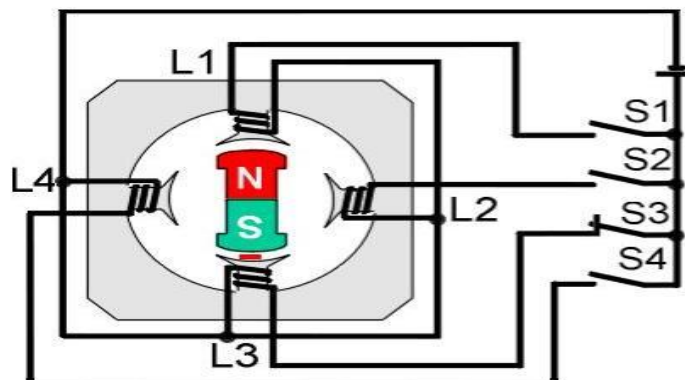
	L1	L2	L3	L4
0	1	0	0	0
1	1	1	0	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	0
5	0	0	1	1
6	0	0	0	1
7	1	0	0	1

3° βήμα



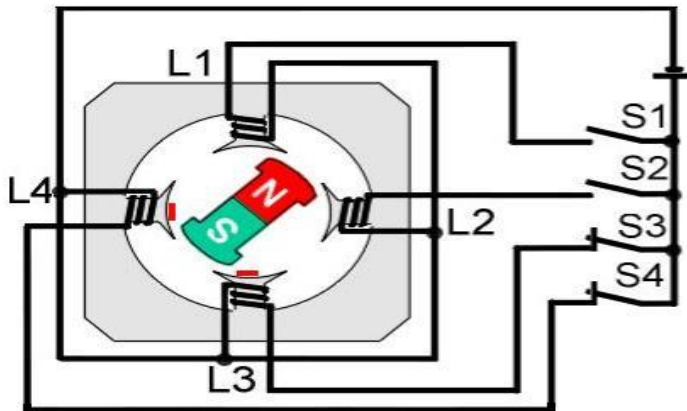
	L1	L2	L3	L4
0	1	0	0	0
1	1	1	0	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	0
5	0	0	1	1
6	0	0	0	1
7	1	0	0	1

4° βήμα



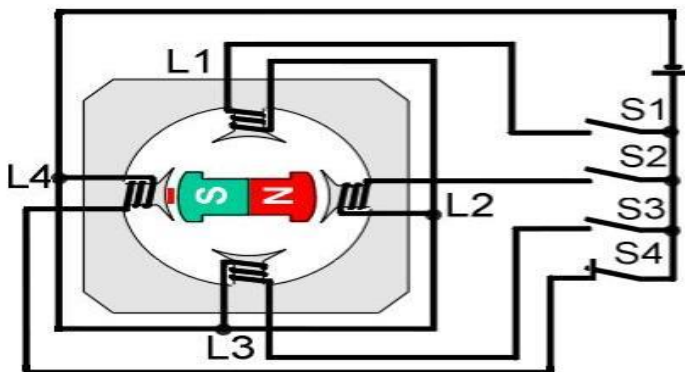
	L1	L2	L3	L4
0	1	0	0	0
1	1	1	0	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	0
5	0	0	1	1
6	0	0	0	1
7	1	0	0	1

5° βήμα



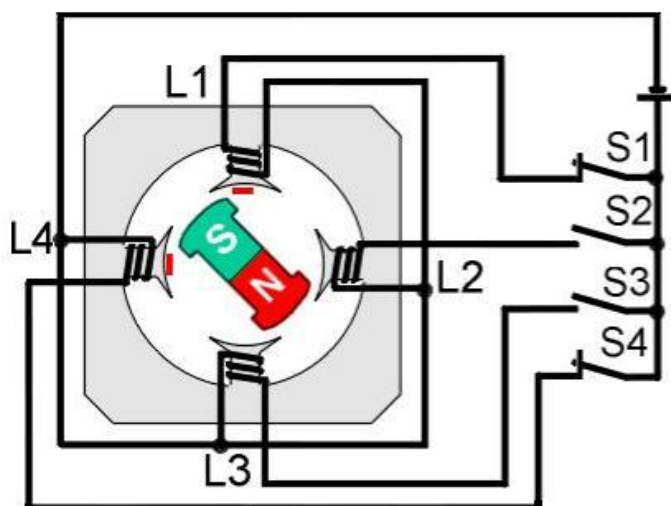
	L1	L2	L3	L4
0	1	0	0	0
1	1	1	0	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	0
5	0	0	1	1
6	0	0	0	1
7	1	0	0	1

6° βήμα



	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

7° βήμα- - τέλος



	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

Εικόνα 2.9: Αναπαράσταση της περιστροφής του δρομέα ενός μονοπολικού βηματικού κινητήρα σε λειτουργία «μισού» βήματος

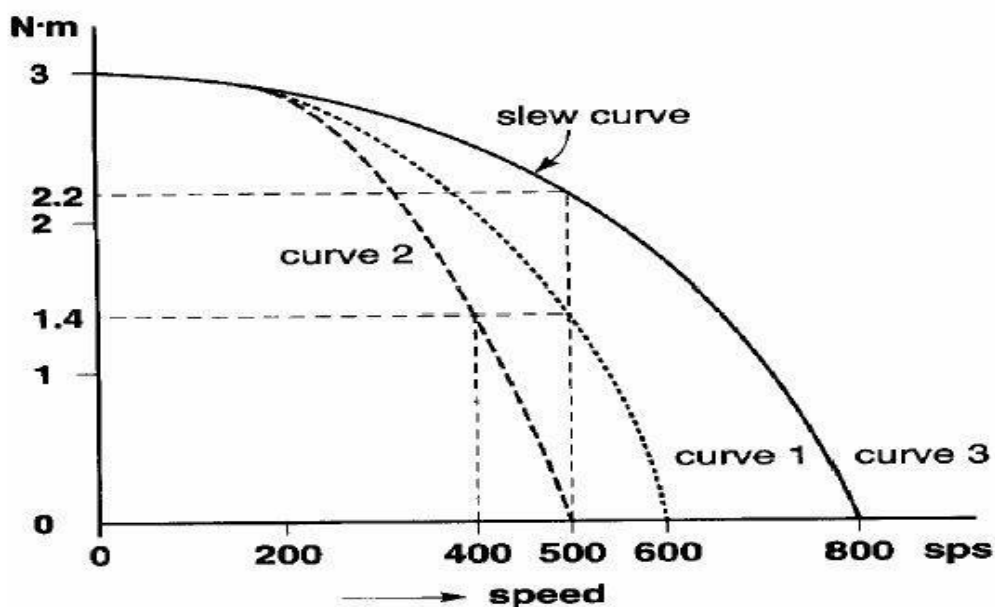
2.6 Χαρακτηριστικές λειτουργίας

Πρόκειται για τη χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του βηματικού κινητήρα. Διακρίνουμε δύο λειτουργικές καταστάσεις και κατά συνέπεια δύο χαρακτηριστικές καμπύλες :

- Τη λειτουργική κατάσταση εκκίνησης-ακινητοποίησης (start-stop mode)
- Τη λειτουργική κατάσταση συνεχούς περιστροφικής κίνησης χωρίς διακριτούς χρόνους εκκίνησης και ακινητοποίησης (Slew mode).

Στην εικόνα 2.10 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας για τις δύο αυτές λειτουργικές καταστάσεις. Παρατηρούμε ότι σε κάθε κατάσταση η ροπή μειώνεται με αύξηση των στροφών. Η χαρακτηριστική 1 αντιστοιχεί στην κατάσταση εκκίνησης – ακινητοποίησης, η καμπύλη 2 είναι για την ίδια κατάσταση λειτουργίας αλλά με αυξημένη φόρτιση του κινητήρα. Η καμπύλη 3 είναι η κατάσταση συνεχούς περιστροφικής κίνησης.

Σημειώνεται επίσης ότι η ροπή σε έναν βηματικό κινητήρα είναι ανάλογη του ρεύματος του στάτη για τιμές περίπου μέχρι την ονομαστική του τιμή (γραμμική περιοχή) και αυξάνεται λίγο για μεγαλύτερες τιμές του ρεύματος (περιοχή κορεσμού).



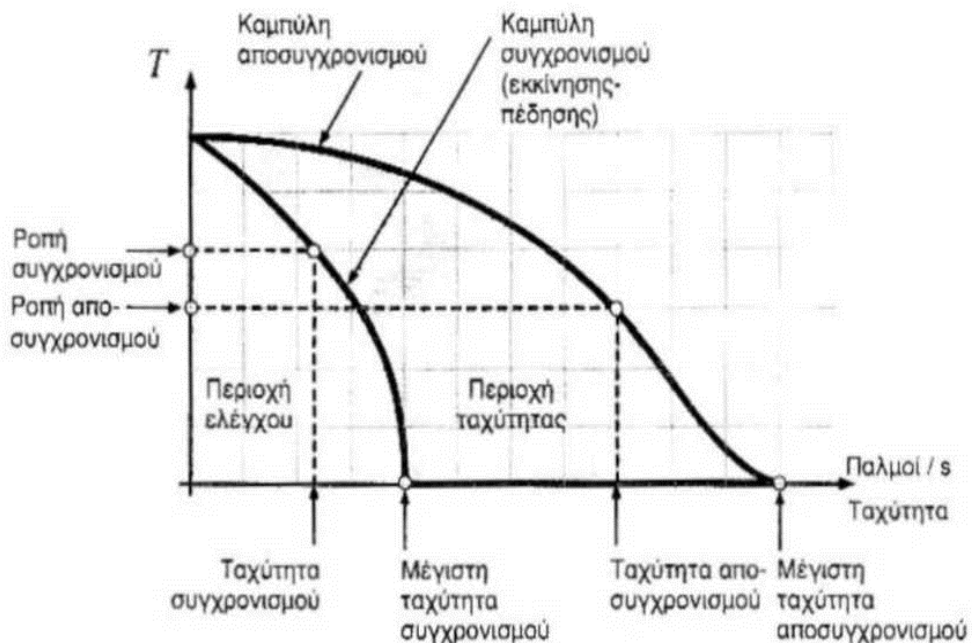
Εικόνα 2.10: Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του βηματικού κινητήρα.

Σημειώνεται επίσης ότι η ροπή σε έναν βηματικό κινητήρα είναι ανάλογη του ρεύματος του στάτη για τιμές περίπου μέχρι την ονομαστική του τιμή (γραμμική περιοχή) και αυξάνεται λίγο για μεγαλύτερες τιμές του ρεύματος (περιοχή κορεσμού)

Για την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση είναι απαραίτητη η αύξηση ή η μείωση αντίστοιχα της συχνότητας της παλμοδότησης. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται οδήγηση με ράμπα.

Υπάρχει ένα **ανώτατο όριο στην συχνότητα των παλμών** της τάσης του στάτη, ώστε ο δρομέας να μπορεί να ακολουθεί με ακρίβεια τους παλμούς. Όταν ξεπεραστεί το όριο αυτό, **ο κινητήρας χάνει βήματα** (αποσυγχρονίζεται). Στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητο να σταματάει το ένα βήμα πριν προχωρήσει στο επόμενο βήμα, επειδή μόνο έτσι ο κινητήρας διατηρεί τον συγχρονισμό του.

Στην εικόνα 2.11. η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας των Βηματικών κινητήρων περιλαμβάνει δύο καμπύλες, την καμπύλη συγχρονισμού (εκκίνησης-πέδησης) και την καμπύλη αποσυγχρονισμού. Αυτές χωρίζουν το διάγραμμα ροπής ταχύτητας σε δύο περιοχές. Στην πρώτη εκτός από το σημείο λειτουργίας/συγχρονισμού ορίζεται και **η περιοχή ελέγχου**, όπου 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.



Εικόνα 2.11: Χαρακτηριστικές ροπής στρωφών για Βηματικούς κινητήρες.

Στη δεύτερη περιοχή, **την περιοχή ταχύτητας** ο κινητήρας μπορεί να εργάζεται χωρίς να αποσυγχρονίζεται αλλά δεν μπορεί

να σταματήσει ή να αλλάξει φορά περιστροφής(μη ελεγχόμενη λειτουργία).

2.7 Χαρακτηριστικά μεγέθη

Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τους βηματικούς κινητήρες είναι:

Ταχύτητα

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

Ο μέγιστος αριθμός ΒΑΔ εξαρτάται (αντιστρόφως ανάλογα) από τη ροπή του φορτίου και την αδράνεια του συστήματος.

Ροπή

Μετρείται σε Nm (Newton meters)

Είναι η ροπή που παράγει ο κινητήρας στις διάφορες ταχύτητες περιστροφής του. Η μέγιστη τιμή ροπής κάθε κινητήρα, που ονομάζεται **ροπή ακινητοποίησης**, είναι η ροπή που παράγει όταν το φορτίο που αντιμετωπίζει είναι τόσο μεγάλο, ώστε να τον ακινητοποιεί. Η ροπή που αναπτύσσεται όταν ο δρομέας μετακινείται κατά ένα βήμα ονομάζεται **ροπή μετακίνησης** (pull – over torque).

Τάση λειτουργίας

Μετράται σε Volts και είναι η τιμή που πρέπει να έχει τη τάση τροφοδοσίας ώστε ο κινητήρας να λειτουργεί σωστά.

Όπως αναφέρθηκε υπάρχει ένα **ανώτατο όριο στην συχνότητα των παλμών** της τάσης ώστε ο δρομέας να μπορεί να ακολουθεί με ακρίβεια τους παλμούς δηλαδή να συγχρονίζεται. Όταν ξεπεραστεί το όριο αυτό, **ο κινητήρας χάνει βήματα** δηλαδή αποσυγχρονίζεται και κρίνεται απαραίτητο να σταματάει το ένα βήμα πριν προχωρήσει στο επόμενο βήμα για να διατηρήσει το συγχρονισμό του

Ένταση του ρεύματος,

Μετράται σε Amps και είναι η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον κινητήρα όταν αυτός λειτουργεί.

