



ΤΜΗΜΑ

**ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ



Ανώτατο  
Εκπαιδευτικό  
Ίδρυμα  
Πειραιά

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

## Πτυχιακή Εργασία

Μελέτη και κατασκευή βηματικού κινητήρα

Study and construction of stepper motor



❖ Σπουδαστές:

- Κύργιος Λεωνίδας
- Ανδρέας Χοντάης

❖ Επιβλέπων Καθηγητής:

- Βυλλιώτης Ηρακλής

## Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε των επιβλέπων καθηγητή της πτυχιακής μας εργασίας κύριο Ηρακλή Βυλλιώτη που μας ανέθεσε την εκπόνηση μιας πτυχιακής στην οποία αντλούσαμε μεγάλο ενδιαφέρον. Επίσης ευχαριστούμε όλους του καθηγητές μας που με τον κόπο τους επιδίωξαν και κατάφεραν να μοιραστούν τις γνώσεις τους μαζί μας κατά την διάρκεια τις φοίτησης μας στο τμήμα μέχρι τώρα. Καθώς και των υπεύθυνου του τμήματος ηλεκτρολόγων μηχανικών κύριο Ιωαννίδη που μαζί με τους συναδέλφους του διατηρούν σε υψηλό επίπεδο το τμήμα και το εξελίσσουν καθημερινός.

## Εισαγωγή / Περίληψη

Ο βηματικός κινητήρας ,ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία στο τομέα τον μηχανών. Λειτουργικά είναι παρόμοιος με τους σερβοκινητήρες που έχουν την δυνατότητα έλεγχου της κίνησης σε συγκεκριμένες μοίρες μέσα από drivers. Η ανάγκη της βιομηχανίας να έχει ακριβή έλεγχο της κίνησης για απολυτή αυτοματοποίηση έφερε την επανάσταση σε νέους κινητήρες που θα ελέγχονται μέσω εντολών από κάποιο driver. Αυτό αντικατέστησε πολλά συστήματα της βιομηχανίας που λειτουργούσαν ως τότε με έκκεντρα και διακόπτες στο άξονα τους καθώς και ορισμένες φορές πνευματικά συστήματα. Από την άλλη νέες συσκευές απαιτούσαν την ακριβή μετακίνηση θέσης όπως για παράδειγμα ο 3D printer. Παρά ωστόσο την κοινή λειτουργικότητα των σερβοκινητήρων και των βηματικών κινητήρων υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Στην παρούσα διπλωματική ασχοληθήκαμε με τον βηματικό κινητήρα ο οποίος είναι ο καλύτερος σε εφαρμογές που χρειάζεται ακρίβεια που αγγίζει να μην είναι ορατή στο μάτι. Η βασική διάφορα με τους σερβοκινητήρες είναι ότι συνήθως δεν τους χρησιμοποιούμε σε εφαρμογές στον άξονα τους έχουμε μεγάλο φορτίο. Το ενδιαφέρον για την μελέτη την κατασκευή του βηματικού κινητήρα προήρθε κύριος από την κοινή μας απόφαση να ασχοληθούμε με τον τομέα τον κινητήρων και το θέμα αυτό συνδύαζε την κίνηση μέσα από πολλαπλές μεθόδους έλεγχου που συσχετίζονται με ηλεκτρολογικό, ηλεκτρονικό και προγραμματιστικό χαρακτήρα.

Σύντροφος του βηματικού κινητήρα είναι ο οδηγός του (driver) και ο ελεγκτής του που λειτουργεί σαν παλμογεννήτρια. Το arduino πήρε τον ρόλο αυτόν συνοδευόμενο με έναν συμβατό οδηγό για τον βηματικό κινητήρα μας και όλο το σύστημα μας έχει την δυνατότητα επικοινωνίας με τον υπολογιστή μας από όπου γίνεται ο προγραμματισμός στο τι κίνησης θέλουμε να κάνει ο βηματικός μας κινητήρας.

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

## Περιεχόμενα

### **Κεφάλαιο 1 «Ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος (DC)»**

<b>1.1</b> Εισαγωγή στις ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος (DC).....	Σελίδα 7
<b>1.2</b> Αρχή λειτουργίας των μηχανών (DC) και αναφορά στο φαινόμενο Laplace.....	Σελίδα 7
<b>1.3</b> Δομή των μηχανών DC.....	Σελίδα 9
<b>1.4</b> Κατασκευαστικά μέρη μηχανών DC.....	Σελίδα 12
<b>1.5</b> Μειονεκτήματα μηχανών συνεχούς ρεύματος .....	Σελίδα 15
<b>1.6</b> Εκκίνηση κινητήρων Σ.Ρ.....	Σελίδα 15
<b>1.7</b> Απώλειες μηχανής συνεχούς ρεύματος.....	Σελίδα 15
<b>1.8</b> Ρύθμιση στροφών και ροπής μηχανών συνεχούς ρεύματος.....	Σελίδα 16

### **Κεφάλαιο 2 «Βηματικοί κινητήρες »**

<b>2.1</b> Ιστορική ανάδρομη .....	Σελίδα 17
<b>2.2</b> Γενικές πληροφορίες, Τι είναι ο βηματικός κινητήρας.....	Σελίδα 17
<b>2.3</b> Αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα.....	Σελίδα 18
<b>2.4</b> Δομή ενός βηματικού κινητήρα.....	Σελίδα 19
<b>2.5</b> Φορτίο σε έναν βηματικό κινητήρα.....	Σελίδα 21
<b>2.6</b> Σύγκριση μηχανών συνεχούς ρεύματος με βηματικούς κινητήρες.....	Σελίδα 21
<b>2.7</b> Που χρησιμοποιούνται οι Βηματικοί κινητήρες.....	Σελίδα 21

**Κεφάλαιο 3 «Ειδή βηματικών κινητήρων»**

3.1 Βηματικοί Κινητήρες Μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.....	Σελίδα 25
3.2 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.....	Σελίδα 26
3.3 Υβριδικοί Βηματικοί Κινητήρες.....	Σελίδα 29
3.4 Σύγκριση μεταξύ των ειδών.....	Σελίδα 30

**Κεφάλαιο 4 «Οδήγηση βηματικών κινητήρων»**

4.1 Αρχή λειτουργίας συστήματος έλεγχου βηματικών κινητήρων.....	Σελίδα 31
4.2 Μονοπολικό και διπολικό βηματικό κινητήρες - Συνδεσμολογίες τυλιγμάτων.....	Σελίδα 32
4.3 Σύγκριση μονοπολικής και διπολικής λειτουργίας.....	Σελίδα 33
4.4 Οδήγηση βηματικού κινητήρα.....	Σελίδα 34
4.5 Είδη Οδηγών.....	Σελίδα 35

**Κεφάλαιο 5 «Μέθοδοι βηματισμού(Step modes)»**

5.1 Εισαγωγή.....	Σελίδα 38
5.2 Μονό βήμα ή single step.....	Σελίδα 38
5.3 Ολόκληρου βήματος ή full step.....	Σελίδα 39
5.4 Μισού βήματος.....	Σελίδα 40
5.5 Μικροβηματισμός.....	Σελίδα 42

**Κεφάλαιο 6 «Χαρακτηριστικά βηματικών κινητήρων»**

6.1 Εισαγωγή/Γενικά χαρακτηριστικά.....	Σελίδα 43
6.2 Ροπή στρέψεως.....	Σελίδα 44
6.3 Μέγεθος και δύναμη.....	Σελίδα 44
6.4 Αναπτυσσόμενη ροπή.....	Σελίδα 45
6.5 Χαρακτηριστική Ροπής-Γωνίας.....	Σελίδα 46
6.6 Ακρίβεια της βηματικής γωνίας.....	Σελίδα 47
6.7 Χαρακτηριστική ροπή –ταχύτητας.....	Σελίδα 49
6.8 Μηχανικοί παράμετροι, Φορτίο, Τριβή, Αδράνεια.....	Σελίδα 50
6.9 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Βηματικών Κινητήρων.....	Σελίδα 51

**Κεφάλαιο 7 «Arduino»**

7.1 Εισαγωγή.....	Σελίδα 52
7.2 Ιστορία.....	Σελίδα 52
7.3 Τι είναι το Arduino;.....	Σελίδα 53
7.4 Μικροελεγκτής – η καρδιά του Arduino.....	Σελίδα 54
7.5 Είσοδοι – Έξοδοι.....	Σελίδα 56
7.6 Ρεύμα λειτουργίας.....	Σελίδα 57
7.7 Βασικά Πλεονεκτήματα πλατφόρμας Arduino.....	Σελίδα 58
7.8 Το λογισμικό του Arduino.....	Σελίδα 58
7.9 Ολοκληρωμένο Περιβάλλον Ανάπτυξης του Arduino.....	Σελίδα 59
7.9.1 Η Δομή το προγράμματος.....	Σελίδα 60
7.9.2 Βασικές δομές και λειτουργίες προγραμματισμού.....	Σελίδα 61
7.10 Αναλογικές ακίδες εισόδου (Analog input pins).....	Σελίδα 67

**Κεφάλαιο 8 «Πορεία /Περιγραφή κατασκευής»**

<b>8.1</b> Εισαγωγή.....	Σελίδα 68
<b>8.2</b> Ο βηματικός κινητήρας 28byj-48 5V.....	Σελίδα 69
<b>8.3</b> Πλακέτα οδήγησης ZC-A0591 με το ολοκληρωμένο ULN2003.....	Σελίδα 71
<b>8.4</b> ULN2003.....	Σελίδα 72
<b>8.4.1</b> Ζεύγη Darlington.....	Σελίδα 74
<b>8.5</b> Πλακέτα Arduino uno 3.....	Σελίδα 75
<b>8.6</b> Διαδικασία κατασκευής.....	Σελίδα 75
<b>8.7</b> Κώδικας οδήγησης.....	Σελίδα 77
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	Σελίδα 83

**Παράρτημα**

ULN2003.....	Σελίδα 84
Stepper Motor Driver ZC-A0591.....	Σελίδα 94
Stepper Motor 28byj-48 5V.....	Σελίδα 96

## Κεφάλαιο 1

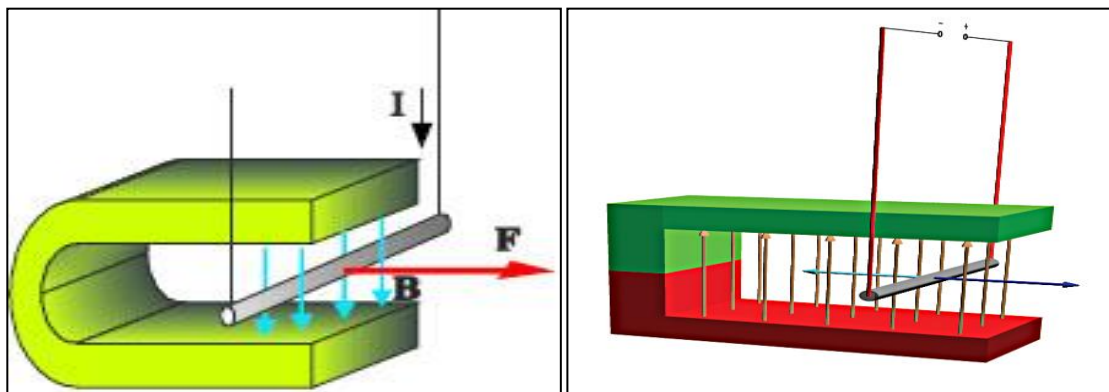
### Ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος (DC)

#### 1.1 Εισαγωγή στις ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος (DC)

Οι ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος κατά κύριο λόγο τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς ρεύματος. Οι κινητήρες αυτοί είναι αρκετά εύχρηστοι ειδικότερα σε εφαρμογές που χρζίζομαστε να ελέγξουμε εύκολα την ταχύτητα τους. Η δυνατότητα αυτή οφείλετε στο ότι σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος η ταχύτητα περιστροφής είναι ανάλογη με την τάση που του εφαρμόζουμε και αντίστοιχα η ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος που διαρρέεται στο τύμπανο.

#### 1.2 Αρχή λειτουργίας των μηχανών (DC) και αναφορά στο φαινόμενο Laplace

Η αρχή λειτουργίας των μηχανών συνεχούς ρεύματος βασίζεται στην μελέτη του Γάλλου επιστήμονα Pierre-Simon Laplace. Το φαινόμενο Laplace ορίζεται ως εξής, όταν ένας ρευματοφόρος αγωγός βρίσκεται εντός ομογενούς μαγνητικού πεδίου δέχεται μια δύναμη λεγόμενη και ως δύναμη Laplace. Η δύναμη αυτή τείνει να κινηθεί των αγωγό προς ορισμένη κατεύθυνση.