Η ένταση αυτή είναι ανάλογη του φορτίου του κινητήρα. Η ελάχιστη τιμή της αντιστοιχεί στην ελεύθερη «περιστροφή» του

κινητήρα (χωρίς φορτίο), Εάν ο κινητήρας έχει φορτίο η τιμή αυτή αυξάνεται. Για κάποια τιμή του φορτίου ο κινητήρας σταματά να περιστρέφεται, λόγω της μεγάλης αντίστασης, οπότε και η τιμή της έντασης του ρεύματος μεγιστοποιείται. Η μέγιστη αυτή τιμή είναι ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά του κινητήρα που πρέπει να είναι γνωστό για τη σωστή επιλογή της τροφοδοσίας του.

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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΛΕΓΧΟΣ ΒΗΜΑΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

3.1 Γενικά

Όπως προαναφέρθηκε οι βηματικοί κινητήρες διαφέρουν από τους γνωστούς τύπους κινητήρων (DC και AC) στο ότι τροφοδοτούνται με παλμούς και παράγουν ηλεκτρική κίνηση. Ο άξονας τους όμως δεν παράγει μια συνεχή περιστροφική κίνηση, αλλά περιστρέφεται κατά μία ορισμένη γωνία κάθε φορά που δέχεται ένα παλμό. Δηλαδή μετατρέπει τους ψηφιακούς παλμούς σε μηχανικό μέγεθος- θέση αξόνων. Η περιστροφή του κινητήρα έχει μια άμεση σχέση με τον αριθμό παλμών εισόδου, άρα η ταχύτητά του συσχετίζεται με τη συχνότητα των παλμών.

Οι βηματικοί κινητήρες είναι απλοί, στιβαροί, αξιόπιστοι και χρησιμοποιούνται για ανοικτούς ή κλειστούς ελεγχόμενους βρόχους συστημάτων ελέγχου. Λόγω της ευκολίας χρήσης και στις απλές ανάγκες ελέγχου και τον ακριβή έλεγχο, οι βηματικοί χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές μέτρησης και ελέγχου. Με έναν βηματικό κινητήρα είναι δυνατός ο έλεγχος της ταχύτητας και της θέσης μετακίνησης του φορτίου όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια (κεφάλαιο 3.2).

Οι βηματικοί είναι κινητήρες υψηλής ακρίβειας παρουσιάζοντας σφάλμα γωνίας θέσης χαμηλότερο από 5% χωρίς αυτό να είναι αθροιστικό με τον αριθμό των περιστροφών. 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.

Τελικά 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.

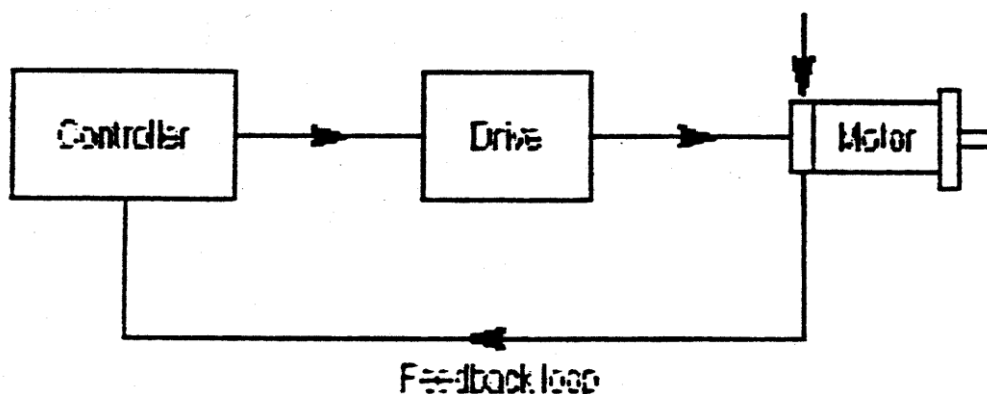
3.2 Έλεγχος ανοικτού βρόχου

Η μέθοδος ανοικτού βρόχου χρησιμοποιείται συχνά για τον έλεγχο των βηματικών κινητήρων. Μετρώντας τον αριθμό και τις εναλλαγές των παλμών που αποστέλλονται από τον ελεγκτή προς τον κινητήρα, μπορεί να υπολογιστεί η θέση του κάθε χρονική στιγμή. Δεν χρειάζεται δηλαδή να υπάρχει ανάδραση πληροφορίας από κάποιον αισθητήρα θέσης προς τον ελεγκτή, κάτι που είναι απαραίτητο στον έλεγχο κλειστού βρόχου.

Με απλά λόγια ορισμένος αριθμός βημάτων θα έχει σαν αποτέλεσμα ο άξονας του βηματικού κινητήρα να περιστραφεί σε μια συγκεκριμένη γωνία, χωρίς κάποια ανατροφοδότηση πληροφορίας από τον άξονα. Έτσι ξεκινώντας από μία θέση μπορούμε, μετρώντας τον αριθμό και τις εναλλαγές των παλμών, μπορούμε να υπολογίζουμε τη θέση του συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή.

3.3 Έλεγχος κλειστού βρόχου

Ο έλεγχος συνίσταται στη ρύθμιση της ταχύτητας και της θέσης του κινητήρα. Η ρύθμιση αυτή βασίζεται σε ένα σήμα ανάδρασης (feedback), Στην εικόνα 3.1. που ακολουθεί φαίνεται η δομή ενός ολοκληρωμένου διαγράμματος ελέγχου ταχύτητας με ενός βηματικού και όχι μόνο κινητήρα. Το σύστημα αυτό δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της θέσης αλλά και της ταχύτητας του κινητήρα.



Εικόνα 3.1. Δομή συστήματος ελέγχου ταχύτητας κλειστού βρόχου (closed loop velocity system)

Τα βασικά μέρη του κλειστού συστήματος ελέγχου είναι:

Ελεγκτής –Controller

Καθορίζει τη λειτουργία του κινητήρα θέτοντας τις παραμέτρους λειτουργίας όπως ταχύτητα, κατεύθυνση, απόσταση, ρυθμός επιτάχυνσης, επιβράδυνσης. Τη λειτουργία του ελέγχου μπορεί να αναλάβει ο κεντρικός Η/Υ αυτόνομα ή μέσω περιφερειακών μονάδων εξυπηρέτησης.

Drive

Μεταφέρει την απαραίτητη ενέργεια για τη λειτουργία του κινητήρα ανάλογα με τα σήματα χαμηλής ισχύος που δέχεται από τον ελεγκτή.

Feedback loop

Η λειτουργία ανάδρασης αποσκοπεί στο συνεχή έλεγχο των εντολών θέσης και ταχύτητας που δίνονται προς τον κινητήρα, ο οποίος προκύπτει από τη σύγκριση της παρούσας και επιθυμητής κατάστασης βάσει ενός αλγορίθμου ελέγχου, και δίδει τις εντολές στο drive.

3.4 Μεθοδολογίες λειτουργίας

Αφορά τις διάφορες συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων του στάτη για την επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών λειτουργίας (ροπή, ταχύτητα, φορά περιστροφής) σε συνδυασμό βέβαια και με την ταχύτητα ενεργοποίησης των τυλιγμάτων αυτών (βηματικός ρυθμός). Συχνά αναφέρεται και σαν μεθοδολογία οδήγησης όρος ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί και στη συνέχεια.

Οι τρόποι οδήγησης που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι οι εξής:

- Οδήγηση R-L
- Μονοπολική οδήγηση
- Διπολική οδήγηση
- Οδήγηση καταταμητού

3.4.1 Συνδεσμολογίες τυλιγμάτων

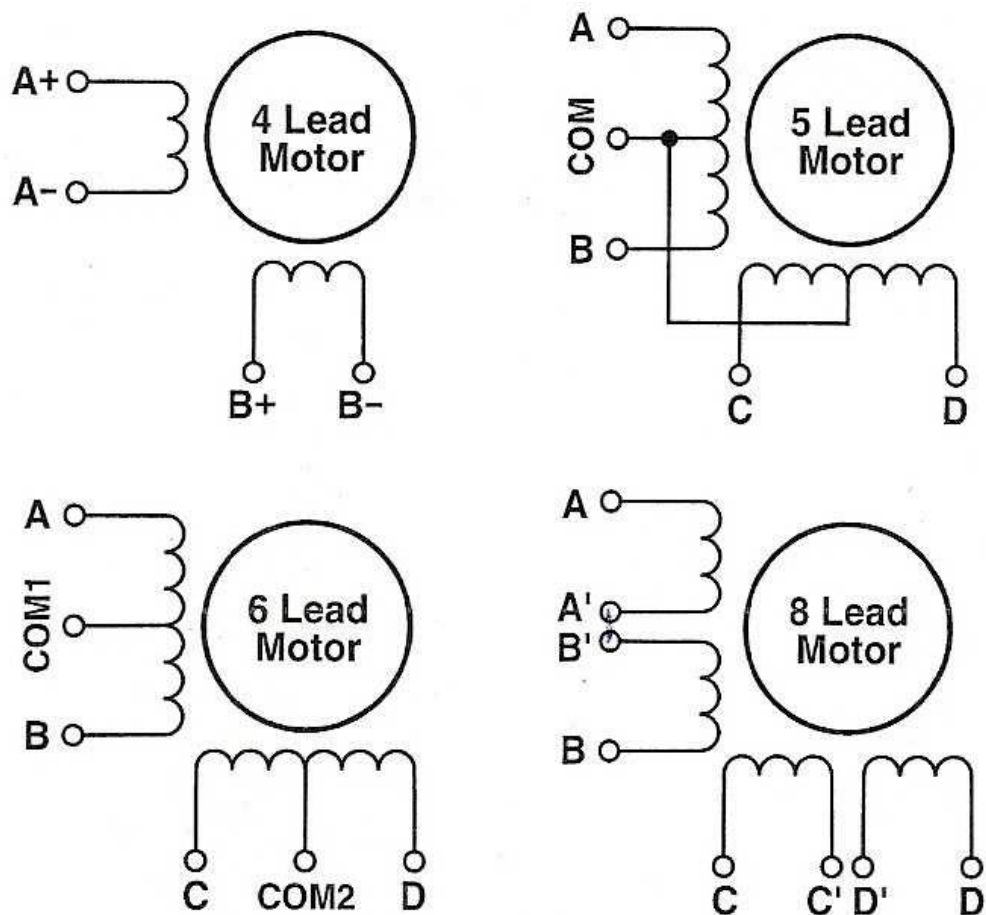
Οι βηματικοί κινητήρες που διατίθενται στην αγορά ξεχωρίζουν αρχικά από το πλήθος των ακροδεκτών που βγαίνουν από αυτούς.

Η βασική κατασκευή ή διαφορετικά ο βασικός τύπος του βηματικού κινητήρα περιλαμβάνει δύο τυλίγματα όπως χαρακτηριστικά δείχνει η εικόνα 3.2.α (4 –lead motor). Στο σχήμα αυτό, ο κινητήρας τεσσάρων εξωτερικών ακροδεκτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διπολική λειτουργία. Για τη λειτουργία αυτή θα πρέπει το ρεύμα να ρέει εναλλασσόμενα στα τυλίγματα δηλαδή το τύλιγμα απαιτεί δύο συνδέσεις. Συνεπώς το ηλεκτρονικό κύκλωμα οδήγησης θα πρέπει να αντιστρέφει την τάση του κάθε τυλίγματος συνεχώς. Ένα τέτοιο κύκλωμα επιτυγχάνεται με 4 τρανζίστορ σε συνδεσμολογία γέφυρας.

Στο επόμενο σχήμα (3.2.β) ο βηματικός κινητήρας διαθέτει 5 ακροδέκτες και εσωτερικά βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους τις μεσαίες λήψεις των τυλιγμάτων. Ο κινητήρας αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μονοπολική λειτουργία. Στην περίπτωση αυτή η μεσαία λήψη συνδέεται στο θετικό δυναμικό της πηγής τροφοδοσίας. Ανάλογα με ποια επαφή (αρχή ή τέλος) των τυλιγμάτων συνδεθούν με τη γείωση έχουμε ρεύμα στο αντίστοιχο μισό του τυλίγματος. Συνεπώς το ηλεκτρονικό κύκλωμα που απαιτείται για την οδήγηση είναι απλό και επαρκούν δύο τρανζίστορ.

Με 6 ακροδέκτες (σχήμα 3.2.γ) επιτυγχάνουμε: μονοπολική λειτουργία του βηματικού κινητήρα αν οι μεσαίες συνδεθούν μεταξύ τους (5 ακροδέκτες), διπολική λειτουργία αν οι μεσαίες λήψεις παραμείνουν ασύνδετες, οπότε οι δύο περιελίξεις των τυλιγμάτων συνδέονται σε σειρά.

Στην περίπτωση των 8 ακροδεκτών μπορεί να έχουμε μονοπολική λειτουργία με την δημιουργία μεσαίας λήψης σε κάθε τύλιγμα. Αν οι δύο περιελίξεις του κάθε τυλίγματος συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα, δημιουργούνται δύο ζεύγη ακροδεκτών ένα για κάθε τύλιγμα οπότε ο κινητήρας μπορεί να οδηγηθεί διπολικά.



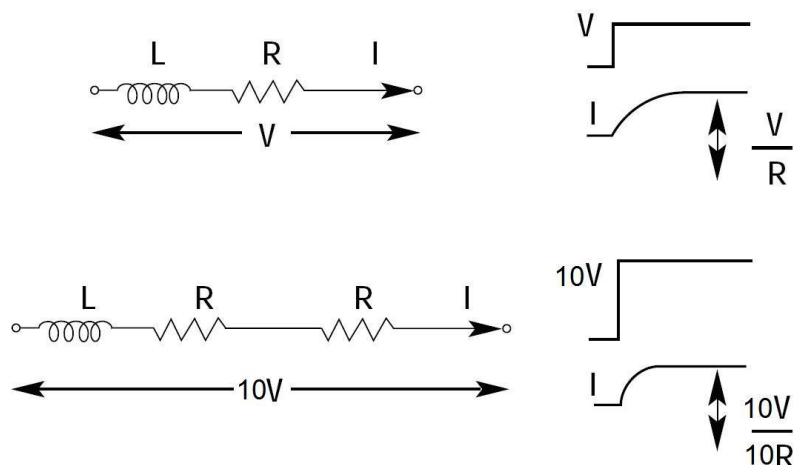
Εικόνα 3.2: Βασικές συνδεσμολογίες βηματικών κινητήρων με (4,5,6 και 8) καλώδια.

3.4.2 Οδήγηση R-L

Η λειτουργία/οδήγηση R – L, είναι η πιο απλή μορφή διασύνδεσης του κυκλώματος ισχύος και φαίνεται στην εικόνα 3.3 και χρησιμοποιείται αποκλειστικά για χαμηλές ισχύεις.

Το κύκλωμα ισχύος περιλαμβάνει μία αντίσταση σε σειρά συνδεδεμένη με το κάθε τύλιγμα του στάτη. Αν χρησιμοποιήσουμε παλμό με εφαρμοζόμενη τάση (τάση τροφοδοτικού) 10 φορές την ονομαστική τάση της μηχανής, προσθέτοντας σε σειρά αντίσταση $9R$, το ρεύμα θα φθάσει το ονομαστικό στο ένα δέκατο του αρχικού χρόνου χωρίς να επηρεάζεται η μέγιστη τιμή. Έτσι θα πάρουμε μια «άμεση» περιστροφή του κινητήρα (γρήγορη απόκριση).

Όπως σε όλες τις παρόμοιες μεθοδολογίες (προσθήκη αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα) υπάρχει τμήμα για την γρήγορη αυτή απόκριση.. Οι επιπλέον αντιστάσεις που συνδέονται στα τυλίγματα του στάτη σημαίνουν αυξημένες απώλειες στο κύκλωμα. (χαμηλή απόδοση). Επιπλέον, απαιτείται τροφοδοτικό μεγαλύτερης ισχύος. Για τους λόγους αυτούς η οδήγηση RL χρησιμοποιείται μόνο στις εφαρμογές χαμηλής ισχύος, για να πετύχουμε γρήγορη/άμεση απόκριση στην περιστροφή του δρομέα.



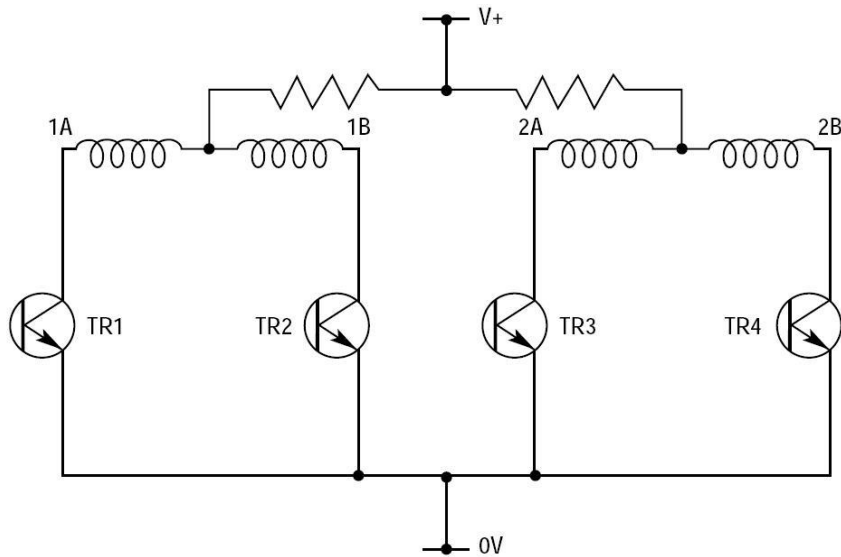
Εικόνα 3.3: Αρχή οδήγησης λειτουργίας R – L

3.4.3 Μονοπολική οδήγηση

Ονομάζεται μονοπολική διάταξη γιατί το ρεύμα του στάτη λόγω δομής του κυκλώματος διατηρεί μόνο μια φορά. Είναι η πιο απλή μορφή κυκλώματος ισχύος, απαιτεί όμως κινητήρες που έχουν τύλιγμα στάτη με διπλή σπείρα τυλίγματος σε κάθε πόλο οπότε η μη εναλλαγή του ρεύματος πραγματοποιείται με τη μεταφορά του στο δεύτερο τύλιγμα, δηλαδή τύλιγμα με μεσαία λήψη. Η τάση τροφοδοσίας εφαρμόζεται μεταξύ της μεσαίας λήψης και ενός από τους ελεύθερους ακροδέκτες του τυλίγματος.

Το ρεύμα καθορίζεται από την αντίσταση των τυλιγμάτων και από την τάση τροφοδοσίας, όπως φαίνεται και στο σχ.3.3 που ακολουθεί. Η φορά περιστροφής του δρομέα εξαρτάται από το ποιος ακροδέκτης συνδέεται με την τροφοδοσία.

Είναι μία απλή οδήγηση, που όμως έχει το μειονέκτημα της τμηματικής άρα μη «αποδοτικής χρήσης» των τυλιγμάτων του κινητήρα. Το κύκλωμα αυτό οδήγησης λειτουργεί αποδοτικά σε χαμηλούς βηματικούς ρυθμούς. Οσο αυξάνεται η ταχύτητα η ροπή μειώνεται δραματικά.

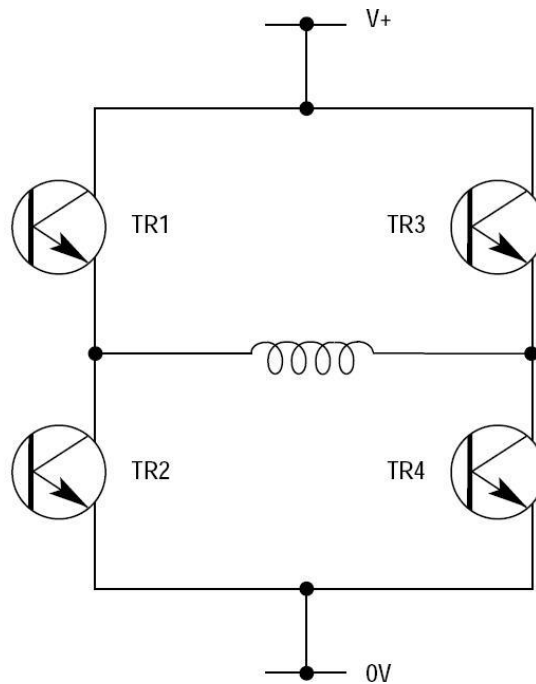


Εικόνα 3.4: Σύστημα ελέγχου βηματικών κινητήρων - μονοπολική οδήγηση.

Η μονοπολική οδήγηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις μεθόδους: μονής φάσης (*single phase ή wave*), διπλής φάσης (*two-phase*) και μισού βήματος (*half-step*).

3.4.4 Διπολική οδήγηση ή διπλής φάσης

Για να πετύχουμε καλύτερα αποτελέσματα (ροπή, ταχύτητα) χρησιμοποιείται η μέθοδος της διπολικής οδήγησης σε σχήμα γέφυρας. Στην περίπτωση αυτή, τα τυλίγματα του στάτη δεν χρειάζεται να έχουν μεσαία λήψη. Για να αλλάξει η φορά περιστροφής αρκεί να αλλάξει φορά το ρεύμα και στις δύο φάσεις. Η μέθοδος αυτή οδήγησης αυτές παράγει μεγαλύτερη ροπή, ιδίως στις χαμηλές ταχύτητες, αλλά ηλεκτρονικά είναι περισσότερο πολύπλοκες.



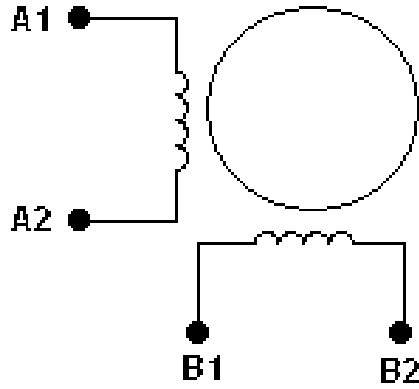
Εικόνα 3.5: Διπολική οδήγηση βηματικού κινητήρα.

Η διπολική οδήγηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις μεθόδους: μονής φάσης (*single phase ή wave*), διπλής φάσης (*two-phase*) και μισού βήματος (*half-step*).

3.4.4.1. Παράδειγμα διπολικής οδήγησης διπλής φάσης

Η διπολική οδήγηση διπλής φάσης είναι η μέθοδος οδήγησης που χρησιμοποιείται συχνότερα. Για παράδειγμα στους οδηγούς εύκαμπτων δίσκων (*floppy drives*) χρησιμοποιείται για χρόνια.

Στην οδήγηση διπλής φάσης το κύκλωμα ενεργοποιεί ταυτόχρονα και τα δύο ξεχωριστά τυλίγματα του στάτη, με αποτέλεσμα ο μόνιμος μαγνήτης του δρομέα να ακινητοποιείται σε μια θέση ανάμεσα στα 2 ενεργοποιημένα τυλίγματα. Αν ονομάσουμε τα άκρα των δύο τυλιγμάτων A1-A2, B1-B2 όπως στην εικόνα 3.6, τότε προκειμένου να στρέψουμε τον κινητήρα κατά ένα βήμα τη φορά προς μια κατεύθυνση, θα πρέπει να τροφοδοτούμε τα τυλίγματα όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.



Εικόνα. 3.6. Διπολική οδήγηση διπλής φάσης

Πίνακας 3.1 Σύνδεση ακροδετών τυλιγμάτων A1-A2 & B1-B2

Αρ. βήματος	A1	A2	B1	B2
1	-	+	-	+
2	-	+	+	-
3	+	-	+	-
4	+	-	-	+

Σημείωση: Με - συμβολίζουμε τον αρνητικό ακροδέκτη (π.χ. GND) και με + τον θετικό (π.χ. Vcc).

Ο παραπάνω πίνακας μας δείχνει πώς πρέπει να πολωθούν τα τυλίγματα προκειμένου να έχουμε οδήγηση διπλής φάσης. Όπως παρατηρούμε σε κάθε βήμα είναι πολωμένα και τα δύο τυλίγματα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μετά από τέσσερα βήματα. Έτσι αν θέλουμε να περιστρέφουμε τον κινητήρα συνεχώς προς μια κατεύθυνση θα πρέπει να ακολουθούμε το προηγούμενο μοτίβο ανελλιπώς. Τώρα αν ακολουθήσουμε ακριβώς την αντίστροφη αλληλουχία ακροδεκτών τότε ο κινητήρας περιστρέφεται αντίστροφα. Κοντολογίς αν μετά από έναν παλμό (step) βρισκόμαστε στην κατάσταση όπου A1 = -, A2 = +, B1 = - και B2 = + τότε απλά αλλάζοντας την πολικότητα

των B1 και B2 (διατηρώντας την πολικότητα των A1 και A2) ο κινητήρας μας θα εκτελέσει ένα βήμα προς μια κατεύθυνση. Αν όμως αλλάξουμε την πολικότητα των A1 και A2 (διατηρώντας τώρα την πολικότητα των B1 και B2) ο κινητήρας θα εκτελέσει ένα βήμα προς την αντίθετη κατεύθυνση κ.ο.κ.

Αν προσέξουμε καλά τον πίνακα θα διαπιστώσουμε ότι κάθε φορά το A2 είναι αντίθετο του A1, όπως και το B2 αντίθετο του B1. Αυτό σημαίνει ότι δεν έχουμε τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις αλλά 2. Επειδή όλα τα Flip Flop παρέχουν και την συμπληρωματική έξοδο συνεπάγεται ότι αρκούν μόνο δύο Flip Flop για την υλοποίηση του κυκλώματος. Αντικαθιστώντας τα σύμβολα - και + με της δυαδικής λογικής 0 και 1 προκύπτει ο επόμενος πίνακας ακολουθίας παλμών A και B αντίστοιχα.

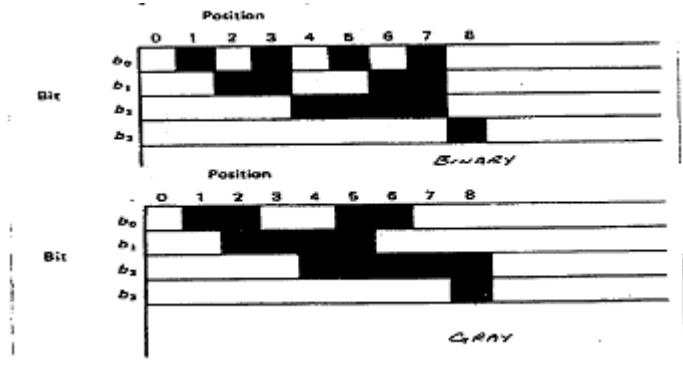
Πίνακας 3.2 Ακολουθία παλμών

Αρ. βήματος	A	B
1	0	0
2	0	1
3	1	1
4	1	0

Ετσι προκύπτει ο πασίγνωστος κώδικας Gray. Δηλαδή προκειμένου να περιστρέψουμε το κινητήρα μας αρκεί να τροφοδοτούμε τα τυλίγματά του με τον... κώδικα Gray.

3.4.4.2 Κώδικας Gray

Ο κώδικας Gray χρησιμοποιείται συχνά σε ηλεκτρονικά κυκλώματα για την αποφυγή προβλημάτων που θα μπορούσαν να προκύψουν εάν χρησιμοποιηθεί η απευθείας δυαδική κωδικοποίηση. Για παράδειγμα, σε μετρήσεις της θέσης ενός αντικειμένου, εάν χρησιμοποιηθεί η απευθείας δυαδική κωδικοποίηση θα μπορούσε να «φαίνεται» ότι γειτονικές θέσεις του αντικειμένου διαφέρουν περισσότερο από ένα bit.