Εικόνα 1.1 - Δύναμη Laplace

**Το μέτρο της δύναμης αυτής είναι ανάλογο :**

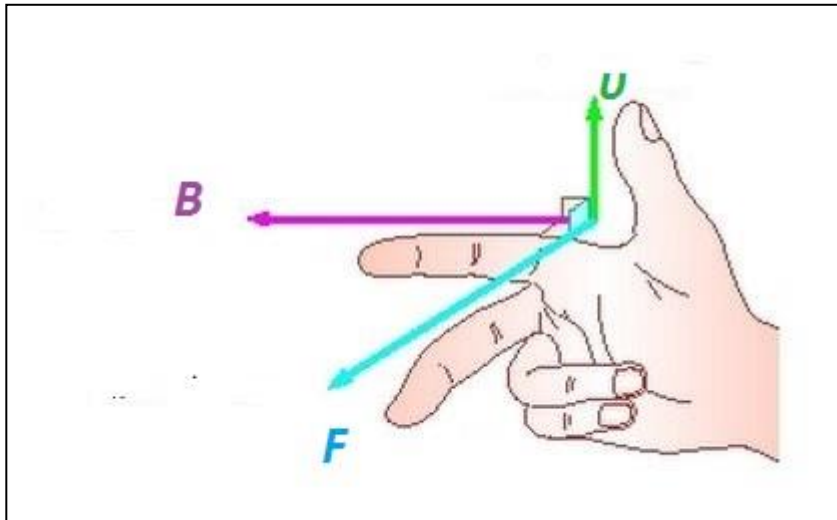
- A)** Με το ενεργό μήκος  $l$  (m) του ρευματοφόρου αγωγού που βρίσκεται μέσα στο ομογενές μαγνητικό πεδίο.
- B)** Με την ένταση  $i$  (A) του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.
- Γ)** Με την ένταση  $B$  (T) του μαγνητικού πεδίου.
- Δ)** Με την γωνία  $\varphi$  που σχηματίζει ο αγωγός με τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών.

Έτσι λοιπόν η δύναμη αυτή διατυπώνεται μέσα από τον ακόλουθο τύπο:

$$F = B \cdot i \cdot l \cdot \eta \mu \varphi$$

Η κατεύθυνση περιστροφής του αγωγού δίνεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού χεριού. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα ο κανόνας των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού εφαρμόζεται ως εξής:

Ο αντίχειρας, ο δείκτης και ο μέσος σχηματίζουν τρισσορθογώνιο σύστημα. Τοποθετούμαι τον αντίχειρα στην κατεύθυνση της κίνησης του θετικού φορτίου και στην αντίθετη αν πρόκειται για αρνητικό. Τοποθετούμαι το δείκτη στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου ( $B$ ). Ο μέσος δείχνει τότε την κατεύθυνση της δύναμης όπως φαίνεται στην εικόνα



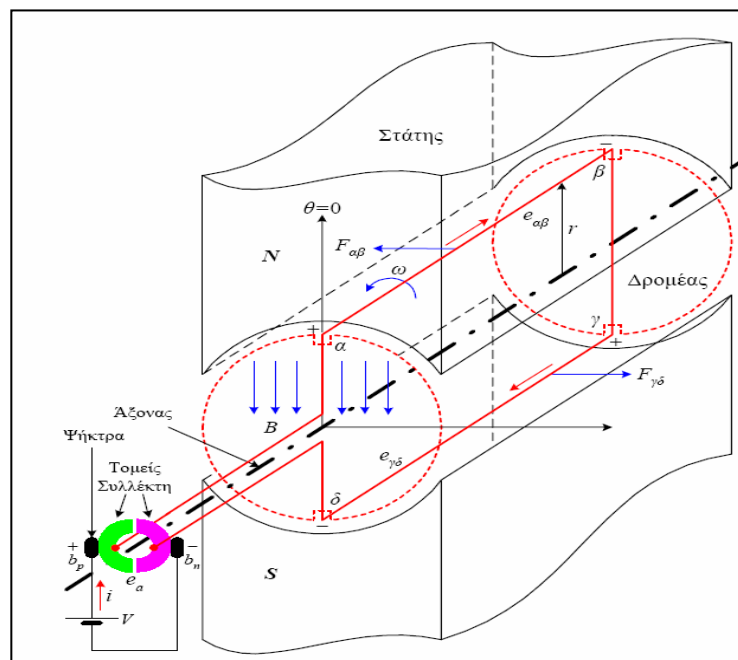
Εικόνα 1.2 – Κατεύθυνση περιστροφής με τον κανόνα των τριών δακτύλων



### 1.3 Δομή μηχανών DC

Στους κλασικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος το ομογενές μαγνητικό πεδίο δημιουργείται μέσω των μόνιμων μαγνητών που βρίσκονται στο στάτη.

Ο δρομέας δηλαδή το κινητό μέρος της μηχανής φέρει στο ένα άκρο του τις ψήκτρες και τους συλλέκτες της μηχανής οι οποίοι έχουν σημαντικό ρόλο στην λειτουργία του καθώς ο ρόλος τους είναι να αντιστρέφει τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος τυμπάνου δυο φορές σε κάθε κύκλο, έτσι ώστε να αντιστρέφεται η πολικότητα του ηλεκτρομαγνήτη τυμπάνου όταν οι δυο αντίθετοι μαγνητικοί πόλοι βρίσκονται απέναντι και τελικά αλληλεπιδρούν εις το διηνεκές μαγνητικά τα δυο 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.

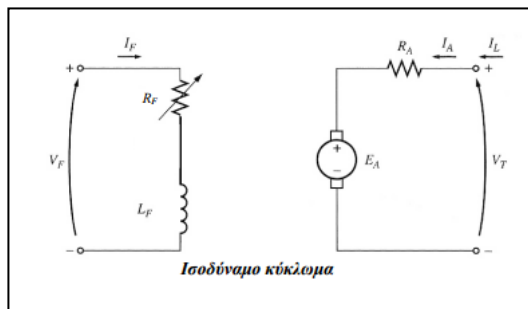


Εικόνα 1.3 – Γενικευμένη δομή μηχανής DC

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

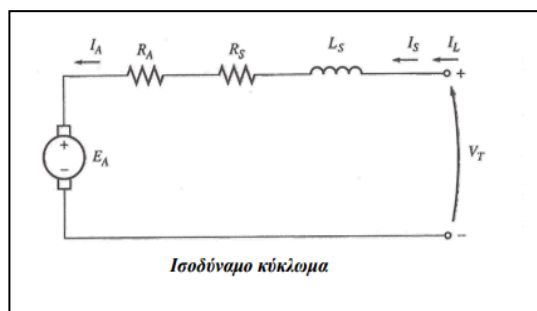


**Εικόνα 1.4** – Ισοδύναμο κύκλωμα ξένης διέγερσης

$$I_F = V_F / R_F, V_T = E_A + I_A R_A \text{ και } I_L = I_A$$

**Διέγερσης σε Σειρά:**

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

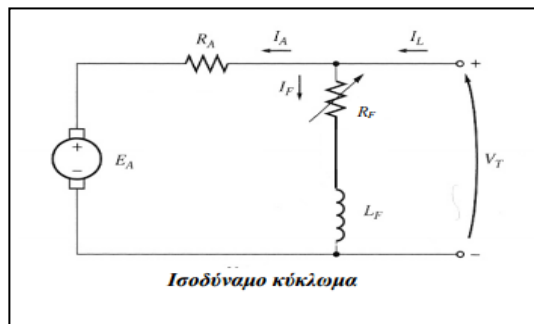


**Εικόνα 1.5** – Ισοδύναμο κύκλωμα διέγερσης σε σειρά

$$I_A = I_S = I_L \text{ και } V_T = E_A + I_A (R_A + R_S)$$

**Παράλληλης Διέγερσης:**

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

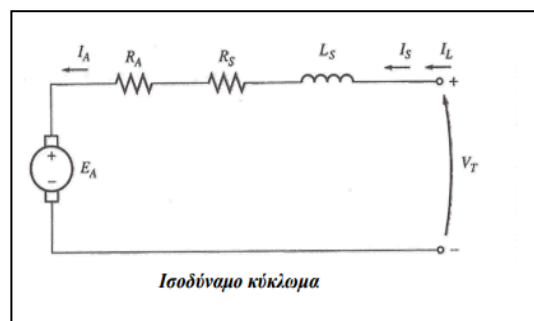


**Εικόνα 1.6** – Ισοδύναμο κύκλωμα παράλληλης διέγερσης

$$I_F = V_T / R_F, V_T = E_A + I_A R_A, I_L = I_A + I_F$$

**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.



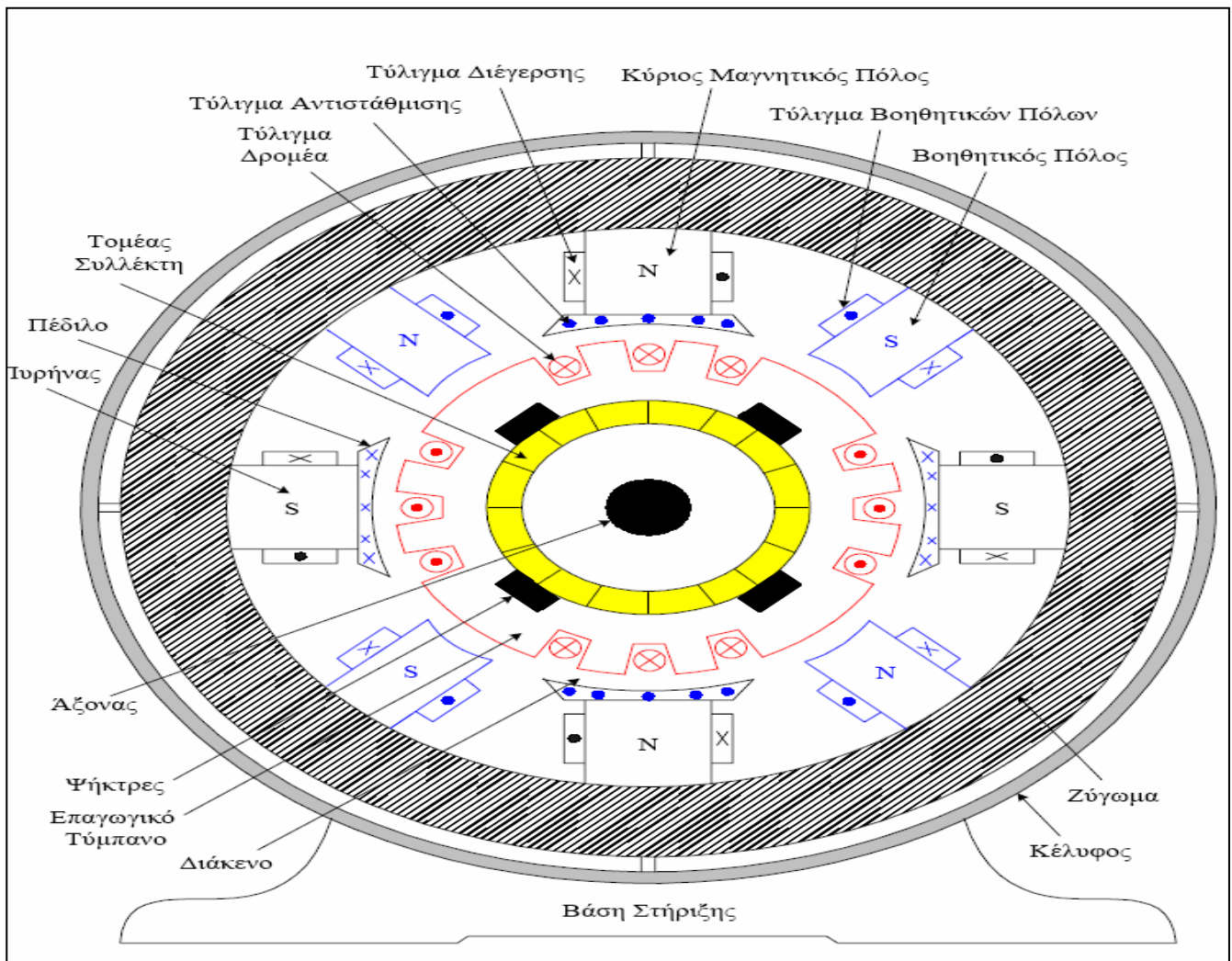
**Εικόνα 1.7** – Ισοδύναμο κύκλωμα σύνθετης διέγερσης

$$V_T = E_A + I_A (R_A + R_S)$$

$$I_A = I_L - I_F \text{ και } I_F = V_T / R_F$$

#### 1.4 Κατασκευαστικά μέρη μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Μια μηχανή συνεχούς ρεύματος, κινητήρας ή γεννήτρια περιλαμβάνει τα ίδια κατασκευαστικά μέρη. Οι μηχανές στρεφόμενων μερών αποτελούνται από τον ακίνητο στάτη και τον κινούμενο δρομέα (rotor). Ο στάτης είναι το ακίνητο μέρος μιας μηχανής Σ.Ρ και έχει ως προορισμό στο εσωτερικό του να δημιουργείται η καθορισμένη μαγνητική ροή, απαραίτητη για την λειτουργία του. Επίσης με τους αγωγούς τροφοδοσίας ρυθμίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά της μηχανής ως γεννήτρια ή κινητήρα. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η τομή μιας τετραπολικής μηχανής συνεχούς ρεύματος.