Εικόνα 3.7 Παράσταση δυαδικής κωδικοποίησης και κωδικοποίησης Gray

Decimal	Gray Code		
0	0		
1	1		
2	11	Set bit 1. Reflect bit 0	
3	10	Set bit 2. Reflect bits 1 and 0	
4	110		
5	111		
6	101		
7	100		
8	1100	Set bit 3. Reflect bits 2, 1 and 0	Imagine a mirror is placed the reflected bits.
9	1101		
10	1111		
11	1110		
12	1010		
13	1011		
14	1001		
15	1000		
16	11000	Set bit 4. Reflect bits 3, 2, 1 and 0	

Εικόνα 3.8. Πίνακας μετατροπής δεκαδικού σε κώδικα Gray

Με βάση τον παραπάνω πίνακα θα προχωρήσουμε στην κατασκευή του πίνακα καταστάσεων του κυκλώματος τροφοδοσίας που είναι ένα ψηφιακό κύκλωμα που θα περιστρέφει κάθε φορά κατά ένα βήμα τον βηματικό κινητήρα.

Επιπλέον θα ελέγχει τη φορά περιστροφής με ένα ξεχωριστό σήμα. Όταν αυτό βρίσκεται σε λογική 0 τότε ο κινητήρας θα περιστρέφεται προς μια κατεύθυνση. Όταν τίθεται σε λογική 1

θα περιστρέφεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Έστω D αυτό το σήμα. Είναι εύκολο να διαπιστώσουμε ότι το βήμα παίζει το ρόλο του ρολογιού στο κύκλωμά μας (απαραίτητο για τα Flip Flop). Δηλαδή κάθε φορά με το "χτύπημα" του ρολογιού εκτελείται ένα βήμα. Με το επόμενο "χτύπημα" ένα δεύτερο βήμα κ.ο.κ. Για να εκτελέσει ο κινητήρας μια πλήρη περιστροφή θα χρειαστούν μερικά "χτυπήματα" που εξαρτώνται από τον βηματικό κινητήρα. Για παράδειγμα ένας κινητήρας με βήμα $3,6^\circ$ απαιτεί συνολικά 100 "χτυπήματα" του ρολογιού για μια πλήρη περιστροφή). Χρειαζόμαστε 2 Flip Flop και έστω ότι χρησιμοποιούμε JK Flip Flop (Jump Kill). Με βάση λοιπόν όλα τα παραπάνω ο πίνακας καταστάσεων του κυκλώματος έχει ως εξής.

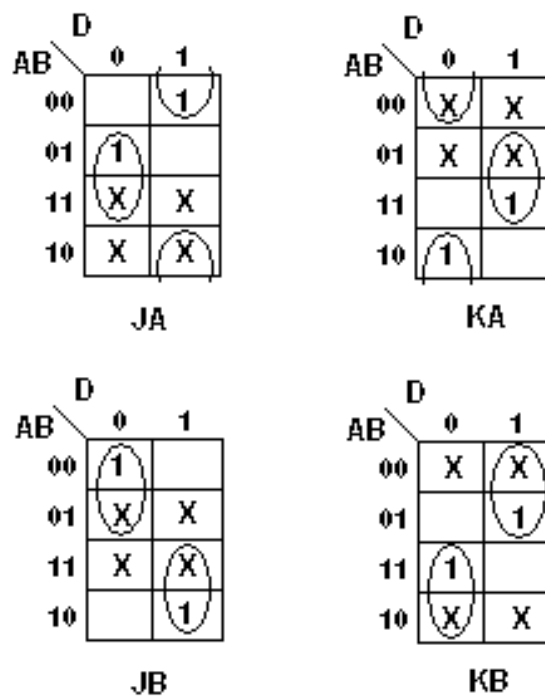
Πίνακας 3.3. Πίνακας καταστάσεων

Παρούσα κατάσταση AB	Είσοδος D	Επόμενη κατάσταση A+B'	Είσοδοι 1 ^{ου} Flip Flop JA KA	Είσοδοι 2 ^{ου} Flip Flop JB KB
00	0	01	0X	1X
00	1	10	1X	0X
01	0	11	1X	X0
01	1	00	0X	X1
10	0	00	X1	0X
10	1	11	X0	1X
11	0	10	X0	X1
11	1	01	X1	X0

όπου X είναι οι αδιάφοροι όροι.

Για την επόμενη κατάσταση με βάση την είσοδο D, δεν έχετε παρά να κοιτάξετε τον πίνακα 1 της προηγούμενης ενότητας. Όταν βρισκόμαστε στην κατάσταση 00 (δηλαδή τα τυλίγματα πολωμένα με $A1 = -$, $A2 = +$, $B1 = -$ και $B2 = +$) και η είσοδος είναι 0, τότε με τον επόμενο παλμό του ρολογιού (όπου εκτελείται και το επόμενο βήμα) θα πρέπει να μεταβούμε στην κατάσταση 01. Αντίθετα αν η είσοδος D είναι 1 τότε θα πρέπει να μεταβούμε στην κατάσταση 10 προκειμένου ο κινητήρας να κάνει ένα βήμα προς την αντίθετη κατεύθυνση (κοιτάμε τον πίνακα 1 από κάτω προς τα πάνω λαμβάνοντας υπόψη την κυκλική εναλλαγή). Οι είσοδοι των Flip Flops προκύπτουν από τους πίνακες διέγερσης των JK Flip Flop.

Μετά από αυτό το μόνο που έμεινε είναι η απλοποίηση και η εξαγωγή των λογικών συναρτήσεων. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τους χάρτες καρνώ (ένας για κάθε είσοδο του Flip Flop).



Σχ. 3.9. Χάρτες Karnaugh

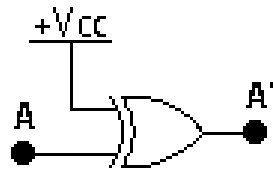
Από τους χάρτες προκύπτουν οι απλοποιημένες λογικές συναρτήσεις για τις εισόδους των Flip Flops. Οπότε

$$\begin{aligned}
 JA &= BD' + B'D = B (+) D && \text{(XOR)} \\
 KA &= B'D' + BD = (B (+) D)' && \text{(XNOR)} \\
 JB &= A'D' + AD = (A (+) D)' && \text{(XNOR)} \\
 KB &= A'D + AD' = A (+) D && \text{(XOR)}
 \end{aligned}$$

Όπως φαίνεται από τις λογικές συναρτήσεις η μία είσοδος του κάθε Flip Flop είναι το συμπλήρωμα της άλλης. Άρα μπορούμε να γράψουμε

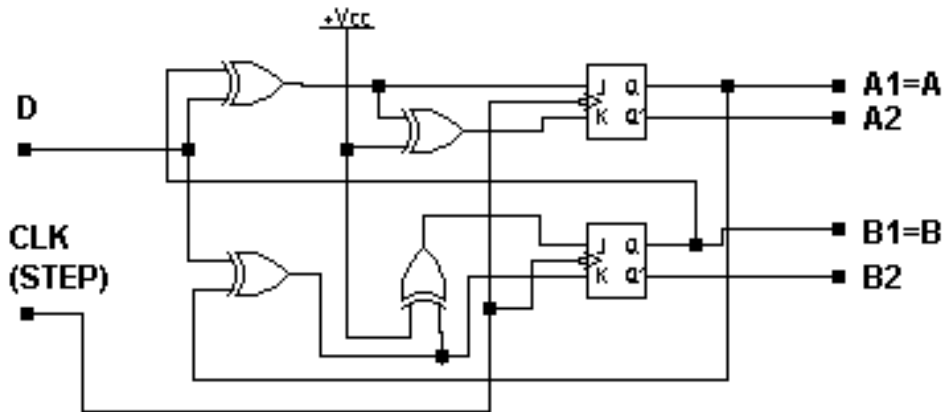
$$\begin{aligned} JA &= BD' + B'D = B (+) D && \text{(XOR)} \\ KA &= JA' \\ JB &= KB' \\ KB &= A'D + AD' = A (+) D && \text{(XOR)} \end{aligned}$$

Για να μη χρησιμοποιούμε επιπλέον πύλες είναι δυνατόν να μετατρέψουμε μια πύλη XOR σε πύλη NOT. Αρκεί η μία είσοδος να βρίσκεται πάντα σε λογικό 1 (V_{CC}).



Πύλη NOT από μία XOR

Με βάση λοιπόν αυτό χρειαζόμαστε συνολικά μόνο 4 πύλες XOR (δηλαδή ένα ολοκληρωμένο 7486), τον ίδιο αριθμό που χρειαστήκαμε και για το αντίστοιχο κύκλωμα στο άρθρο [Διπολική οδήγηση βηματικών κινητήρων](#). Το κύκλωμα ελέγχου όπως προκύπτει από τις λογικές συναρτήσεις λαμβάνοντας υπόψη και τις προηγούμενες παρατηρήσεις έχει ως εξής



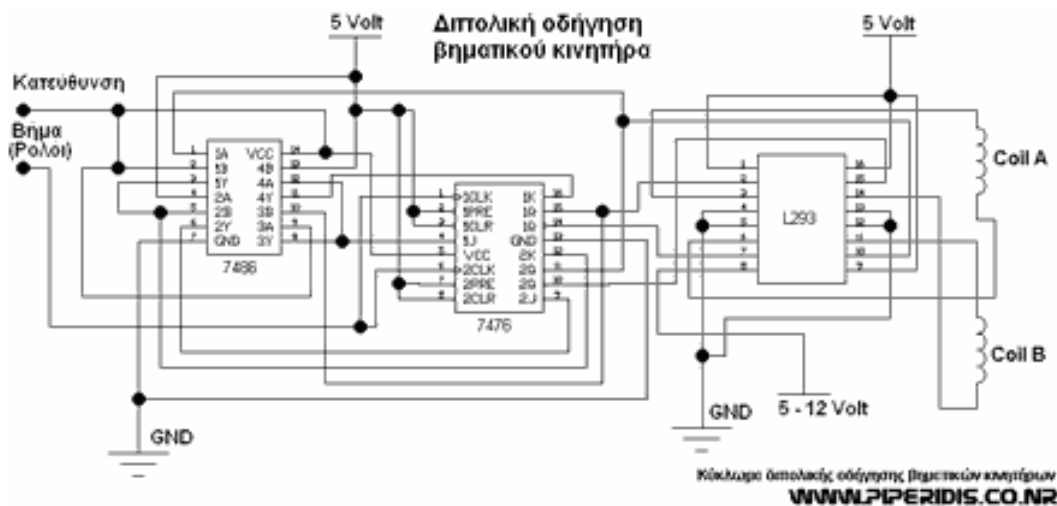
Εικόνα 3.10. Κύκλωμα ελέγχου

Αν υλοποιήσετε το κύκλωμα σε έναν εξομοιωτή λογικών κυκλωμάτων και το συγκρίνετε με αυτό του άρθρου θα διαπιστώσετε ότι είναι ισοδύναμα. Το κύκλωμα, όπως αυτό δίνεται στο βιβλίο των Dennis Clark και Michael Owings, ενώ δεξιά το προηγούμενο. Στο κάτω μέρος υπάρχει ένας διακόπτης Clear που μηδενίζει τις εξόδους των Flip Flop στην αρχή της εξομοίωσης. Αυτό είναι απαραίτητο να το κάνουμε προκειμένου τα δύο κυκλώματα να είναι συγχρονισμένα, δηλαδή να

βρίσκονται στην ίδια αρχική κατάσταση. Αυτό έχει να κάνει περισσότερο με τη λειτουργία του προγράμματος εξομοίωσης και όχι με την πραγματικότητα. Αν τον παραλείψουμε θα παρατηρήσουμε ότι τα δύο κυκλώματα σε κάθε χτύπημα του ρολογιού θα δείχνουν σε διαφορετικές καταστάσεις (ωστόσο και στα δύο κυκλώματα η αλληλουχία των καταστάσεων θα ακολουθεί τον πίνακα 1).

Πριν ξεκινήσουμε κάνουμε μια φορά clear ώστε να μηδενιστούν τα Flip Flop και να συγχρονιστούν τα δύο ανεξάρτητα ψηφιακά κυκλώματα (δεξιά είναι το κύκλωμα που παρουσιάσαμε). Αρχικά η είσοδος D (Direction) είναι σε λογικό μηδέν οπότε κάθε φορά που "χτυπάμε" το ρολόι (βήμα) οι έξοδοι των Flip Flop αλλάζουν ακολουθώντας τον πίνακα 1. Στη συνέχεια θέτουμε το D σε λογικό 1 και παρατηρούμε ότι οι έξοδοι αλλάζουν αντίστροφα (δηλαδή κοιτώντας τον πίνακα 1 από κάτω προς τα πάνω). Οι έξοδοι και των δύο κυκλωμάτων ταυτίζονται σε κάθε περίπτωση. Αυτό σημαίνει ότι τα κυκλώματα είναι ισοδύναμα και κάνουν ακριβώς την ίδια δουλειά.

Τις εξόδους των Flip Flops τις συνδέουμε με τη γέφυρα H (H bridge), όπως κάναμε και στην περίπτωση του κυκλώματος των Dennis Clark και Michael Owings. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ολοκληρωμένο L293 και σε αυτήν την περίπτωση. Έτσι το τελικό κύκλωμα έχει ως εξής

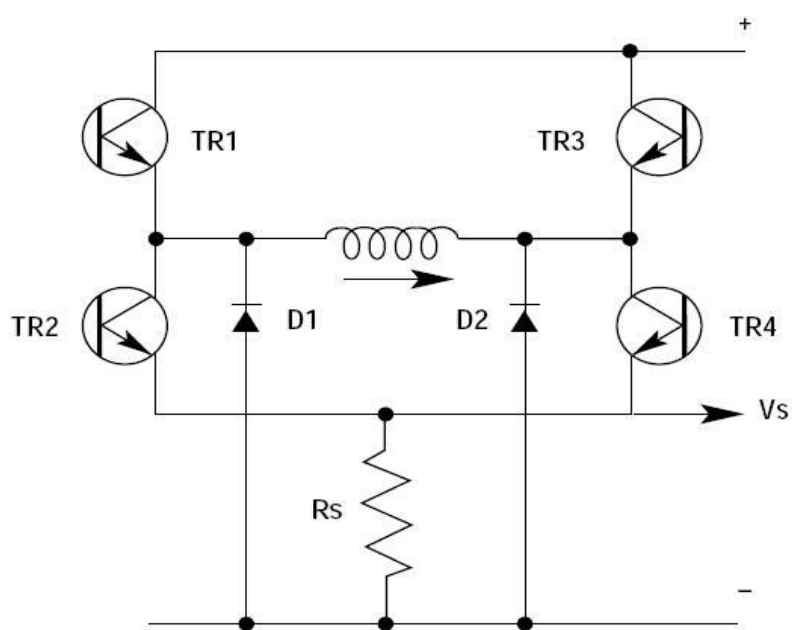


Εικόνα 3.11. Τελικό κύκλωμα οδήγησης

Και πάλι χρησιμοποιούμε τον ίδιο αριθμό ολοκληρωμένων (7486, 7476 και L293). Το κύκλωμα έχει την ίδια πολυπλοκότητα (ή καλύτερα την ίδια απλότητα) με αυτό των Dennis Clark και Michael Owings. Σε μια πρώτη ματιά μπορεί να φαντάζουν ακριβώς ίδια, αλλά στην πραγματικότητα δεν είναι. Από μια πλευρά είναι και λογικό αφού τα δυο κυκλώματα είναι ισοδύναμα.

3.5 Οδήγηση κατατμητού

Η οδήγηση κατατμητού, χρησιμοποιεί τη μεθοδολογία της διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation-PWM) για να ελέγξει το μέση τιμή του ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη. Με την γνωστή αυτή μεθοδολογία η τάση και το ρεύμα που εφαρμόζονται στον κινητήρα που συνδέεται (τάση εξόδου κατατμητού) μπορούν να ελεγχθούν από τον αριθμό (πλήθος) και το πλάτος των σημάτων εισόδου αυτού. Επακόλουθο της μεθόδου είναι η παραγωγή ηλεκτρικού θορύβου (ρεύμα με υψηλό περιεχόμενο αρμονικών).

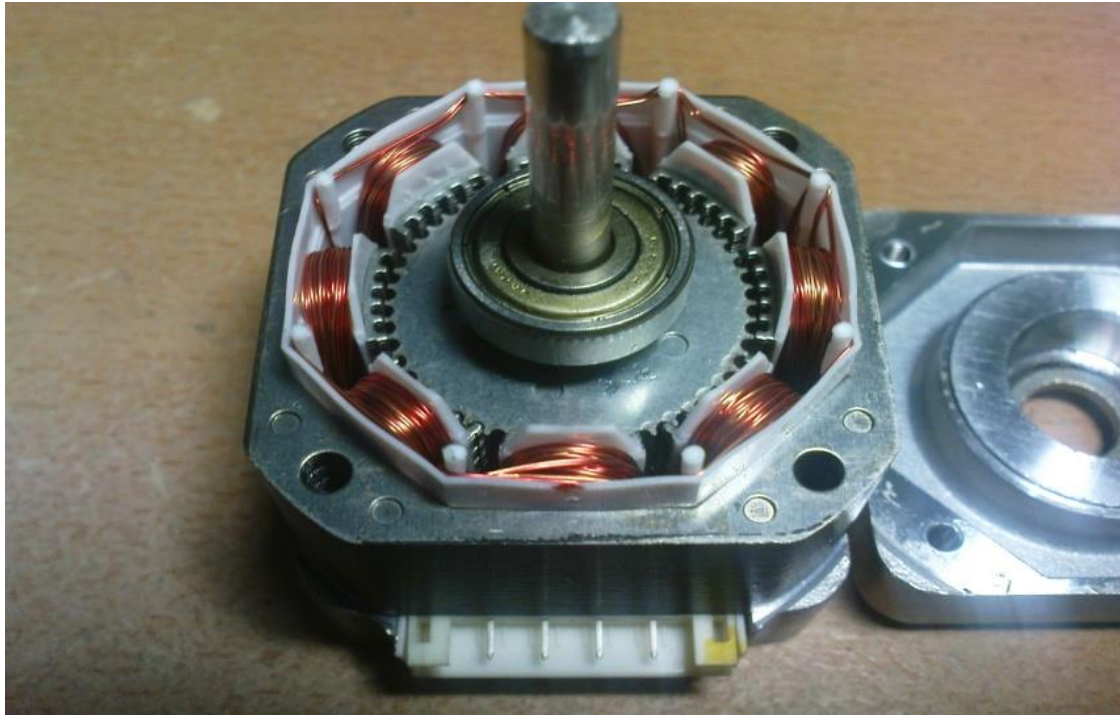


Εικόνα 3.12 Οδήγηση κατατμητού βηματικού κινητήρα.

3.6 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα του Βηματικών κινητήρων είναι :

- Έχουν εξαιρετική απόκριση στην εκκίνηση τους. Επίσης δεν απαιτείται μηχανικό φρένο για την επιβράδυνση τους.
- Ο βηματικός κινητήρας όταν βρίσκεται σε κατάσταση ακινησίας ασκεί μαγνητική δύναμη στο ρότορα, που δεν τον 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.
- 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, μπορεί να υπολογιστεί η θέση του συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή.
- Οι μετακινήσεις είναι ακριβείς καθώς ο βηματικός κινητήρες έχει ακρίβεια έως και 5% σε κάθε βήμα. Δηλαδή μεγάλη ακρίβεια θέσης χωρίς συσσωρευτική απόκλιση.
- Ο βηματικός κινητήρας μπορεί να επιτύχει πολύ χαμηλές ταχύτητες περιστροφής.
- Είναι πολύ αξιόπιστος καθώς για τη λειτουργία του δεν απαιτούνται κινούμενες ηλεκτρικές επαφές όπως στον κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Επομένως η ζωή του κινητήρα εξαρτάται μόνο από τη ζωή του εδράνου κύλισης.
- Στις μικρές ταχύτητες περιστροφής, αλλά και κατά την εκκίνησή του παράγει μεγάλες τιμές ροπής.
- Είναι εύκολη η διασύνδεση και ο έλεγχός του από μικροεπεξεργαστή, σε αντίθεση με τους κινητήρες DC.



Εικόνα 3.13: Εσωτερική άποψη ενός βηματικού κινητήρα

Τα μειονεκτήματα των Βηματικών κινητήρων είναι τα ακόλουθα:

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΗΜΑΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

4.1 Γενικά

Για την επιλογή κινητήρα σε μια εφαρμογή λαμβάνουμε υπόψη μας διάφορους παράγοντες όπως:

- Η απαιτούμενη ροπή στρέψης
- Η ροπή αδράνειας του φορτίου
- Τα φυσικά χαρακτηριστικά του κινητήρα.
- Το είδος του κινητήρα.
- Η πολυπλοκότητα του ελεγκτή δηλαδή του κυκλώματος έλεγχου.

Σημαντικά στοιχεία επιλογής του βηματικού κινητήρα γίνονται φανερά μέσα από τη σύγκριση του με το σερβοκινητήρα έναν σημαντικό ειδικό κινητήρα . Αρχικά, οι Βηματικοί κινητήρες και οι Σερβοκινητήρες παρουσιάζουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους. Βλέπουμε ότι υπάρχουν διαφορές ως προς την σχεδίαση τους, από όπου επηρεάζεται σημαντικά η απόδοσή τους. Πιο συγκεκριμένα εξαιτίας του μεγαλύτερου αριθμού πόλων του βηματικού κινητήρα, απαιτείται για μια κίνηση μεγαλύτερη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τα τυλίγματα του σε σχέση με έναν σερβοκινητήρα.

Γεγονός το οποίο σε χαμηλότερες ταχύτητες λειτουργεί ευεργετικά από άποψη ροπής, καθιστώντας τον βηματικό κινητήρα να έχει πλεονέκτημα σε σχέση με έναν σερβοκινητήρα ίδιου μεγέθους. Πιο αναλυτικά οι βηματικοί κινητήρες λειτουργούν καλύτερα σε ταχύτητες κάτω των 2.000 ΣΑΛ. Αντίθετα σε περιπτώσεις υψηλών ταχυτήτων ο βηματικός κινητήρας υποβαθμίζει την ροπή του, θέτοντας τον σερβοκινητήρα να έχει το πλεονέκτημα. Ειδικότερα ο σερβοκινητήρας λειτουργεί καλύτερα σε εφαρμογές που απαιτούν ταχύτητες πάνω από 2.000 ΣΑΛ και υψηλή δυναμική απόκριση.

Έπειτα, τα δύο είδη κινητήρα διαφέρουν στον τρόπο έλεγχου τους. Έτσι, στους Βηματικούς κινητήρες χρησιμοποιείται κυρίως η μέθοδος ανοιχτού βρόγχου, ενώ στους σερβοκινητήρες η μέθοδος κλειστού βρόγχου. Επομένως, οι βηματικοί κινητήρες δεν χρειάζονται πρόσθετο σύστημα κωδικοποίησης για περισσότερες εφαρμογές εντοπισμού θέσης και συνεπώς είναι πιο οικονομικοί. Ακόμα στους Βηματικούς κινητήρες παρατηρείται το φαινόμενο μεταβολής της πλεονάζουσας ισχύος σε θερμότητα,

γεγονός που δημιουργεί περισσότερη θερμότητα στον κινητήρα. Αντιθέτως στους σερβοκινητήρες δεν συμβαίνει αυτό διότι η μονάδα ελέγχου τους σε συνεργασία με τους ενισχυτές τροφοδοτεί τον κινητήρα μόνο με το απαιτούμενο ρεύμα.

Όσον αφορά την αξιοπιστία τους παρατηρείται μεγαλύτερη στον βηματικό κινητήρα διότι δεν απαιτεί κωδικοποιητή που μπορεί να αποτύχει, σε σχέση με τον σερβοκινητήρα που διαθέτει κωδικοποιητή. Επίσης οι δύο κινητήρες διαφέρουν στα ποσοστά απόδοσης τους. Ο σερβοκινητήρας εμφανίζει καλύτερη απόδοση με ποσοστά 80-90% σε μικρά φορτία, έναντι του βηματικού που η απόδοση του κυμαίνεται στο 70%.

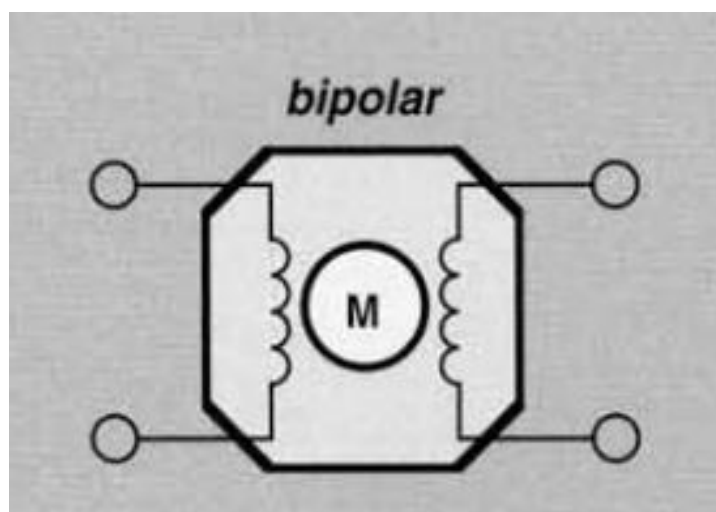
Τελειώνοντας, στους βηματικούς κινητήρες δεν υπάρχει κίνδυνος υπερφόρτωσης, σε σχέση με τους σερβοκινητήρες που λόγω υπερφόρτωσης υπάρχει πιθανότητα δυσλειτουργίας.

4.2 Οδηγός αναγνώρισης βηματικού κινητήρα

4.2.1 Τύπος κινητήρα

Διπολικός κινητήρας

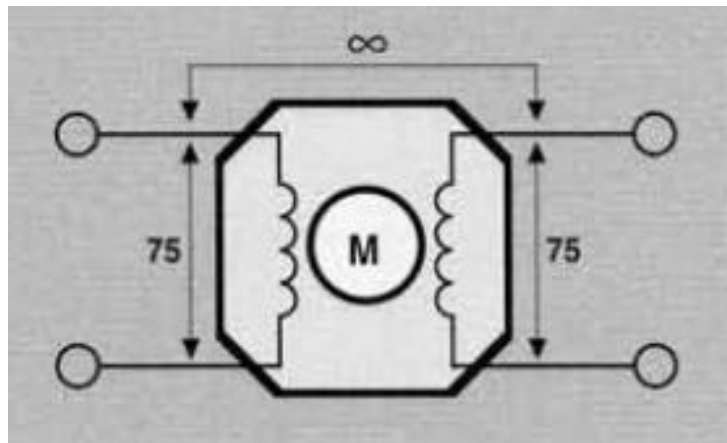
Ένας διπολικός κινητήρας διαθέτει τυλίγματα στα οποία το ρεύμα ρέει προς τη μία κατεύθυνση και στη συνέχεια προς την αντίθετη κατεύθυνση δηλαδή εναλασσόμενα. Αυτή η ροή ρεύματος δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο επίσης αλλάζει κατεύθυνση με αποτέλεσμα την περιστροφή του κινητήρα



Εικόνα 4.1: Διπολικός κινητήρας

Το τύλιγμα ενός διπολικού κινητήρα απαιτεί δύο συνδέσεις και το κύκλωμα οδήγησης θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να αντιστρέφει συνεχώς την εφαρμοζόμενη τάση. Για το σκοπό αυτόν, απαιτείται ένα κύκλωμα με τέσσερα τρανζίστορ σε συνδεσμολογία γέφυρας

Είναι γνωστό ότι ένας βηματικός κινητήρας διαθέτει δύο τουλάχιστον τυλίγματα στάτη. Έτσι όταν ένας βηματικός κινητήρας διαθέτει τέσσερις ακροδέκτες είναι σχεδόν σίγουρο ότι είναι διπολικός. Ο έλεγχος των τυλιγμάτων και οι απαραίτητες συνδέσεις στην περίπτωση αυτή φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.