Εικόνα 1.8 – Κατασκευαστικά μέρη μηχανής συνεχούς ρεύματος

Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται μια μηχανή συνεχούς ρεύματος είναι ο **στάτης** και ο **δρομέας**.

Ο **Στάτης** αποτελείται από:

Το **ζύγωμα** που αποτελεί τον κορμό της μηχανής και κατασκευάζεται από χυτοχάλυβα ή ελατό σίδηρο. Μέσα από το ζύγωμα κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα.

Τους **μαγνητικούς πόλους** που στερεώνεται στο ζύγωμα και κατασκευάζονται από ελατό σίδηρο, εφόσον ανήκουν σε δυναμογεννήτρια, δηλαδή, σε γεννήτρια που έχει τύλιγμα στους πόλους. Στις μαγνητογεννήτριες, δηλαδή στις γεννήτριες με μόνιμους μαγνήτες, οι πόλοι κατασκευάζονται από χάλυβα. Προορισμός των πόλων είναι να εξασφαλίσουν τη ροή που γεννιέται από τα τυλίγματα, τα οποία περιβάλλουν τους πόλους. Το ρεύμα με το οποίο τροφοδοτούνται οι πόλοι καλείται ρεύμα διέγερσης.

Κάθε πόλος αποτελείται από **πυρήνα** και το τύλιγμα του που μεταξύ τους παρεμβάλλεται μόνωση. Ο πυρήνας συγκροτείται συνήθως από μονωμένα ειδικά ελάσματα σιδήρου, πάχους περίπου 1,5mm.

Τα **πέδιλα των πόλων** είναι το πλατύτερο μέρος του πόλου και βρίσκονται, πλησιέστερα στο επαγωγικό τύμπανο.

Αποτελούν συνήθως ξεχωριστή κατασκευή και βιδώνονται κάτω από τους πόλους. Σκοπός του πέδιλου είναι διαχέει τη ροή σε ένα μεγαλύτερο μέρος της περιφέρειας του δρομέα, από όσο καλύπτει ο κορμός του πυρήνα και να υποβασταζει το τύλιγμα του πόλου.

Κατασκευάζονται από μονωμένα φύλλα σιδήρου, για την αποφυγή θερμάνσεων και απωλειών από τα ρεύματα Foucault (Φουκώ), τα οποία εμφανίζονται εδώ εξ αιτίας των διαταραχών μαγνητικού πεδίου κατά τη λειτουργία της μηχανής. Υπενθυμίζουμε ότι τα ρεύματα Foucault (Φουκώ) ή δινορρεύματα είναι επαγωγικά ρεύματα τα οποία εμφανίζονται μέσα στη μάζα του υλικού σε μορφή κλειστών τροχιών (δινών) και προξενούν απώλειες.

Το **τύλιγμα του πόλου** αποτελείται από πολλές σπείρες χάλκινου μονωμένου σύρματος, οι οποίες, αφού λάβουν με τη βοήθεια καλουπιών την μορφή του πυρήνα, τυλίγονται με βαμβακερή ταινία και βαφτίζονται σε μονωτικό βερνίκι.

Τα άκρα του τυλιγμάτων μένουν ελεύθερα για την ηλεκτρική του σύνδεση. Το σύνολο των τυλιγμάτων των μαγνητικών πόλων ονομάζεται τύλιγμα διέγερσης της μηχανής.

Σε πολλές μηχανές Σ.Ρ. έχουμε δυο τυλίγματα σε κάθε πόλο, το καθένα ανεξάρτητο από το άλλο. Το ένα τύλιγμα που αποτελείται από πολλές σπείρες με λεπτό σύρμα, ονομάζεται παράλληλο τύλιγμα, ενώ το άλλο που αποτελείται από λίγες σπείρες και χονδρό σύρμα, ονομάζεται τύλιγμα σειράς.

Τα **καλύμματα (καπάκια)** στερεώνονται με κοχλίες στο ζύγωμα και χρησιμεύουν για να στηρίζουν τον άξονα του δρομέα και τον ψυκτροφορέα και προφυλάσσουν το εσωτερικό της μηχανής. τα καλύμματα φέρουν ενσωματωμένο και από ένα έδρανο μέσω του οποίου στρέφεται ο αξίνας του δρομέα.

Τον **ψηκτροφορέα** που είναι ένα σύστημα στο οποίο στερεώνονται οι ψηκτροθήκες ο ψηκτροφορέας στερεώνεται στο κύκλωμα της μηχανής το οποίο βρίσκεται από την πλευρά του συλλέκτη. Η στερέωση γίνεται κατά τρόπο ώστε να είναι δυνατή η μετάθεση της θέσης επαφής των ψηκτροθηκών πάνω στο συλλέκτη. Ο ψηκτροφορέας αποτελείται από ένα σίδηρο δάκτυλο τους βραχίονες των ψηκτροθηκών και τις ψηκτροθήκες

Στο σιδερένιο δακτύλιο στερεώνονται οι βραχίονες υποστήριξης των ψηκτροθηκών . οι βραχίονες είναι δυο, τέσσερις η περισσότεροι και ένα ηλεκτρικά μονωμένοι ως προς το σιδερένιο δακτύλιο. Στους βραχίονες στηρίζονται οι ψηκτροθήκες δηλαδή μεταλλικές θήκες , μέσα στις τοποθετούνται οι ψηκτροθήκες.

Τις **ψηκτροθήκες** που είναι συνήθως τεμάχια από σκληρό άνθρακα η γραφίτη η από ένα μίγμα άνθρακα και χαλκού. Τοποθετούνται μέσα στις ψηκτροθήκες και πιέζονται από ελατήριο ώστε να επιτυγχάνεται καλή επαφή με την επιφάνεια του συλλέκτη. Τα ελατήρια αυτά ρυθμίζονται έτσι ώστε η πίεση που ασκεί η ψηκτροθήκη στον συλλέκτη να μην είναι ούτε πολύ μεγάλη ούτε πολύ μικρή. Αν η πίεση είναι μικρή θα έχουμε κακή επαφή ψηκτροθηκών και συλλέκτη σπινθηρισμούς και κάπνισμα του συλλέκτη. Αντίθετα αν η πίεση είναι μεγάλη θα έχουμε μεγάλη φθορά των ψηκτροθηκών και υπερθέρμανση του συλλέκτη.

Ο **δρομέας** αποτελείται από:

**Τον άξονα** ,που φέρει το **επαγωγικό τύμπανο** ,το **συλλέκτη** και των **ανεμιστήρα** και στρέφεται πάντοτε μαζί με αυτά.

**Τον πυρήνα του επαγωγικού τύμπανου** ο οποίος παρέχει μια οδό μικρής μαγνητικής αντίστασης για την διόδο των μαγνητικών γραμμών των πόλων και φέρει σε αυτό το τύλιγμα του τυμπάνου. Κατασκευάζεται από πολλά μαγνητικά ελάσματα τα οποία κάμπτονται σε ειδικές πρέσες .Τα μαγνητικά ελάσματα είναι μονωμένα μεταξύ τους για να μνηθούν οι απόλυτες λόγο δινορευμάτων.

**Το τύλιγμα του επαγωγικού τύμπανου** , το οποίο κατασκευάζεται από μονωμένο χάλκινο αγωγό κυκλικής η ορθογωνικής διατομής .Ο αγωγός κυκλικής διατομής χρησιμοποιείται κυρίως στις μηχανές μικρής ισχύος η στις μηχανές υψηλής τάσης .Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις προτιμάται ο αγωγός ορθογωνικής διατομής διότι με αυτόν κατασκευάζεται σπείρες μεγαλύτερης αντοχής και γίνεται μεγαλύτερη εκμετάλλευση του χώρου των οδοντώσεων.

**Τον συλλέκτη** που κατασκευάζεται από πολλά χάλκινα ελάσματα τα οποία ονομάζεται τομής του συλλέκτη, για να αποφευχθεί βραχυκύκλωση των τομέων του συλλέκτη τοποθετούνται μονώσεις μεταξύ τους και προς τις πλευρές των τεμαχίων συγκροτήσεις. Οι μεταξύ τους μονώσεις γίνεται με μίκα και φινιερ. Ο σκοπός του συλλέκτη είναι να παίρνει η να μεταβιβάζει το ρεύμα .

**Τον ανεμιστήρα** που στερεώνεται στον άξονα και δημιουργεί κατά την περιστροφή του ρεύμα αέρα, που εισέρχεται στην μηχανή από το άνοιγμα του ενός καλύμματος και εξέρχεται από το άνοιγμα του άλλου καλύμματος.

**Την πλήμνη** που χρησιμοποιείται στις μηχανές μεγάλης σχετικά ισχύος για να μειώσουν το βάρος των μαγνητικών ελασμάτων , που στοιχίζουν ακριβά, αλλά και να διευκολύνουμε τη ψύξη του κινητήρα.

### 1.5 Μειονεκτήματα μηχανών συνεχούς ρεύματος

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος παρουσιάζουν αρκετά σημαντικά μειονεκτήματα όπως η ανάγκη τακτικής συντήρησης του συλλέκτη, σχετικά μεγάλο βάρος δρομέα ,σχετικά χαμηλή μέγιστη ταχύτητα λόγω μηχανικής καταπόνησης του συλλέκτη και υψηλό κόστος κατασκευής.

### 1.6 Εκκίνηση κινητήρων Σ.Ρ

Η περιστροφή του επαγωγίμου μέσα στο μαγνητικό πεδίο του στάτη, προκαλεί την ανάπτυξη ηλεκτρικής τάσης (αντιηλεκτρεγερτική δύναμη  $E_a$  ) αντίθετη με την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα

Σε κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα ισχύει:

$$I_{επ} = V - \frac{E_a}{R_{επ}} \text{ (Περίπτωση κινητήρα παράλληλης / ανεξάρτητης διέγερσης)}$$

$I_{επ}$  : η ένταση του ρεύματος στο επαγωγίμο

$V$  : η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα

$E_a$  : η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη

$R_{επ}$  : η αντίσταση του επαγωγίμου

Στην εκκίνηση του κινητήρα η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη είναι μηδενική, επομένως:

$$I_{επ-εκ} = \frac{V}{R_{επ}}$$

Λόγω της πολύ μικρής αντίστασης του επαγωγίμου  $R_{επ}$  , το ρεύμα εκκίνησης είναι κατά πολύ μεγαλύτερο (Περίπου 20 φορές μεγαλύτερο) εκείνου της κανονικής λειτουργίας με κίνδυνο υπερθέρμανσης και καταστροφής του κινητήρα. Κατάλληλη αντίσταση εκκίνησης συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγίμου για τον περιορισμό του  $I_{επ}$ . Όσο η ταχύτητα του κινητήρα αυξάνεται (επομένως αναπτύσσεται επαρκής  $E_a$  ), η αντίσταση εκκίνησης βραχυκυκλώνεται σταδιακά με κατάλληλους διακόπτες

### 1.7 Απώλειες μηχανής συνεχούς ρεύματος

1.Απώλειες χαλκού απώλειες τυλίγματος σπλισμού  $P_A = I_A^2 R_A$  απώλειες τυλίγματος πεδίου (διέγερση)  $P_F = I_F^2 R_F$

2.Απώλειες ψηκτρών απώλειες που οφείλονται στην πτώση τάσης επάνω στις ψήκτρες

$$P_{BD} = V_{BD} I_A$$

3.Απώλειες πυρήνα απώλειες υστέρησης  $\sim B^2$  απώλειες δινορρευμάτων

4.Μηχανικές Απώλειες απώλειες τριβών (ρουλεμάν) απώλειες ανεμισμού  $\sim \omega^3$

5.Κατανεμημένες Απώλειες θεωρούνται περίπου 1 % της ισχύος εξόδου σε πλήρες φορτίο.

Η ισχύς ( ηλεκτρική ή μηχανική ) που μετατρέπεται στο διάκενο αέρα της μηχανής δίνεται ως:  $P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m = E_A I_A$

### 1.8 Ρύθμιση στροφών και ροπης μηχανών συνεχούς ρεύματος

Ρύθμιση στροφών (ταχύτητας περιστροφής) ενός κινητήρα Σ.Ρ ανάλογα με την ροπή φορτίου

Η ρύθμιση των στροφών σε έναν κινητήρα Σ.Ρ γίνεται γενικά από την εξίσωση:

$$n = U\Delta - (R_p * I_p) / C_e * \Phi(i_e) \quad (\text{σε r.p.m})$$

Έτσι μπορώ από την εξίσωση αυτή :

**α)** με μεταβολή της τάσης  $U\Delta$  τροφοδοσίας που είναι ένας

εύκολος τρόπος.

**β)** με μεταβολή του ρεύματος διέγερσης  $i_e$  συνδέοντας μια

μεταβλητή αντίσταση  $R'e$

**γ)** με μεταβολή της αντίστασης του επαγωγικού τύμπανου  $R_p$ . Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείτε στην εκκίνηση των κινητήρων συνδέοντας σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγικού τύμπανου αντιστάσεις εκκίνησης

Η **ροπή**  $\tau_{ind}$  της μηχανής εξαρτάται από

**α)** τη μαγνητική ροή του πεδίου στο εσωτερικό της  $\Phi$

**β)** το ρεύμα οπλισμού  $I_A$  της μηχανής

**γ)** μια σταθερά  $K$  που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

$$\tau_{ind} = K \Phi I_A$$



## Κεφάλαιο 2

### Βηματικοί κινητήρες



Εικόνα 2.1 – Βηματικοί κινητήρες

#### 2.1 Ιστορική ανάδρομη

Οι βηματικοί κινητήρες είναι τα “μωρά” στην οικογένεια των κινητήρων τα οποία ξεκίνησαν να γίνονται δημοφιλή στην αρχές του 1960. Ήταν αρχικά σχεδιασμένο ως μια χαμηλού κόστους εναλλακτική λύση στους αντίστοιχους σέρβο κινητήρες σε ακριβές εφαρμογές έλεγχου θέσης και άμεσος έγιναν αποδεχτά από την αναδυόμενη βιομηχανία υπολογιστών σε περιφερικές εφαρμογές.

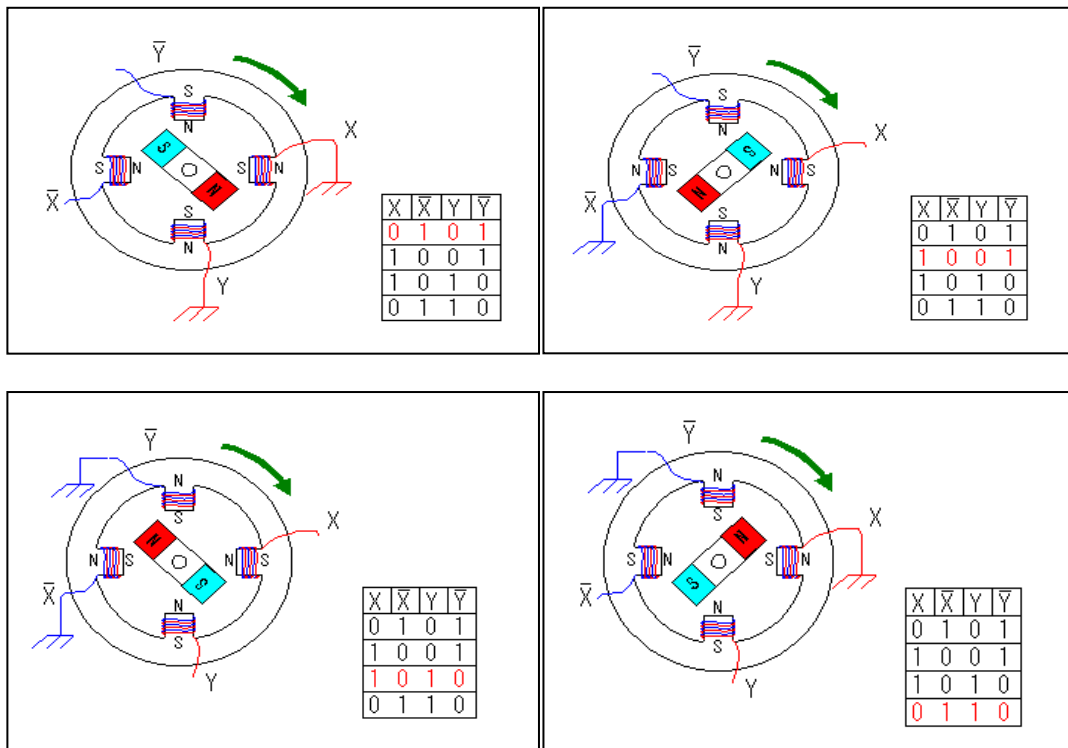
Ο πρώτος βηματικός κινητήρας, ένας “bidirectional variable reluctance type”, αναπτύχθηκε για το Βρετανικό Ναυτικό το 1933. Είχε χρησιμοποιηθεί αναμεταδότης θέσης για μια πυξίδα και ένα όπλο με δείκτη κατεύθυνσης. Ο ελεγκτής ήταν αργός αλλά πολύ αποτελεσματικός για αυτές τις εφαρμογές με χαμηλή και σταθερή ταχύτητα. Το σύστημα υιοθετήθηκε αργότερα και από το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ κατά την διάρκεια του Β' Παγκοσμίου πολέμου. Ο βηματικός κινητήρας χρησιμοποιήθηκε σε περιορισμένο αριθμό των αρχικών ψηφιακών συστημάτων έλεγχου μέσα στην δεκαετία του 1950. Η επικράτηση των συνεχούς ρεύματος σερβοκινητήρων 1944-1957 είχε μόλις ξεπεραστεί από των βηματικό κινητήρα και της διαθεσιμότητα των ψηφιακών συσκευών μέτρησης και λογικού έλεγχου που απαιτούνται για όλα τα ψηφιακά συστήματα.

#### 2.2 Γενικές πληροφορίες, Τι είναι ο βηματικός κινητήρας;

Ο βηματικός κινητήρας είναι μια συσκευή ηλεκτρομηχανικής κίνησης η οποία μετατρέπει ψηφιακό σήμα σε μηχανική κίνηση. Είναι μια ειδική έκδοση μιας σύγχρονης μηχανής, στην οποία ο ρότορας είναι ένας μόνιμος μαγνήτης, ενώ ο στάτης αποτελείται από κάποια τυλίγματα. Σε αντίθεση όμως με τους συγχρόνους κινητήρες, οι βηματικοί κινητήρες έχουν μεγάλο αριθμό ζευγών πόλων.

### 2.3 Αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα

Για να λειτουργήσει ένας τέτοιος βηματικός κινητήρας χρειάζεται μια μονάδα έλεγχου ,η οποία ενεργοποιεί τα τυλίγματα ξεχωριστά με βάση μια συγκεκριμένη ακολουθία παλμών. Άρα ο βηματικός κινητήρας λειτουργεί με παλμούς, κάθε παλμός δίνει εντολή να ενεργοποιηθεί ένα τυλίγμα και έτσι ο δρομέας έλκετε από το συγκεκριμένο τυλίγμα που ενεργοποιήθηκε κάνοντας έτσι ένα βήμα, εξίσου και η ονομασία του βηματικός κινητήρας. Ανάλογα και με τον κινητήρα και κάποιους άλλους παραμέτρους ,όπως θα δούμε στην πορεία ,ο βηματικός κινητήρας κάνει ένα βήμα με μια συγκεκριμένη γωνία, για να κάνει λοιπόν ο κινητήρας μια πλήρη περιστροφή 360° θα χρειαστεί ένα συγκεκριμένους αριθμό παλμών ,ετσι όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα χιάζεται 4 παλμούς και για κάθε παλμό κάνει 270°. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το πώς ακριβός γίνεται αυτή η λειτουργιά βήμα βήμα.



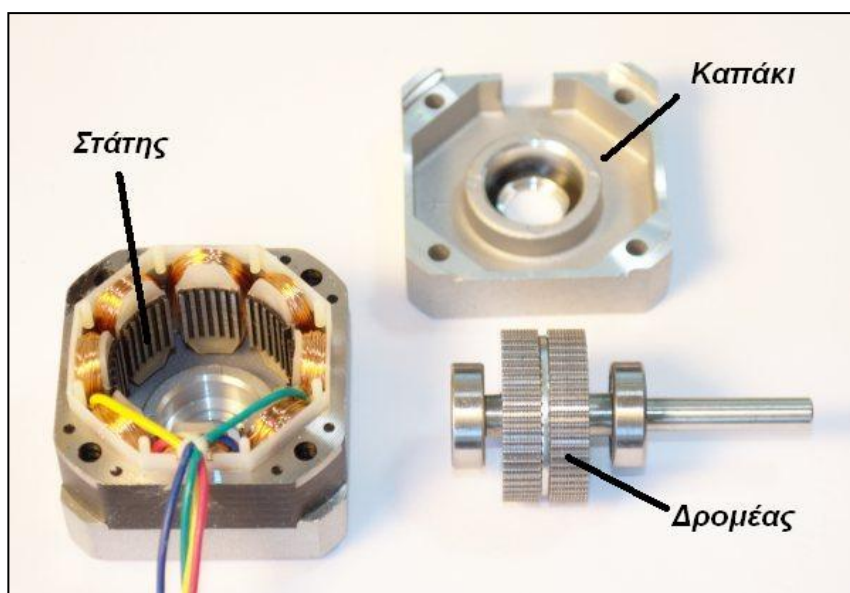
Εικόνα 2.2 – Τρόπος λειτουργίας διπολικού βηματικού κινητήρα

Ας υποθέσουμε λοιπόν όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.2 ότι έχουμε έναν βηματικό κινητήρα που έχει 2 ζεύγη πόλων δηλαδή 4 διαφορετικά τυλίγματα. Ονομάζουμε τα τυλίγματα Y, Y-bar, X, X-bar ανάλογα με την πολικότητα που έχουν. Αφού κατανοήσουμε ότι όταν έχουμε 1 έχουμε και παλμό άρα και ενεργοποίηση του τυλιγματος ,ενώ όταν έχουμε 0 δεν υπάρχει παλμός, συνεχίζουμε σε μια σειρά ενεργοποίησης τυλιγμάτων. Κάθε φορά που ένα η δυο τυλίγματα (ανάλογα με το είδος βηματισμού που έχουμε) ενεργοποιούνται ,ο δρομέας μας θα κινηθεί προς την αντίστοιχη πολικότητα των τυλιγμάτων (που βρίσκονται στον στάτη).Έτσι έχοντας μια ακολουθία από διαδοχικούς παλμούς στα τυλίγματα επιτυχαίνουμε την κίνηση του κινητήρα. Στο παράδειγμα μας η διάδοχη που ενεργοποιούνται τα τυλίγματα τείνουν τον κινητήρα να περιστρέφεται δεξιόστροφα. Για να περιστραφεί αριστερόστροφα θα πρέπει να ενεργοποιήσουμε τα τυλίγματα αντίθετα από αυτό το παράδειγμα. Ο βηματικός κινητήρας λόγω της αρχής λειτουργίας που έχει πλεονέκτη σε εφαρμογές που χρειάζονται απόλυτος έλεγχος κίνησης όχι μόνο σε περιστρεφόμενη κίνηση αλλά και σε διαδοχικές κίνησης δεξιόστροφης και αριστερόστροφης φάρας σε εναλλασσόμενες ταχύτητες. Για παράδειγμα θα μπορούσαμε να δώσουμε

εντολή στον βηματικό κινητήρα που θα έχει ακολουθίες κινήσεων όπως δεξιόστροφο βήμα  $10^\circ$ , ύστερα αριστερόστροφο βήμα  $5^\circ$ , ύστερα ξανά δεξιόστροφο βήμα  $10^\circ$  και βήμα  $5^\circ$  και ούτω καθεξής.