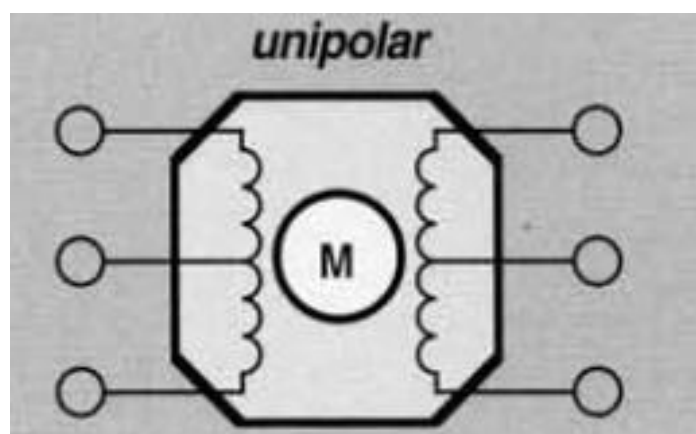


Εικόνα 4.2: Οι συνδέσεις του διπολικού κινητήρα

Το ένα τύλιγμα συνδέεται στους δύο ακροδέκτες εξόδου π.χ. Α, Β του τροφοδοτικού-γέφυρα και το άλλο στους άλλους δύο C,D. Η αντιμετάθεση των συνδέσεων σε ένα (πρώτο) από τα δύο τυλίγματα έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή φοράς περιστροφής του κινητήρα.

Μονοπολικός κινητήρας

Ένας μονοπολικός κινητήρας διαθέτει τυλίγματα με μεσαία λήψη όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3. που ακολουθεί.



Εικόνα 4.3: Μονοπολικός κινητήρας

Το τύλιγμα αυτό απαιτεί τρεις συνδέσεις. Η μεσαία λήψη θα πρέπει να συνδεθεί στη γραμμή του θετικού δυναμικού της τάσης τροφοδοσίας. Αν ο ακροδέκτης αρχής του τυλίγματος συνδεθεί με τη γείωση του τροφοδοτικού και η επαφή του τέρματος μείνει ανοιχτή τότε θα υπάρξει ροή ρεύματος στο πρώτο μισό του τυλίγματος. Αν η επαφή τέρματος συνδεθεί στη γείωση (με ανοιχτή την επαφή αρχής) τότε θα υπάρξει ροή ρεύματος στο δεύτερο μισό του τυλίγματος. Η ροή του ρεύματος στο δεύτερο μισό του τυλίγματος θα έχει αντίθετη φορά και έτσι το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται θα είναι επίσης αντίθετο (ανεστραμμένο).

Ετσι το κύκλωμα λειτουργίας/οδήγησης του κινητήρα θα είναι απλό και για την απαιτούμενη λειτουργία θα συνδέεται κάθε φορά η γείωση του τροφοδοτικού με την αρχή ή με το τέλος του τυλίγματος.

Όταν ένας βηματικός κινητήρας διαθέτει πέντε (κοινή μεσαία λήψη και για τα δύο τυλίγματα) ή έξι ακροδέκτες είναι σχεδόν σίγουρο ότι είναι μονοπολικός. Σε περίπτωση κινητήρα με περισσότερους ακροδέκτες, δεν είναι δυνατή η αναγνώρισή του αμέσως. Είναι απαραίτητο να ανοιχθεί το κάλυμμα του κινητήρα και να διαπιστωθεί το είδος του από τις εσωτερικές ηλεκτρικές του συνδέσεις.

Έχοντας προσδιορίσει τον τύπο του κινητήρα, στη συνέχεια θα πρέπει να βρεθεί ποιοι ακροδέκτες ανήκουν σε κάθε τύλιγμα. Με τη βοήθεια ενός πολύμετρου μετράμε την αντίσταση μεταξύ των ακροδεκτών και συντάσσουμε μια λίστα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Είναι γνωστό ότι: η αντίσταση που εμφανίζεται μεταξύ των επαφών αρχής και τέρματος ενός τυλίγματος είναι

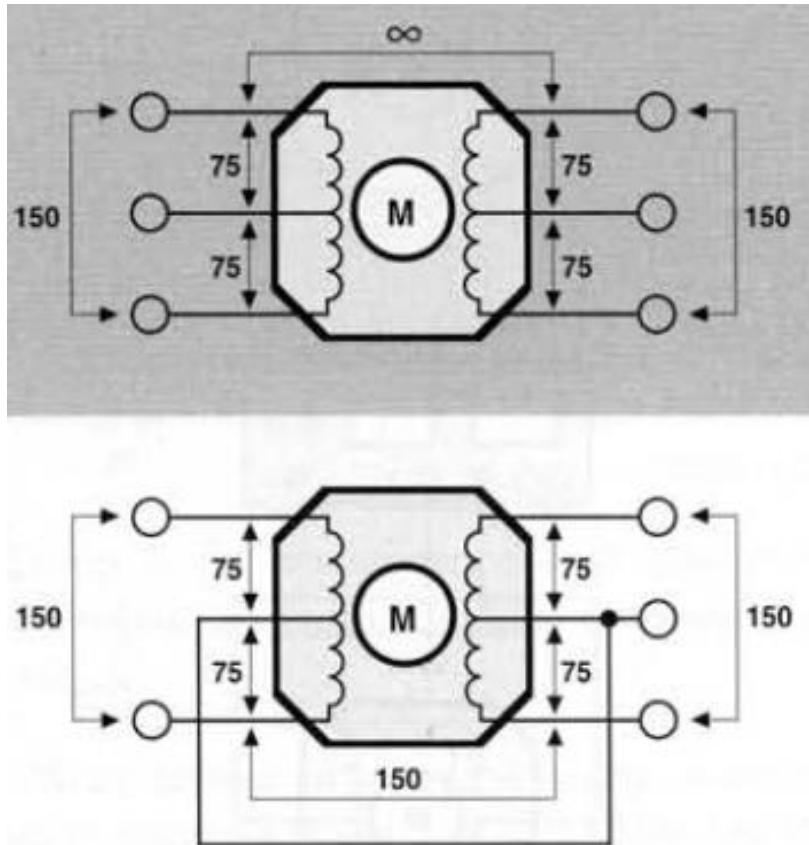
χαμηλή, η αντίσταση ανάμεσα στη μεσαία λήψη και σε ένα από τα άκρα ενός τυλίγματος θα έχει τη μισή τιμή σε σχέση με εκείνη που μετρήθηκε σε ολόκληρο το τύλιγμα. Μεταξύ διαφορετικών τυλιγμάτων θα πρέπει να μετρηθεί άπειρη αντίσταση ή τουλάχιστον μερικά ΜΩ. Με τον τρόπο αυτό γενικά είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε ποιες συνδέσεις ανήκουν σε κάθε ένα από τα υπάρχοντα τυλίγματα.

Όταν ένας μονοπολικός κινητήρας διαθέτει μια μεσαία λήψη κοινή και για τα δύο τυλίγματα (5 συνολικά ακροδέκτες) τότε είναι αδύνατο να προσδιορίσουμε την αντιστοιχία ακροδεκτών και τυλιγμάτων. Στην περίπτωση αυτή, ο ακροδέκτης που αντιστοιχεί στη μεσαία λήψη, θα παρουσιάζει την ίδια τιμή αντίστασης σε σχέση με όλους τους άλλους ακροδέκτες.

Όσον αφορά την τροφοδοσία του κινητήρα μέσω γέφυρας με ακροδέκτες εξόδου (A,B) και (C,D) στην περίπτωση μονοπολικού κινητήρα 6 ακροδεκτών οι μεσαίες λήψεις συνδέονται στον θετικό ακροδέκτη της τάσης τροφοδοσίας της γέφυρας και τα άκρα των τυλιγμάτων στα αντίστοιχα ζεύγη ακροδεκτών εξόδου της γέφυρας (A,B) και (C,D) αντίστοιχα.

Η αντιμετάθεση της σύνδεση των ακροδεκτών A και B αντιστρέφει τη φορά περιστροφής του κινητήρα. Για την εναλλαγή των συνδέσεων θα πρέπει πρώτα να αποσυνδέεται η τάση τροφοδοσίας της γέφυρας.

Στη περίπτωση μονοπολικού βηματικού κινητήρα 5 επαφών είναι φανερό ότι ο θετικός ακροδέκτης της τάσης τροφοδοσίας συνδέεται στον κοινό ακροδέκτη της μεσαίας λήψης των τυλιγμάτων και οι υπόλοιποι ακροδέκτες όπως παραπάνω. Η αυθαίρετη σύνδεση των άκρων των υπολοίπων τυλιγμάτων στους ακροδέκτες A,B και C,D μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την κανονική λειτουργία του κινητήρα ή την λειτουργία με δονήσεις που είναι μία μη κανονική λειτουργία. Όταν συμβεί αυτό εναλλάσσουμε συνεχώς τις συνδέσεις των ακροδεκτών μεταξύ τους μέχρι να επιτευχθεί η κανονική λειτουργία.



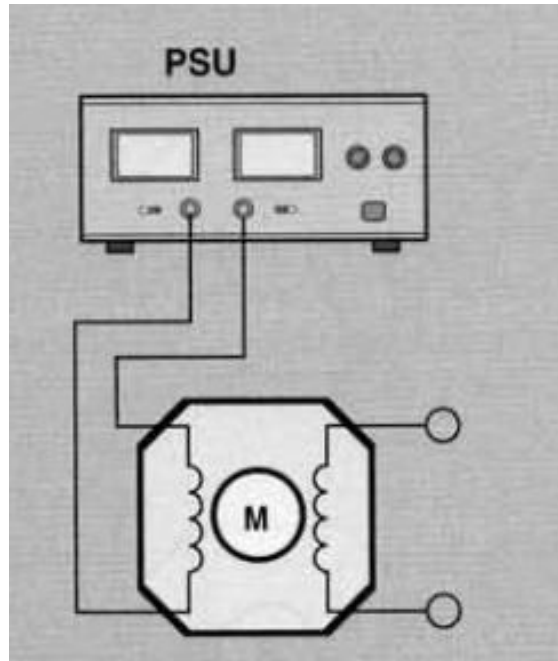
Εικόνα 4.4: Οι συνδέσεις του μονοπολικού κινητήρα

4.2.2 Χαρακτηριστικά

Τάση – ρεύμα λειτουργίας

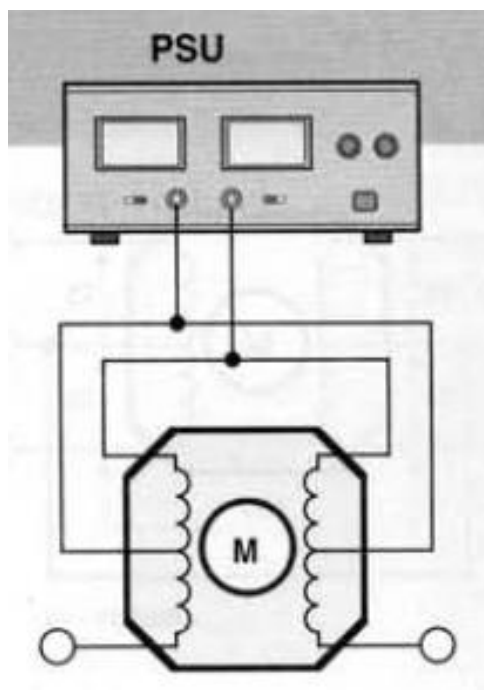
Συνήθως αναγράφεται στην πινακίδα του κινητήρα. Αν δεν αναγράφεται υπάρχει τρόπος να προσδιορίσουμε την τάση λειτουργίας του έμμεσα όπως θα αναπτύξουμε στη συνέχεια. Αρχικά είναι πιθανό να γνωρίζουμε την τιμή της τάσης τροφοδοσίας του κυκλώματος από το οποίο «προήλθε» ή προορίζεται ο βηματικός κινητήρας που εξετάζουμε. Για παράδειγμα ένας βηματικός κινητήρας από έναν τυπικό οδηγό δισκέτας (floppy drive) λειτουργεί είτε στα 5 είτε στα 12Volt. Αν ωστόσο δεν υπάρχει καμία πληροφόρηση για την ακριβή τιμή της τάσης τροφοδοσίας, τότε μπορεί να γίνει μια εκτίμηση με τη βοήθεια της παρακάτω μεθόδου.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή συνδέουμε τον βηματικό κινητήρα σε ένα τροφοδοτικό μεταβλητής τάσης. Στην περίπτωση διπολικού κινητήρα συνδέουμε ένα τύλιγμά του στο τροφοδοτικό μεταβλητής τάσης όπως φαίνεται στο σχέδιο που ακολουθεί.



Εικόνα 4.5: Μέτρηση της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης λειτουργίας σε διπολικό κινητήρα

Στην περίπτωση μονοπολικού κινητήρα συνδέουμε και τα δύο τυλίγματα στο τροφοδοτικό μεταβλητής τάσης όπως φαίνεται στο σχέδιο 4.6.



Εικόνα 4.6: Μέτρηση της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης λειτουργίας σε μονοπολικό κινητήρα

Ρυθμίζουμε την τάση του τροφοδοτικού σε μερικά volts και περιμένουμε για λίγα λεπτά. Αγγίζουμε τον κινητήρα για να αισθανθούμε αν έχει αυξηθεί η θερμοκρασία του. Αν όχι, αυξάνουμε περαιτέρω την τάση του τροφοδοτικού και μετά από μερικά λεπτά ξαναελέγχουμε τη θερμοκρασία του κινητήρα. Επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία μέχρι η θερμοκρασία του κινητήρα οριακά να μην επιτρέπει να αγγιχθεί. Η τιμή της τάσης αυτής θα αποτελεί μία ικανοποιητική εκτίμηση της μέγιστης επιτρεπόμενης τάση λειτουργίας για τον συγκεκριμένο κινητήρα.