## 2.4 Δομή ενός βηματικού κινητήρα

Παρακάτω απεικονίζεται η δομή ενός υβριδικού βηματικού κίνητρα  $4^{ov}$  φάσεων (ο υβριδικός βηματικός κινητήρας είναι ένα είδος βηματικού κίνητρα που θα αναληθή στην πορεία) Να σημειωθεί ότι η δομή και η κατασκευή για κάθε διαφορετικό είδος ενός βηματικού κινητήρα είναι διαφορετική.



Εικόνα 2.3 – Ανοιγμένος υβριδικός βηματικός κινητήρας

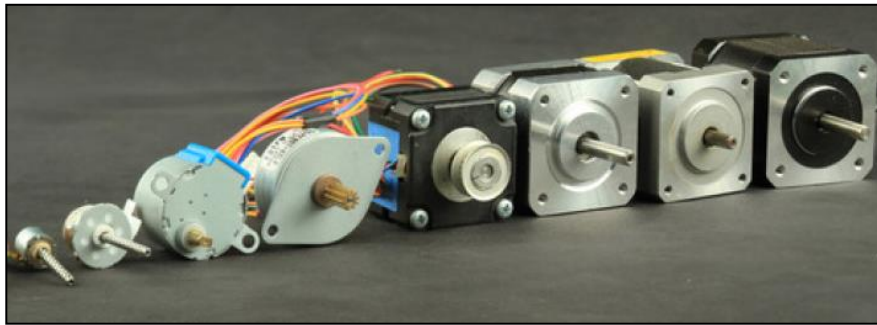
### Ο δρομέας (ή ρότορας)

Ο δρομέας όπως γνωρίζουμε από όλους του κινητήρες είναι το κινητό μέρος του κινητήρα. Ο δρομέας στον συγκεκριμένο βηματικό κινητήρα του σχήματος είναι κατασκευασμένος από δυο δίσκους, που μοιάζουν σαν γρανάζια, ένας από τους οποίους είναι ο βόρειος πόλος και ο άλλος ο νότιος πόλος. Όταν λοιπόν τοποθετήσουμε τους δυο αυτούς δίσκους μαζί έχουμε εναλλάξ στις οδόντωσης βόρεια και νότια πολικότητα. Σε άλλα είδη βηματικών κινητήρων όπως θα δούμε στην συνέχεια ο δρομέας μπορεί να μην έχει οδοντώσεις αλλά να είναι απλά ένας μόνιμος μαγνήτης.

### Ο στάτης

Ο στάτης από την άλλη είναι το ακίνητο μέρος του κινητήρα. Περιέχει τους πόλους οι οποίοι καταλήγουν σε κάποιους ακροδέκτες. Οι πόλοι που έχει ο συγκεκριμένος βηματικός κινητήρας είναι 4 δηλαδή έχουμε 8 τυλίγματα όπου κάθε ζεύγος αυτών κάνουν και 1 πόλο. Τα τυλίγματα όπως βλέπουμε στο σχήμα είναι και εδώ οδοντωτά, παρόλα αυτά σε άλλα είδη βηματικών κινητήρων μπορεί να μην έχουν οδοντώσεις. Οι ακροδέκτες που προέρχονται από τα τυλίγματα θα πρέπει να συνδεθούν σε έναν οδηγό και έναν ελεγκτή για να δοθεί παλμός σε αυτά αφού όπως τονίσαμε παραπάνω οι συγκεκριμένη κινητήρες λειτουργούν δίνοντας του παλμούς.

Οι βηματικοί κινητήρες ωστόσο δεν έχουν όλοι την ίδια δομική κατασκευή. Ο τρόπος λειτουργίας είναι σχεδόν ίδιος σε όλους αλλά η κατασκευή τους ποικίλει ανάλογα με παράγοντες όπως, με το ποσό μικρό θέλουμε να είναι το βήμα που θα κάνει ο κινητήρας, την ταχύτητα, την ροπή και το φορτίο που μπορεί να δεχτεί στον άξονα του. Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε κάποιους βηματικούς κινητήρες που διαφέρουν στο μέγεθος και στην κατασκευή και αυτό γιατί όπως είπαμε κάθε ένας από αυτούς έχει διαφορετικό ρολό και χαρακτηριστικά σε μια εφαρμογή.



**Εικόνα 2.4** – Βηματικοί κινητήρες διαφόρων ειδών και μεγεθών

Στην πορεία την πτυχιακής θα αναλυθούν ποιο συγκριμένα τα είδη των βηματικών κινητήρων.

## 2.5 Φορτίο σε έναν βηματικό κινητήρα

Ο βηματικός κινητήρας έχει την τάση να κάνει μηχανικές ταλαντώσεις. Εάν δεχτεί φορτίο πάνω από το όριο για το οποίο είναι κατασκευασμένο, θα χάσει κάποια χαρακτηριστικά τις δύναμης του, μπορεί επίσης να χάσει και κάποια βήματα και ακόμα εάν το φορτίο είναι πολύ μεγάλο να σταματήσει να λειτουργεί. Ωστόσο ο βηματικός κινητήρας μπορεί να παράληψη κάποιο σφάλμα εάν χαθεί ένα ή μερικά βήματα. Οι κατασκευαστές εγκληνουν ότι τα βήματα του κινητήρα θα είναι σωστά και ασφαλή μόνο πάνω από κάποια συγκεκριμένα όρια απόδοσης.

## 2.6 Σύγκριση μηχανών συνεχούς ρεύματος με βηματικούς κινητήρες

- 1) Οι βηματική κινητήρες λειτουργούν σε ανοιχτό βρόγχο σε αντίθεση με τους περισσότερους κινητήρες συνεχούς ρεύματος που λειτουργούν σε κλειστό βρόγχο με την προσθήκη ενός αισθητήρα πράγμα που κοστίζει.
- 2) Οι βηματικοί κινητήρες ελέγχονται εύκολα με κάποιο μικροεπεξεργαστή, ωστόσο τα λογικά κυκλώματα και οι ηλεκτρονική ελεγκτές είναι πολύ περίπλοκα.
- 3) Οι βηματικοί κινητήρες δεν έχουν ψήκτρες και ως γνωστό οι ψήκτρες δημιουργούν μερικά προβλήματα όπως ότι φθείρονται και θέλουν αλλαγή και ότι πολλές φορές δημιουργούν σπινθήρες.
- 4) Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος έχουν συνεχή μετατόπιση και μπορούν να τοποθετηθούν με ακριβιά σε αντίθεση με την έναν βηματικό κινητήρα όπου η κίνηση του είναι σταδιακή και η ποιότητα του περιορίζεται στο μέγεθος του βήματος.
- 5) Οι βηματικοί κινητήρες εάν υπερφορτωθούν μπορούν να παραλείψουν τυχόν σφάλματα και έτσι να μην φάνει κάποια αναταραχή.
- 6) Όταν ανατροφοδοτούμε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος ανταποκρίνεται πολύ γρηγορότερα σε σχέση με έναν βηματικό κινητήρα.

## 2.7 Που χρησιμοποιούνται οι Βηματικοί κινητήρες

Παρά το γεγονός ότι ο βηματικός κινητήρας έχει επισκιαστεί στο παρελθόν από τα συστήματα σερβοκινητήρων για τον έλεγχο κίνησης, έχει αναδεχθεί ως η προτιμώμενη τεχνολογία σε όλο και περισσότερους τομείς. Ο σημαντικότερος παράγοντας σε αυτό είναι ότι ο βηματικός κινητήρας έχει την επικράτηση του ψηφιακού έλεγχου, τη εμφάνιση του μικροεπεξεργαστή, βελτιωμένο ντιζάιν και φυσικά το χαμηλό κόστος. Σήμερα, οι βηματικοί κινητήρες εφαρμόζονται παντού γύρο μας : χρησιμοποιούνται σε εκτυπωτές, δίσκους, ωρολόγια, καθώς και σε βιομηχανικό αυτοματισμό και μηχανημάτων. Γενικότερα ένας βηματικός κινητήρας συναντάται συχνότερα σε συστήματα κίνησης που απαιτούν έλεγχο θέσης.

Οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους. Παρακάτω θα συναντήσουμε μια λίστα των βιομηχανιών που κάνουν χρήση βηματικών κινητήρων:

• **Αεροσκάφη:** Στον κλάδο των αεροσκαφών, οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε ενορχηστρώσεις του αεροσκάφους, κεραίες και εφαρμογές τηλεπισκόπησης, εξοπλισμούς σάρωσης.



Εικόνα 2.5 – Αεροσκάφος

• **Αυτοκινητοβιομηχανία:** Η αυτοκινητοβιομηχανία εφαρμόζει βηματικούς κινητήρες για εφαρμογές που αφορούν το cruise control, συσκευές με αισθητήρες. Ο στρατός επίσης χρησιμοποιεί νηματικό κινητήρα για την εφαρμογή θέσης κεραιών.



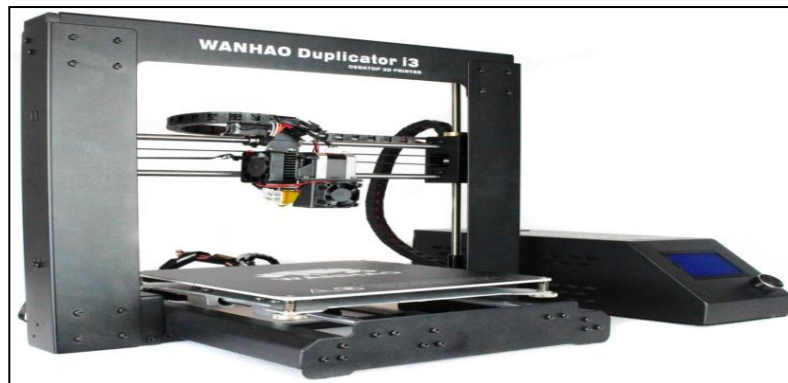
Εικόνα 2.6 – Αυτοκινητοβιομηχανία

• **Χημικά:** Η χημική βιομηχανία χρησιμοποιεί βηματικούς κινητήρες για την ανάμειξη και τη δειγματοληψία των υλικών καθώς και για τον εξοπλισμό δοκίμων.



Εικόνα 2.7 – Μηχάνημα χημικών εφαρμογών

• **Ηλεκτρονικά είδη:** Στον κλάδο αυτό οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε ψηφιακές μηχανές για την εστίαση και την λειτουργικότητα του ζουμ. Σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, για τις μονάδες αποθήκευσης δεδομένων, οπτικού δίσκου, εκτυπωτές και σαρωτές.



Εικόνα 2.8 – 3D printer

• **Βιομηχανικά:** Στον βιομηχανικό κλάδο, οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε μετρητές της αυτοκινητοβιομηχανίας σε μηχανές εργαλείων καθώς και μπορούν επίσης να βρεθούν σε CNC μηχανήματα έλεγχου.



Εικόνα 2.9 – Εμβολο CNC ελεγχόμενο από βηματικό κινητήρα

• **Ιατρική:** Στην ιατρική συναντάμε βηματικούς κινητήρες σε ιατρικούς σαρωτές, στην μικροσκοπική η ναυοσκοπηση για τον έλεγχο της κίνησης των αυτομάτων συσκευών, σε μηχανήματα x-Ray ,αντλίες υγρού, αναπνευστήρες, μηχανήματα ανάλυσης αίματος.



Εικόνα 2.10 – Εξοπλισμός ιατρικών οργάνων

- *Εξοπλισμός Επιστημονικών Οργάνων*: Τηλεσκόπιο, Φασματογράφους και φυγοκεντρίσης.



Εικόνα 2.11 – Τηλεσκόπιο βήματος

- *Συστήματα Παρακολούθησης*: Ο βηματικώς κινητήρας χρησιμοποιείται σε επιτήρηση κάμερας .