Ο προσδιορισμός του ρεύματος μπορεί να γίνει κατευθείαν με μέτρηση από την παραπάνω διαδικασία ή να προκύψει από τη διαίρεση της τάσης με την ωμική αντίσταση του τυλίγματος.

Λογισμικό για βηματικούς κινητήρες

Τρία παραδείγματα σε τρεις διαφορετικές γλώσσες

Των Karel Walraven και David Daamen

Σε άλλο άρθρο αυτού του τεύχους αναφερόμαστε σε μια τυπική κατασκευή με βηματικούς κινητήρες. Η κατασκευή αυτή για να "δουλέψει" χρειάζεται και το κατάλληλο λογισμικό το οποίο δημοσιεύουμε σε μορφή πηγαίου κώδικα στις επόμενες σελίδες. Θα εξηγήσουμε το πώς σκεφθήκαμε για να το φτιάξουμε, όπως επίσης και κάποιες εναλλακτικές μεθόδους που μας οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα.

Στόχος μας ήταν να κάνουμε το λογισμικό όσο πιο απλό γινόταν. Κάτι τέτοιο επιπηρετεί τόσο εμάς στην διακπεραίωση της τελικής εφαρμογής, όσο και εσάς που, αφού το κατανοήσετε, θα μπορείτε να το ενσωματώσετε σε μελλοντικές κατασκευές σας. Το πρώτο πρόγραμμα έχει αναπτυχθεί σε συμβολική γλώσσα. Το δεύτερο στην περισσότερο "βαλκή" γλώσσα C. Αν εξάρτητο από το ποια παραλλαγή θα διαλέξετε, και τα δύο προτιμούνται να "μιάνουν" στην πλακέτα του μικροϋπολογιστή Flash AT89C8252 που δημοσιεύσαμε στο τεύχος του Ιανουαρίου 2002. Το τρίτο πρόγραμμα έχει γραφτεί σε Visual Basic και εκτελείται σε οποιοδήποτε PC εφοδιασμένο με το πακέτο Office. Με τη βοήθεια του μπορείτε να παράγετε όλα εκείνα τα σχήματα που απαιτεί ένας θεματικός κινητήρας χωρίς να καταφύγετε στη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού.

Η συμβολική γλώσσα

Για λόγους που αφορούν την κατανόηση της σχέσης μεταξύ υλικού - λογισμικού θα αναφερθούμε πρώτα στο πρόγραμμα που είναι γραμμένο σε συμβολική γλώσσα. Τα προγράμματα αυτού του τύπου ξεχωρίζουν από τις επεκτάσεις των ονομάτων τους που είναι (συνήθως) .asm. Για την ανάπτυξη τους ο σχεδιαστής βασίστηκε στο πακέτο Prowiew32, το οποίο ανάμεσα σε όλα τα άλλα εργαλεία, περιλαμβάνει και ένα

Στις πρώτες γραμμές του **προγράμματος 1** καθορίζεται ποιες ακίδες του μικροελεγκτή θα συμπεριφέρονται σαν εισοδοί και σαν έξοδοι. Οι ακίδες P1.6, P1.7 δέχονται τις καταστάσεις που εφαρμόζουν οι δύο πιεστικοί διακόπτες, ενώ οι P3.4, P3.5 παράγουν ορθογώνια σήματα. Οι ορισμοί έχουν γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε ακόμα και αν προσδιορίσετε κάποια άλλα ονόματα ακίδων, οι δύο πρώτες θα είναι πάντα εισοδοί και οι δεύτερες πάντα έξοδοι.

Αμέσως μετά τους ορισμούς των ακίδων αρχίζει το κυρίως πρόγραμμα με το οποίο επιχειρείται ο έλεγχος της κατάστασης του πιεστικού διακόπτη Button_17. Αν αυτός βρίσκεται στην κατάσταση ηρεμίας (μηψηλή στάθμη) τότε ο μικροελεγκτής διακλαδώνει στη θέση 'ow'. Εκεί ελέγχεται ο δεύτερος διακόπτης, ο Button_16. Αν και αυτός βρίσκεται στη κατάσταση ηρεμίας, τότε το πρόγραμμα διακλαδώνει πάλι στη θέση 'ow'. Είναι προφανές πως όσο και οι δύο διακόπτες βρίσκονται σε ηρεμία το πρόγραμμα παραμένει εγκλωδισμένο στον παραπάνω απόρριονα θρόχο.

Με την πίεση ενός εκ των δύο πιεστικών διακοπών αλλάζει η κατάσταση είτε της ακίδας P1.6 είτε της P1.7 (πάρτει' στο δυναμικό της γης). Σε αυτήν την περίπτωση, το πρόγραμμα "θγαίνει" από το θρόχο και σπεύδει να εκτελέσει τις εντολές που ακολουθούν την εντολή που "υνέλαβε" τον πιεσμένο διακόπτη. Πιο αν-

υψηλή στάθμη εκτελείται μια ρουτίνα καθυστέρησης, η L_2 οδηγείται σε υψηλή στάθμη, η L_1 επιστρέφει σε χαμηλή, εκτελείται άλλη μια καθυστέρηση, η L_2 γυρίζει και αυτή σε χαμηλή στάθμη και τέλος, ο μικροελεγκτής χρονοτριβεί για άλλη μια φορά "τρέχοντας" πάλι τη ρουτίνα καθυστέρησης. Όλες οι παραπάνω ενέργειες έχουν σα σκοπό την παραγωγή μιας ορθογώνιας κυματομορφής, η οποία επαυλαμβάνεται όση ώρα ο χρήστης κρατάει πιεσμένο το διακόπτη.

Η ρουτίνα καθυστέρησης αποτελείται από δύο "φιαλασμένους" θρόχους ή, καλύτερα, από ένα θρόχο μέσα σε ένα άλλο θρόχο. Ο εσωτερικός θρόχος φορτώνει τον καταχωρητή R0 με τον αριθμό 255 και τον μειώνει έως ότου τον μηδενίσει. Η εργασία αυτή πραγματοποιείται είκοσι συνεχόμενες φορές, όσες δηλαδή ορίζει ο καταχωρητής R1 του εξωτερικού θρόχου. Παιζόντας με τις τιμές των δύο καταχωρητών μπορείτε να επεμβατε στη διάρκεια των παραγόμενων ορθογώνιων παλμών, αλλάζοντας στην ουσία την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.

Θα συμφωνήσετε και εσείς πως ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι το απλούστερο και το πλέον κατανοητό που θα μπορούσε να γραφτεί για τον έλεγχο ενός ή περισσότερων θεματικών κινητήρων.

Η γλώσσα C

Λίστα 1. Πρόγραμμα γραμμένο σε assembler

```

: Stepper motor software for use with the 89S8252 flash board
:
: Horst Hubert
:
: Two switches are used to control the motor. One between
: P1.7 and GND (Button_17 for turning clockwise) and one between
: P1.6 and GND (Button_16 for turning counter clockwise).
: Turning cw/ccw is an assumption: the actual direction is of course
: dependent on how the motor is connected.
: In the cw direction, the motor will turn at higher speed than in
: ccw direction.

: Declarations
: -----
Button_17 equ    P1.7
Button_16 equ    P1.6

L_1      equ    P3.4
L_2      equ    P3.5

org      0000h

: Turning cw
: -----
cw:  jb      Button_17,cw
:
cw1:  setb   L_1 ;coil 1 high
      call  zsr
      setb   L_2 ;coil 2 high
      call  zsr
      clr   L_1 ;coil 1 low
      call  zsr
      clr   L_2 ;coil 2 low
      call  zsr
      sjmp  cw

: Turning ccw
: -----
ccw:  jb      Button_16,ccw
:
ccw1: setb   L_1 ;coil 1 high
      call  zsl
      clr   L_2 ;coil 2 low
      call  zsl
      clr   L_1 ;coil 1 low
      call  zsl
      setb   L_2 ;coil 2 high
      call  zsl
      sjmp  ccw

: Delay for turning cw
: -----
zsr:  mov    R0,#255
      mov    R1,#20
zsr1: djnz   R0,zsr1
      djnz   R1,zsr1
      ret

: Delay for turning ccw
: -----
zsl:  mov    R0,#255
      mov    R1,#255
zsl1: djnz   R0,zsl1
      djnz   R1,zsl1
      ret

end

```

μα (Πρόγραμμα 2) γραμμένο σε γλώσσα C είναι αναμφισβήτητα πολύ πιο συμπαγές και περιεκτικό. Όπως και το προηγούμενο, έτσι και αυτό, ξεκινάει με τις απαραίτητες δηλώσεις. Στην πρώτη γραμμή βλέπουμε την εντολή φόρτωσης ενός αρχείου που περιέχει όλες εκείνες τις δεσμευμένες λέξεις που αφορούν το συγκεκριμένο μικροελεγκτή. Σημειώνουμε ότι τέτοιου είδους αρχεία έχουν πάντα επέκταση .h και διατίθενται από τους κατασκευαστές των επεξεργαστών που υποστηρίζονται από τη γλώσσα.

Στη συνέχεια ορίζονται οι ακίδες εισόδου και εξόδου όπως ακριβώς κάναμε και στο προηγούμενο παράδειγμα. Η εντολή Sbit πληροφορεί το μεταγλωττιστή πως η με-

κροελεγκτή. Η ακίδα αυτή χαρτογραφείται στον εσωτερικό χάρτη μνήμης του εξαρτήματος στη θέση B4h. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την 'περίεργη' αυτή διευκολυστικότητα σας παραπέμπουμε στο τεχνικό εγχειρίδιο του AT-89C8252 (ενότητα: 'special function registers'). Αμέσως μετά, το πρόγραμμα προχωράει θάζοντας στο παιχνίδι τις μεταβλητές i, j και k, οι οποίες ορίζονται σαν ακέραιες (int) με εύρος 2 byte).

Η ρουτίνα καθυστέρησης για την οποία μιλήσαμε στο πρόγραμμα της συμβολικής γλώσσας αποτελεί και αυτή αναπόσπαστο κομμάτι του τρέχοντος προγράμματος. Υλοποιείται με τη βοήθεια μιας υπορουτίνας (ορθότερα συνάρτησης) η οποία πρέ-

ραου αριθμού που ακολουθεί το όνομα της. Γι' αυτόν το λόγο άλλωστε, σημειώνεται μέσα στα άγκιστρα που ακολουθούν το όνομά της η λέξη int. Η λέξη void που έχει γραφτεί πριν το όνομα της συνάρτησης δηλώνει πως αυτή καθ' αυτή η συνάρτηση δεν επιστρέφει καμία τιμή στο πρόγραμμα που την κάλεσε. Ίσως αυτά που είπαμε μέχρι εδώ σας κοίρασαν και να αναρωτιέστε σε τι χρειάζονται όλες αυτές οι πολύπλοκες δηλώσεις. Η απάντηση είναι προφανής: οι μεταγλωττιστές γλωσσών υμηλοί επιπέδου απαιτούν ένα σχετικά μεγάλο όγκο στοιχείων για να καταφέρουν να παράγουν συνεκτικό κώδικα κατάλληλο για τις (σχετικά) μικρές μνήμες προγράμματος των μικροελεγκτών. Τα στοιχεία αυτά

Λίστα 2. Πρόγραμμα C

(*Stepper motor software for use with the 89S8252 flash board

Horst Hubert

Two switches are used to control the motor. One between P1.7 and GND (Button_17 for turning clockwise) and one between P1.6 and GND (Button_16 for turning counter clockwise). Turning cw/ccw is an assumption: the actual direction is of course dependent on how the motor is connected. The values of j and k determine the speed of the motor. The motor only runs when one of the two buttons is pressed.

This source code is intended for use with FSF's ProView32 compiler

```
*)
#include <reg51.h>

sbit at 0xB4 L_1;
sbit at 0xB5 L_2;
sbit at 0x96 Button_16;
sbit at 0x97 Button_17;

int i;
int j;
int k;
void delay(int); //Function declaration

void main()
{
    while(1) //infinite loop
    {
        while(Button_17) //turning cw
        {
            j=4000;

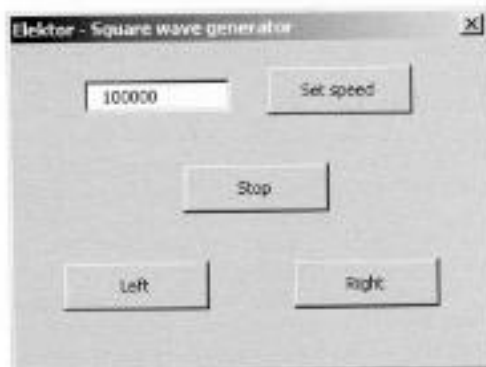
            L_1 = 1;
            delay(j);
            L_2 = 1;
            delay(j);

            L_1 = 0;
            delay(j);
            L_2 = 0;
            delay(j);

            while(Button_16) //turning ccw
            {
                k=200;

                L_1 = 1;
                delay(k);
                L_2 = 0;
                delay(k);
                L_1 = 0;
                delay(k);
                L_2 = 1;
                delay(k);
            }
        }
    }

    void delay(int m)
    {
        for(i=0; i<m; i++);
    }
}
```



Σχ. 1. Η μακροεντολή που είναι αποθηκευμένη μέσα σε ένα αυθηθασμένο αρχείο του Word παράγει σήματα στις ακίδες της παράλληλης θύρας επαρκή για τον έλεγχο του κινητήρα.