Εικόνα 2.12 – Κάμερες παρακολούθησης με έλεγχο κατεύθυνσης



## Κεφάλαιο 3

### Ειδή βηματικών κινητήρων

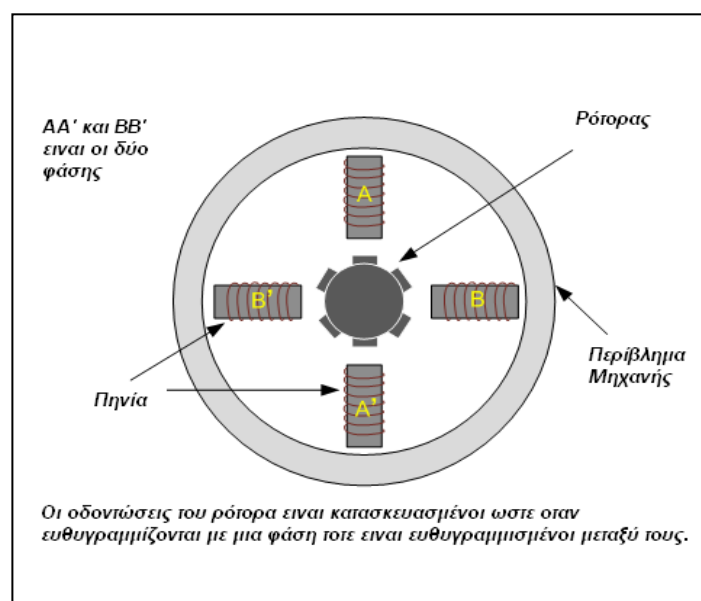
#### 3.1 Βηματικοί Κινητήρες Μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

##### (Variable Reluctance Motor ή VRM)

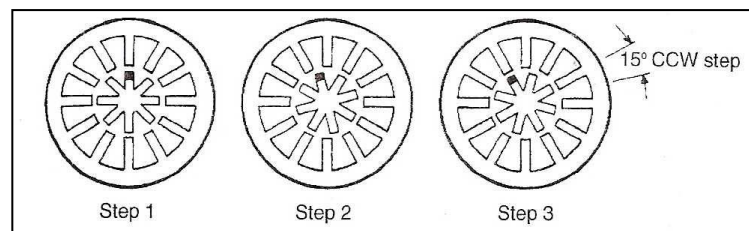
Οι βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης είναι οι πιο διαδεδομένοι γι' αυτό τους συναντάμε και στις περισσότερες εφαρμογές. Οι κινητήρες αυτοί παράγονται με ένα τμήμα δρομέα (single stack rotor) ή με πολλαπλά τμήματα δρομέα (multiple stack rotor) προσαρμοσμένα στην ίδια άτρακτο. Με τον 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 δρομέα αποτελούνται κανονικά από τον τοποθετημένα σε στρώματα πυριτίου χάλυβα. Τα υλικά του στάτη και του δρομέα πρέπει να φέρουν την υψηλή διαπερατότητα και να είναι ικανά για υψηλή μαγνητική ροή, για να περάσουν ακόμα κι αν εφαρμόζεται μια ραμολή μαγνητική δύναμη. Η συγκεκριμένη κατηγορία βηματικών κινητήρων περιλαμβάνει ένα στάτη που κρατιέται σε θέση με το εξωτερικό περίβλημα του κινητήρα και τα τυλίγματα. Ο δρομέας 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 μαγνητικής αντίστασης φέρει 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 δοντιού 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.



Εικόνα 3.1 – Δομή βηματικού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης



**Εικόνα 3.2** - Παράδειγμα βηματισμού ενός κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στο παραπάνω σχήμα έχουμε έναν κινητήρα, ο οποίος έχει βήμα περιστροφής  $15^\circ$ . Ο ρότορας έχει οχτώ οδοντώσεις και ο στάτορας έχει δώδεκα πόλους. Κάθε ένα από τα τυλίγματα τυλίγεται γύρω από απέναντι πόλους. Όταν τροφοδοτείται το τύλιγμα 1, οι οδοντώσεις του ρότορα, έλκονται από το τύλιγμα αυτό. Αυτή η έλξη προκύπτει από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στο τύλιγμα. Οπότε, όπως έχουμε εξηγήσει, ο ρότορας περιστρέφεται, επειδή βρίσκεται μέσα στο πεδίο και αναπτύσσονται πάνω σε αυτόν δυνάμεις που προκαλούν ροπή. Στη συνέχεια, αν σταματήσει η τροφοδοσία στο τύλιγμα αυτό και αναπτυχθεί στο τύλιγμα 2, οι οδοντώσεις του ρότορα έλκονται από το αντίστοιχο τύλιγμα. Άρα ο 17ρότορας θα περιστραφεί  $15^\circ$ . Έτσι αν ενεργοποιούνται διαδοχικά τυλίγματα με τη σειρά, θα έχουμε συνεχή περιστροφή του κινητήρα.

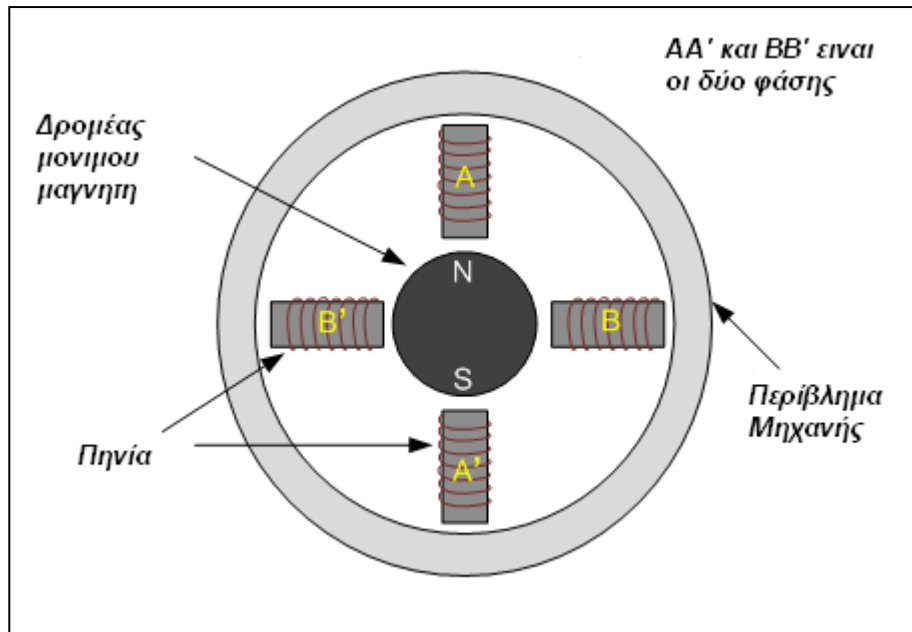
### 3.2 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη

#### (Permanent Magnet Motor)

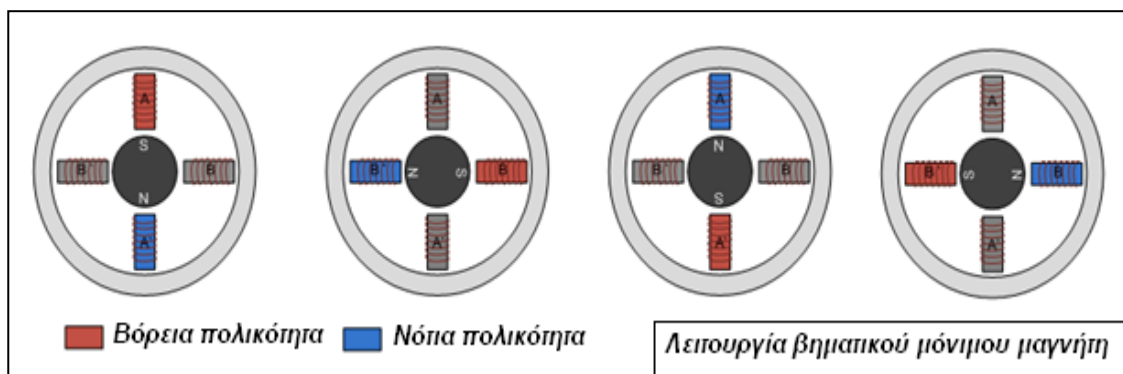
Οι βηματικοί κινητήρες που στο δρομέα χρησιμοποιούν ένα μόνιμο μαγνήτη καλούνται βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Ο δρομέας του κινητήρα του μόνιμου μαγνήτη αποτελείται από κυλινδρικούς τομείς μόνιμων μαγνητών που προσαρμόζονται στην ίδια άτρακτο. Οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν πόλους που τείνουν να ευθυγραμμίζονται 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 μαγνητικής αντίστασης. 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).



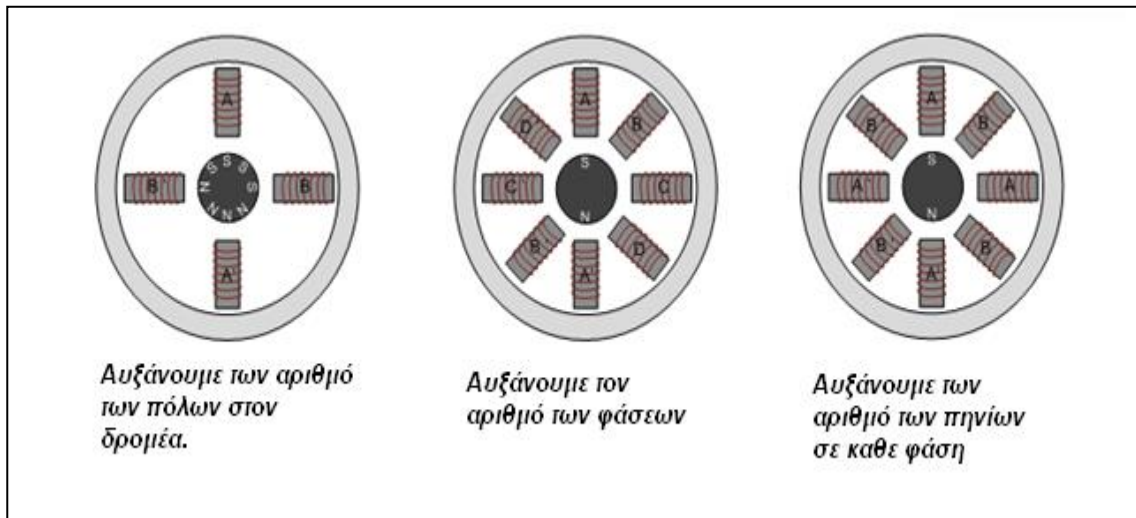
Εικόνα 3.3 - Δομή βηματικού κινητήρα μονίμου μαγνήτη



Εικόνα 3.4 – Παράδειγμα βηματισμού ενός βηματικού κινητήρα μονίμου μαγνήτη

Όπως απεικονίζεται και στην εικόνα όταν ένα στάτη ενεργοποιείται, αναπτύσσει ηλεκτρομαγνητικούς πόλους. Το μαγνητικό ρότορας ευθυγραμμίζεται κατά μήκος του μαγνητικού πεδίου του στάτη. Ο άλλος στάτης στη συνέχεια ενεργοποιείται στην αλληλουχία, έτσι ώστε ο ρότορας κινείται και ευθυγραμμίζεται με το νέο μαγνητικό πεδίο. Με αυτό τον τρόπο ενεργοποιεί των στατή σε μια σταθερή ακολουθία περιστροφής του βηματικού κινητήρα με σταθερές γωνίες.

Η ποιότητα ενός βηματικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση του αριθμού των πόλων στο δρομέα ή αύξηση του αριθμού των φάσεων όπως απεικονίζεται και στο παρακάτω σχήμα.

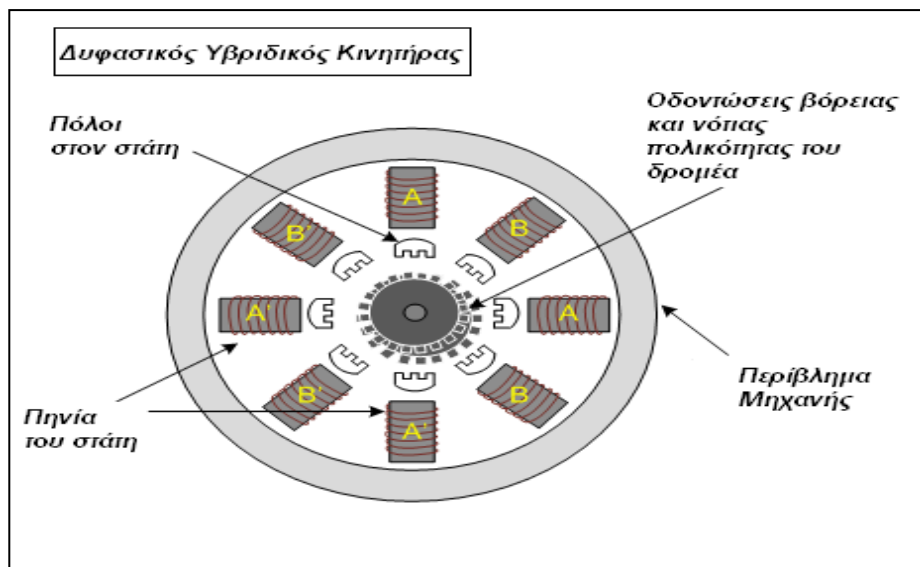


**Εικόνα 3.5** – Μέθοδοι βελτίωσης βηματικών κινητήρων μόνιμου μαγνήτη

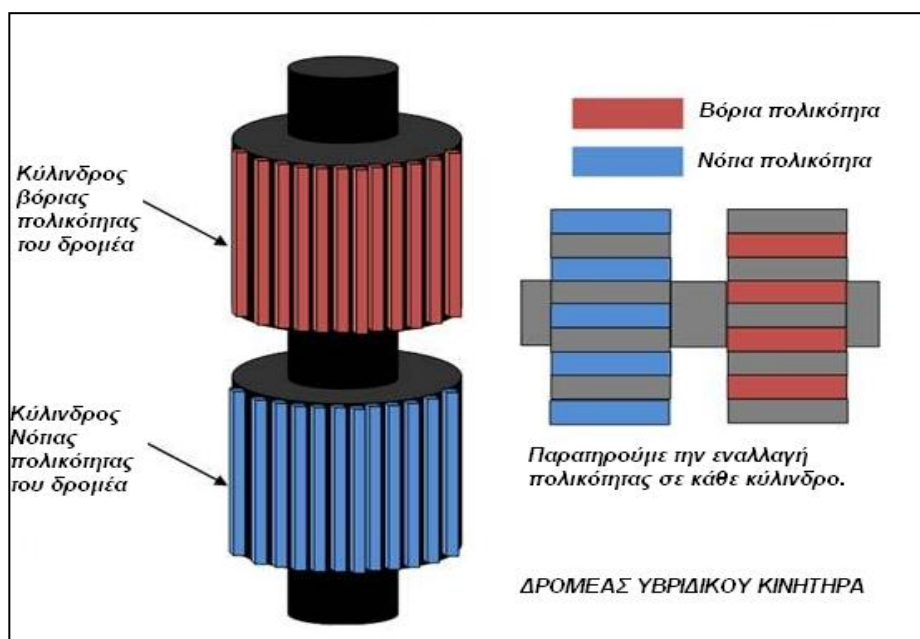
### 3.3 Υβριδικοί Βηματικοί Κινητήρες

#### (Hybrid Motor)

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 φέρει έκτυπους πόλους ή οδόντες και τα τυλίγματα του είναι συνερή και κατά μήκος του άξονα.



Εικόνα 3.6 - Δομή υβριδικού βηματικού κινητήρα



Εικόνα 3.7 - Δομή του δρομέα ενός βηματικού κινητήρα

### 3.4 Σύγκριση μεταξύ των ειδών

- **Σύγκριση βηματικών κινητήρων μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης με κινητήρες μόνιμου μαγνήτη η υβριδικούς.**

Συγκρίνοντας τους τρεις τύπους βηματικών κινητήρων που μελετήσαμε παραπάνω, μπορούμε να εντοπίσουμε τις διαφορές μεταξύ τους και να επιλέξουμε τον κινητήρα σύμφωνα με τα κριτήρια που θέλουμε. Ως προς την κατασκευή τους, οι βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης είναι απλούστεροι και επίσης είναι πιο γεροί γιατί δεν χρησιμοποιούν ρότορες μόνιμου μαγνήτη. Όπως με όλους τους κινητήρες, η ροπή ελαττώνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα, αλλά η μείωση της ροπής με την ταχύτητα είναι 19 λιγότερο έντονη στους κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Ταχύτητες που ξεπερνούν τα 10000 βήματα το δευτερόλεπτο είναι εφικτές με κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, ενώ λίγοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη ή υβριδικοί επιτυχαίνουν ικανοποιητική ροπή στα 5000 βήματα το δευτερόλεπτο και οι περισσότεροι από αυτούς περιορίζονται σε ταχύτητες κάτω από 1000 βήματα το δευτερόλεπτο. Μειονέκτημα των κινητήρων μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης είναι ότι όταν ενεργοποιούνται είναι αρκετά θορυβώδεις σε σχέση με τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη ή τους υβριδικούς. Οπότε αν έχει σημασία ο θόρυβος σε κάποια εφαρμογή επιλέγεται και ο ανάλογος κινητήρας. Επίσης, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη και οι υβριδικοί αντιστέκονται ακόμα και να περιστραφούν με το χέρι, χωρίς τροφοδοσία, σε σύγκριση με τους κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι οι μόνιμοι μαγνήτες έλκουν τους πόλους του στάτορα ακόμα κι αν δεν υπάρχει τάση. Σε μερικές εφαρμογές κρίνεται απαραίτητη αυτή η ιδιότητα, αλλά άλλοτε μπορεί να προκαλέσει προβλήματα. Τέλος, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη με κατάλληλα κυκλώματα οδήγησης μπορούν να κινηθούν με πολύ μικρά βήματα (microstepping). Αποτέλεσμα είναι η μετακίνηση στις διαδοχικές θέσεις να είναι ομαλή, χωρίς τινάγματα. Γενικά, δεν είναι δυνατή η μετακίνηση με πολύ μικρά βήματα στους κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Συνήθως μετακινούνται με πλήρη βήματα.

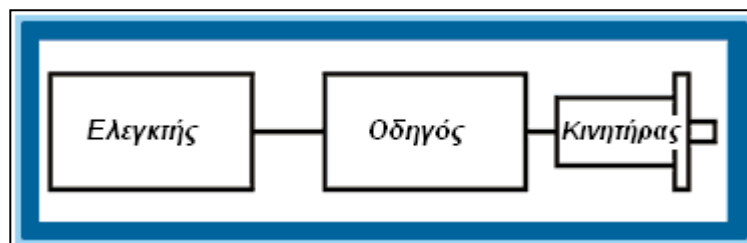
- **Σύγκριση υβριδικών βηματικών κινητήρων με βηματικούς κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.**

Σε αυτούς τους δύο τύπους κινητήρων, τα ηλεκτρονικά κυκλώματα οδήγησης όσο και ο σχεδιασμός των τυλιγμάτων γενικά είναι τα ίδια. Οι διαφορές τους είναι σε θέματα κόστους και ανάλυσης. Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη είναι πιο οικονομικοί καθώς το περιτύλιγμα τους κατασκευάζεται εύκολα. Αντίθετα οι υβριδικοί κατασκευάζονται δυσκολότερα, διότι απαιτούν δέσμες μεταλλικών φύλλων με πιο περίπλοκα τυλίγματα. Επίσης, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη κατασκευάζονται με μέγεθος βήματος από 30° μέχρι 3,6. Αντιθέτως σε ένα υβριδικό μοτέρ είναι εύκολο να χαράξει κανείς οδοντώσεις σε μικρές αποστάσεις πάνω στον μόνιμο μαγνήτη και να πετύχει βήματα μικρότερα από 1,8°. Τέλος, οι υβριδικοί κινητήρες αναφέραμε ότι έχουν χαρακτηριστικά και από τους δύο τύπους. Οπότε, όπως είναι λογικό παρουσιάζουν πρόβλημα δονήσεων και θορύβου, όπως οι κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Επίσης, μπορούν να κινηθούν με ταχύτητες μεγαλύτερες από τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, αν και ελάχιστοι κινητήρες μπορούν να δημιουργήσουν επαρκή ροπή όταν κινούνται με ταχύτητες μεγαλύτερες από 5000 βήματα το δευτερόλεπτο.

## Κεφάλαιο 4

### Οδήγηση βηματικών κινητήρων

#### 4.1 Αρχή λειτουργίας συστήματος έλεγχου βηματικών κινητήρων



Εικόνα 4.1 – Διάγραμμα λειτουργίας ενός βηματικού κινητήρα

Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει ένα τυπικό σύστημα στο οποίο βασίζεται η λειτουργία ενός βηματικού κινητήρα. Οι κινητήρες αυτοί όπως είναι γνωστό δεν λειτουργούν τόσο απλά μονοί τους. Ο ελεγκτής του κινητήρα, ο οδηγός του κινητήρα και ο ίδιος ο κινητήρας αποτελούν αυτό το σύστημα και πρέπει όλοι να είναι παρόντες. Η απόδοση του κάθε εξαρτήματος από αυτούς θα επηρεάσει και την απόδοση των υπόλοιπων εξαρτημάτων.

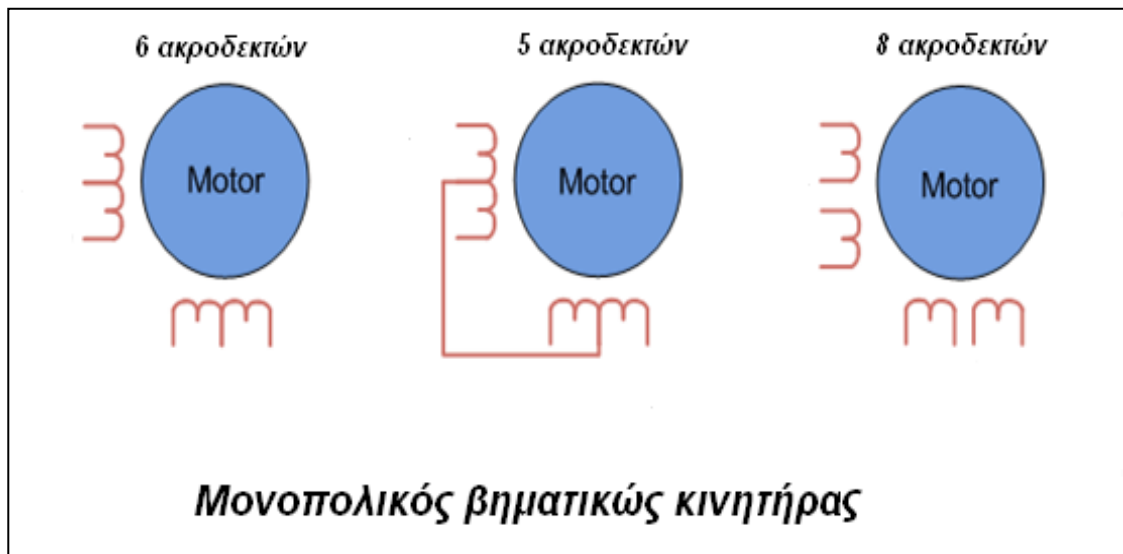
Πρώτη είναι η γεννήτρια παλμών, γνώστη και ως ελεγκτής βηματικού κινητήρα. Η γεννήτρια παλμών στην έξοδο της θα παράγει παλμούς-εντολές τις οποίες ο βηματικός κινητήρας μας θα πρέπει να ακολουθήσει. Μεταβαλλόντας την συχνότητα της των παλμών μας, η γεννήτρια μας θα μπορέσει να δώσει εντολές στον κινητήρα μας όπως να επιταχύνει, να λειτουργήσει με κάποια ταχύτητα, να επιβραδύνει η και να σταματήσει. Η γεννήτρια παλμών είναι άκρως απαραίτητη στο σύστημα μας αλλιώς ο κινητήρας μας δεν θα μπορέσει να λειτουργήσει.

Το επόμενο στοιχείο του συστήματος είναι ο οδηγός του βηματικού κινητήρα. Ο ρόλος του οδηγού είναι να ελέγχει το μέγεθος και την κατεύθυνση του ρεύματος μέσα στις περιελίξεις (τυλίγματα) του κινητήρα. Ο οδηγός λαμβάνει παλμούς από την γεννήτρια παλμών και καθορίζει πως και πότε οι περιελίξεις θα πρέπει να ενεργοποιηθούν. Οι περιελίξεις μας θα πρέπει να ενεργοποιούνται με μια συγκεκριμένη ακολουθία για να δημιουργηθεί κίνηση.