Και μετά από όλα αυτά καιρός να κοιτάξουμε και το κύριο πρόγραμμα που ξεκινάει πάντοτε με τη λέξη main. Θα παρατηρήσετε ασφαλώς πως τα άγκιστρα που ακολουθούν την παραπάνω λέξη είναι πάντα κενά. Αυτό οφείλεται στο ότι, το συγκεκριμένο τμήμα προγράμματος δεν δέχεται ούτε επιστροφή κάποιες τιμές. Γι' αυτό, άλλωστε, αποκαλείται 'κύριο πρόγραμμα'. Η πρώτη εντολή του ορίζει την αρχή μιας τυπικής δομής επανάληψης τύπου While(!) η οποία δεν τερματίζεται ποτέ. Πιο συγκεκριμένα μας λέει πως θα εκτελούνται όλες οι εντολές που την ακολουθούν για όση ώρα

η ποσότητα '1' θα έχει τιμή ίση με τη μονάδα (δηλαδή πάντα!).

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε ένα άλλο θρόκο στον οποίο εισέρχεται το πρόγραμμα κάθε φορά που ο πιεστικός διακόπτης Button_17 εφαρμόζει στην ακίδα που είναι συνδεδεμένος χαμηλή στάθμη. Το θαυμαστικό δηλώνει την σύγκριση με το αντίστροφο του λογικού '1', δηλαδή με το λογικό '0'. Από τη στιγμή που εξακριβωθεί η ύπαρξη χαμηλής στάθμης εκτελείται το σύνολο των εντολών που περιλαμβάνονται ανάμεσα στις δύο αγκυλές.

Θα καταλάβετε φυσικά πως οι παραπάνω εντολές έχουν σε σκοπό την παραμετροποίηση και τη κλήση της ρουτίνας καθυστέρησης. Με τη βοήθειά της περιορίζεται ο κινητήρας, όπως άλλωστε είδαμε

Listing 3. Visual Basic program: the most important parts

```

'Elektor Example Square Wave Generator for use with Stepper Motor Driver
'030293-11 May 2004
'...
'This examples employs inout32.dll. Copy this DLL to /windows/system32.
'See http://www.logix4u.net/

Public Declare Sub Out Lib "inout32.dll" _
Alias "Out32" (ByVal PortAddress As Integer, _
ByVal Value As Integer) 'use external
library for direct I/O access
Public Delay As Long
Public Run As Boolean
Public Cw As Boolean
Public Cc As Boolean

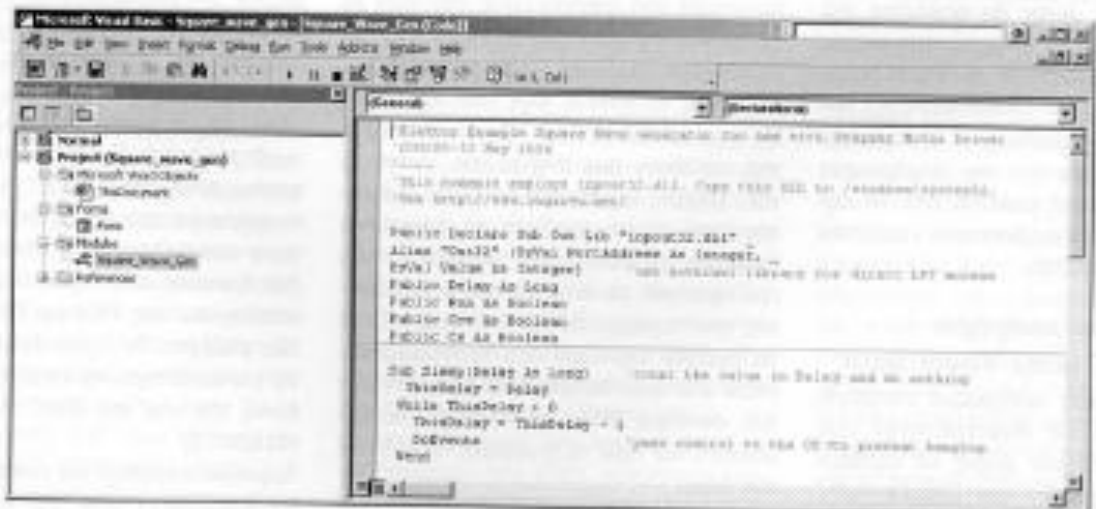
Sub Sleep(Delay As Long) 'count the value in
Delay and do nothing
ThisDelay = Delay
While ThisDelay > 0
ThisDelay = ThisDelay - 1
DoEvents 'pass control to the OS to
'prevent hanging
Wend
End Sub

Sub Square_Wave_Generator() 'hide the main
Word window and show the macro form
'show Word again after exiting
Documents("Square_wave_gen.doc").Windows(1).Vi
sible = False
Form.Show

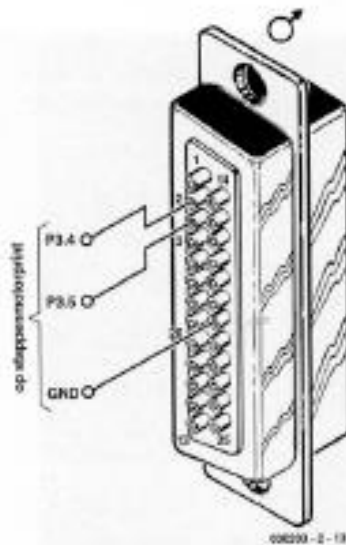
Documents("Square_wave_gen.doc").Windows(1).Vi
sible = True
End Sub

Sub Output(Port As Integer) 'generate some
square waves
Out (Port), 0 'reset printer port
While Run
While Cw
Out 888, 1 'turn clockwise: make
'output 1 high first
Sleep Delay 'pause for one half
'period
Out 888, 1 'switch on the second
'output too (90 degrees)
Sleep Delay
Out 888, 2 'switch off first output
Sleep Delay
Out 888, 0 'switch off second output
'too
Sleep Delay
DoEvents 'pass control to the OS
'to prevent hanging
Wend
While Cc
Out 888, 1 'reverse: both outputs
'high
Sleep Delay
Out 888, 1 'switch off second output
Sleep Delay
Out 888, 0 'switch off first output
'too
Sleep Delay
Out 888, 2 'switch output 2 on again
Sleep Delay
DoEvents
Wend
DoEvents
Wend

```



Εκ. 2 Η μικροεναλλαγή όπως εμφανίζεται στον κωδικολογιστή της Visual Basic.



Σχ. 3. Σύνδεση της πλακέτας ελέγχου με τον PC.

να συμβάλει και στο πρόγραμμα της συμβολικής γλώσσας. Κατ' αρχήν φορτώνεται στη μεταβλητή j ο αριθμός 4000. Στη συνέχεια η εξέδρος L_1 αποκτά την τιμή 1, για να κληθεί κατόπιν η ρουτίνα καθυστέρησης. Σημειώνουμε πως η διάρκεια των παραγόμενων παλμών εξαρτάται από την τιμή της μεταβλητής j .

Οι εντολές που ακολουθούν έχουν ακριβώς την ίδια δομή με τις προηγούμενες, μόνο που τώρα ελέγχεται ο δεύτερος πιεστικός διακόπτης της κατασκευής. Το τελευταίο κομμάτι του προγράμματος αφορά στην ρουτίνα καθυστέρησης. Για την υλοποίηση της αρκεί μόνο μία μοναδική κώδικα η οποία φιλοξενεί ένα τυπικό θρόχο For βασισμένο στη μεταβλητή ελέγχου i . Ο θρόχος αυτός θα εκτελεστεί για όση ώρα η μεταβλητή i διατηρείται μικρότερη ή ίση της ποσότητας m (μέχρι δηλαδή $i > m$). Σε κάθε μια ανακύκλωση η i αυξάνεται κατά μια μονάδα ($i++$). Η τιμή της m φθάνει στην ρουτίνα σαν παράμετρος τη στιγμή που αυτή καλείται από το κυρίως πρόγραμμα. Συνήθετες τιμές της είναι οι 200 και 4000.

Έλεγχος του κινητήρα από τον PC μέσω Visual Basic

Το τελευταίο μας πρόγραμμα επιτρέπει να γνωρίσουμε τις ιδιαιτερότητες των θεματικών κινητήρων χωρίς να καταργούμε στις υπερβολές του μικροελεγκτή Flash. Ο κινητήρας συνδέεται στην παράλληλη θύρα του υπολογιστή μας, ενώ

τον έλεγχο του αναλαμβάνει ένα απλό πρόγραμμα γραμμένο σε Visual Basic. Θυμίζουμε πως η γλώσσα αυτή φιλοξενείται (σε μια απλή μορφή της) στο πακέτο εφαρμογών γραφείου Office της Microsoft. Θα χρειαστείτε ακόμα ένα μικρό βοηθητικό πρόγραμμα το οποίο επιτρέπει τη διαχείριση των σημάτων της παράλληλης θύρας, κάνοντας τα Windows NT και XP να 'ερχόσασιν' τις απαγορεύσεις που επιβάλλουν σε όποιον επιχειρεί να προσπελάσει άμεσα το υλικό του υπολογιστή. Το πρόγραμμα αυτό (InpOut32.dll) θα το αντιγράψετε στον φάκελο (windows\system32 του υπολογιστή σας. Το ίδιο πρόγραμμα δουλεύει εξ ίσου καλά και με τα Windows 98 και Me, αλλά αρνείται να συνεργαστεί με τα 95.

Το πρόγραμμα που ελέγχει τον κινητήρα είναι στην πραγματικότητα μια μακροεντολή κατάλληλη να 'τρέχει' μέσα από τον Επεξεργαστή Κεμάτων Word. Τα πιο σημαντικά σημεία του φαίνονται στο **Πρόγραμμα 3**.

Και εδώ ξεκινάμε με τις απαραίτητες δηλώσεις, για να ακολουθήσουν η ρουτίνα καθυστέρησης, η συνάρτηση που εμφανίζει το παράθυρο μακροεντολής (σχ. 1) ελαχιστοποιώντας προσωρινά το Word και, τέλος μια ακόμα συνάρτηση που αλλάζει την κατάσταση των ακίδων εξόδου σύμφωνα με μια προκαθορισμένη σειρά. Στο ίδιο πρόγραμμα φιλοξενούνται και αρκετές ακόμα γραμμές κώδικα, για τις οποίες όμως ο περιορισμένος χώρος του περιοδικού δεν μας επιτρέπει να κάνουμε αναφορά. Το έγγραφο του Word που περιέχει την παραπάνω μακροεντολή προσφέρεται δωρεάν από το δακτυακό τόπο του Ελέκτορ (αρχείο 030203-11). Πρωταύτο ανοίξετε, φροντίστε να έχετε ακυρώσει την προστασία από μακροεντολές που είναι εξ ορισμού ενεργοποιημένες μέσα από το περιβάλλον του Word. Για να το καταφέρετε, αρκεί να κάνετε κλικ στα Εργαλεία/Μακροεντολή/Ασφάλεια και να τσεκάρτε στο παράθυρο που ανοίγει την 'μεσαία' ή την 'χαμηλή' προστασία. Αν μετά από αυτήν την κίνηση ανοίξετε το παραπάνω έγγραφο και απαντήσετε καταφατικά στο ερώτημα για το άνοιγμα της μακροεντολής που περιέχει, θα δείτε να εμφανίζεται το σχετικό παράθυρο του προγράμματος. Μέσα από αυτό θα μπορούσατε να ελέγξετε τον κινητήρα. Μόλις το κλείσετε, θα εμφανιστεί και πάλι το (γνώριμα) περιβάλλον του Word.

Μπορείτε τώρα να ανοίξετε τον κεμενογράφο της Visual Basic πιέζοντας απλώς

το F11 (σχ. 2). Στο δεξί του μέρους θα δείτε 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. Με μια σύντομη ματιά στον κώδικα της φόρμας είναι βέβαιο πως θα αντιληφθείτε αμέσως τη λειτουργία του προγράμματος.

Λειτουργία

Όλο το λογισμικό που περιγράψαμε παραπάνω διατίθεται από το δακτυακό τόπο του Ελέκτορ, απ' όπου μπορείτε να το 'κατεβάσετε' δωρεάν. Είμαστε βέβαιοι πως οι κάτοχοι της πλακέτας του Μικροελεγκτή Flash θα έχουν εξοικειωθεί ήδη με τους τρόπους φόρτωσής του στη μνήμη του συστήματος. Για τους 'ερασιμαθούς' (ή για τους πιο νέους) χρήστες της πλακέτας υπάρχουν πάντοτε οι απαραίτητες οδηγίες στο τεύχος του Ιανουαρίου 2002.

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 εισάγετε έναν αριθμό που καθορίζει τη συχνότητα των σημάτων στη θύρα του εκτυπωτή (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 δείτε τον αριθμό που 'ταιριάζει' περισσότερο στο δικό σας υπολογιστή θα χρειαστεί να κάνετε μια σειρά δοκιμών.

Στο **σχ. 3** φαίνεται η πίσω όψη ενός συνδετήρα sub D 25 ακίδων μέσω του οποίου συνδέεται η πλακέτα ελέγχου του κινητήρα με τον υπολογιστή. Για τη σύνδεση απαιτούνται τρία μόνο καλώδια. Τα δύο ξεκινούν από τις ακίδες 2 και 3 και καταλήγουν στις P3.4 και P3.5 της πλακέτας ελέγχου. Το τρίτο ξεκινάει από την 25 του συνδετήρα και καταλήγει στον ακροδέκτη της γης της ίδιας πλακέτας. (030203-2)

Λογισμικό ελεύθερο για κατέβασμα με αριθμό 030203-11 από την διεύθυνση του περιοδικού στο INTERNET.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Dennis Clark, Michael Owings, “Building Robot Drive Trains”, Robot DNA series, Εκδόσεις McGraw-Hill
- V. V. Athani, “Stepper Motors : Fundamentals, Applications And Design”, Εκδόσεις New Age International
- Acarnley Paul, , “Stepping Motors: A guide to theory and practice”, Εκδόσεις The Institute of Electrical Engineers
- <http://users.ntua.gr/dpiperid/MyWebPage/Constructions/digital/bipstepper.htm>
- http://www.robolab.tuc.gr/ASSETS/PAPERS_PDF/ROBOTICS/LAB/4_STEPPER&SERVOS_LAB.pdf