#### 4.2 Μονοπολικοί και διπολικοί βηματικοί κινητήρες - Συνδεσμολογίες τυλιγμάτων

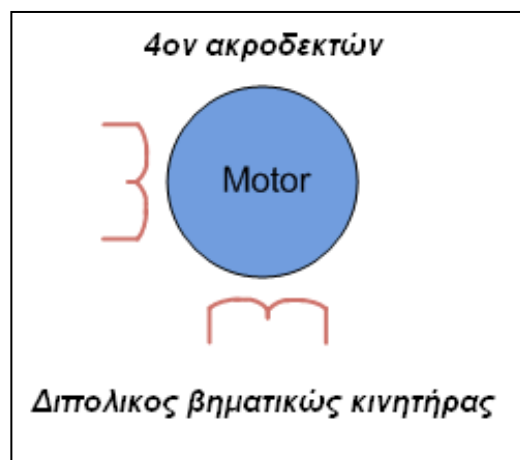
Οι βηματικοί κινητήρες είναι κυρίως διφασικοί κινητήρες που μπορεί να είναι **μονοπολική** ή **διπολική**.

Στους **μονοπολικούς** βηματικούς κινητήρες υπάρχουν δύο περιελίξεις ανά φάση. Οι δύο περιελίξεις σε έναν πόλο μπορεί να έχουν ένα κοινό αγωγό στο κέντρο. Οι μονοπολικοί βηματικοί κινητήρες λοιπόν, έχουν πέντε, έξι ή οκτώ ακροδέκτες όπως αναλυτικά φαίνονται και στην παρακάτω εικόνα. Ο μονοπολικός κινητήρας είναι απλός στην λειτουργία του, επειδή δεν υπάρχει καμία ανάγκη να αντιστρέψουμε το ρεύμα στο κύκλωμα οδήγησης. Καλούνται επίσης και κινητήρες bifilar



Εικόνα 4.2 – Ακροδέκτες στους μονοπολικούς βηματικούς κινητήρες

Στους **διπολικούς** βηματικούς κινητήρες υπάρχει μόνο ένας ακροδέκτης σε κάθε πόλο. Αυτό σημαίνει λοιπόν ότι σε έναν διπολικό βηματικό κινητήρα θα έχουμε 4 ακροδέκτες όπως απεικονίζεται και παρακάτω. Να σημειώσουμε εδώ ότι για να αλλάξουμε την κατεύθυνση του ρεύματος θα πρέπει να το κάνουμε από το κύκλωμα οδήγησης και αυτό καθίστα τον οδηγό του κινητήρα μας να είναι λίγο πιο πολύπλοκος σε σχέση με τους μονοπολικούς κινητήρες.



Εικόνα 4.3 - Ακροδέκτες στους διπολικούς βηματικούς κινητήρες



**Μονοπολική λειτουργία** είναι η οδήγηση των τυλιγμάτων, η οποία γίνεται με πηγή σταθερής πολικότητας. Οι μονοπολικοί κινητήρες αποτελούνται από δύο τυλίγματα που το καθένα έχει έναν ενδιάμεσο ακροδέκτη. Αυτοί οι ακροδέκτες βγαίνουν στην έξοδο είτε χωριστά είτε ενωμένοι σε ένα καλώδιο. Έτσι οι μονοπολικοί κινητήρες έχουν πέντε ή έξι καλώδια. Ανεξάρτητα από το πλήθος των καλωδίων, η οδήγηση γίνεται με τον ίδιο τρόπο. Ο κεντρικός ακροδέκτης συνδέεται με την τροφοδοσία. Στη μονοπολική λειτουργία υπάρχει έλξη των βόρειων ή νότιων πόλων του μαγνήτη-ρότορα με τους αντίστοιχους πόλους του στάτορα. Έτσι, η φορά του ρεύματος μέσα από τα τυλίγματα του στάτορα, καθορίζει ποιοι θα είναι οι πόλοι του ρότορα που θα έλκονται από τους πόλους του στάτορα. Η φορά του ρεύματος είναι σταθερή και δεν αντιστρέφεται ποτέ. Το ρεύμα ρέει κάθε φορά στο μισό του αντίστοιχου τυλίγματος, από το ένα άκρο ως τον ενδιάμεσο ακροδέκτη. Με τον τρόπο αυτό το κάθε τύλιγμα μετατρέπεται σε μαγνήτη με πολικότητα που εξαρτάται από το ρεύμα. Ένα κύκλωμα οδήγησης οδηγεί την κάθε περιέλιξη σε κατάσταση ON ή OFF με τη βοήθεια ηλεκτρονικών διακοπών.

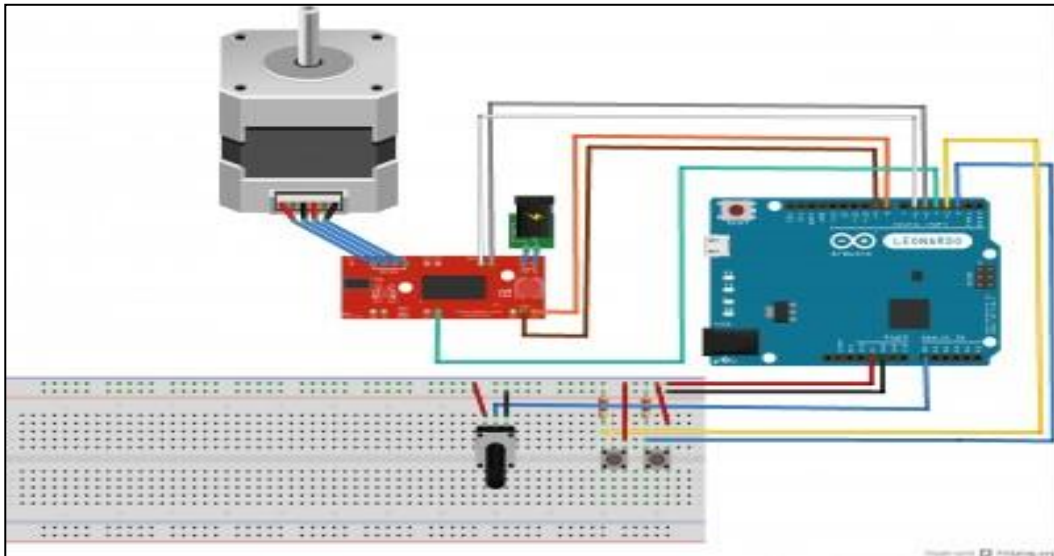
**Διπολική λειτουργία** είναι η οδήγηση των τυλιγμάτων, η οποία γίνεται με διαδοχική αντιστροφή της φοράς του ρεύματος. Σε σύγκριση με την μονοπολική, στην διπολική η μεσαία λήψη των τυλιγμάτων μένει ασύνδετη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ρεύμα να ρέει ολόκληρο το τύλιγμα αντί να ρέει μόνο το μισό. Με αυτόν τον τρόπο είναι ενεργοποιημένες και οι τέσσερις περιελίξεις του βηματικού κινητήρα, με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη δυνατή ροπή. Η ροή του ρεύματος μέσα από ένα διπολικό κινητήρα είναι διπλής κατεύθυνσης. Έτσι χρειάζεται να αλλάζει η πολικότητα στα άκρα κάθε ενός τυλίγματος. Το ρεύμα θα ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση, όταν η πολικότητα αντιστραφεί. Με χρησιμοποίηση κατάλληλων κυκλωμάτων επιτυγχάνεται η αλλαγή της πολικότητας. Όπως και οι μονοπολικοί, έτσι και οι διπολικοί κινητήρες μπορούν να περιστραφούν με ολόκληρο και μισό βήμα αν τροφοδοτηθούν με σήματα σε συγκεκριμένη διαδοχή.

#### 4.3 Σύγκριση μονοπολικής και διπολικής λειτουργίας

Οι βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη ή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης είναι διαθέσιμοι είτε σε μονοπολική είτε σε διπολική λειτουργία. Η επιλογή εξαρτάται από την απλότητα του κυκλώματος οδήγησης. Στην διπολική λειτουργία έχουμε σχεδόν 30% περισσότερη ροπή σε σύγκριση με την ισοδύναμη μονοπολική. Ο λόγος είναι ότι κάθε φορά στην μονοπολική ενεργοποιείται μόνο το μισό τύλιγμα, αντίθετα η διπολική χρησιμοποιεί όλο το τύλιγμα. Βέβαια, στην διπολική, για την επίτευξη μεγαλύτερης ροπής απαιτείται πιο πολύπλοκο κύκλωμα οδήγησης.

#### 4.4 Οδήγηση βηματικού κινητήρα

Οι βηματικοί κινητήρες απαιτούν κάποιο εξωτερικό ηλεκτρικό εξάρτημα για να λειτουργήσουν. Αυτά τα εξαρτήματα τυπικά περιλαμβάνουν ένα τροφοδοτικό, κύκλωμα λογικής ακολουθίας, μεταγωγές εξαρτημάτων και μια πηγή ωρολογιακού παλμού για να προσδιοριστεί ο ρυθμός του βήματος. Πλέον πόλοι κατασκευαστές έχουν ενσωματώσει όλα αυτά τα συστήματα σε ένα πλήρες πακέτο οδηγού. Κάθε βηματικός κινητήρας είναι συμβατός με τον αντιστοιχώ οδηγό του κύριος ανάλογα με το αν είναι μονοπολικός ή διπολικός κινητήρας και τη συνδεσμολογία θα κάνουμε στα τυλίγματα του στητή.



Εικόνα 4.4 – Σύστημα έλεγχου ενός βηματικού κινητήρα με arduino

## 4.5 Είδη Οδηγών

### *Μονοπολικός Οδηγός (Unipolar Driver)*

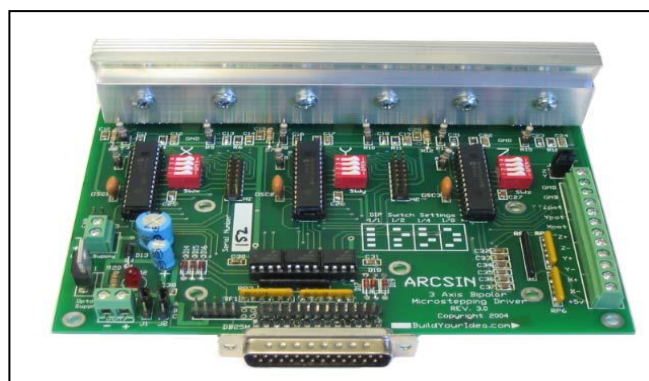
Αυτό το είδος οδηγού είναι κύριος μια απλή οδήγηση που λειτουργεί καλά σε χαμηλούς βηματικούς ρυθμούς, ωστόσο όταν αυξήσουμε την ταχύτητα η ροπή μειώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό. Είναι συμβατό σε κινητήρες που έχουν τύλιγμα με μεσαία λήψη και απαιτείται διπλή σπείρα σε κάθε πόλο αφού η εναλλαγή στα τυλίγματα του στητή πραγματοποιούνται με την μεταφορά του ρεύματος στο δεύτερο τύλιγμα. Ονομάζεται μονοπολική οδήγηση διότι το ρεύμα έχει μόνο μια συγκεκριμένη φορά. Επίσης το ρεύμα καθορίζεται από την αντίσταση των τυλιγμάτων και από την τάση τροφοδοσίας. Η φορά περιστροφής του κινητήρα εξαρτάται από το ποιος ακροδέκτης συνδέεται με την τροφοδοσία.



Εικόνα 4.5 - Unipolar Driver

### *Διπολικός Οδηγός (Bipolar Driver)*

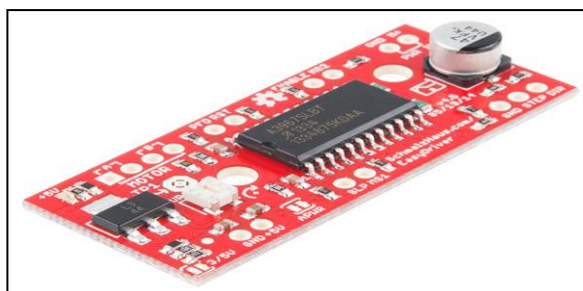
Η διπολική οδήγηση έχει πολύ καλύτερα αποτελέσματα από την μονοπολική. Εδώ τα τυλίγματα του στητή δεν έχουν μεσαία λήψη ενώ για να αλλάξουμε την φορά περιστροφής πρέπει να αλλάξουμε την φορά του ρεύματος και στις δυο φάσεις. Οι οδηγήσεις αυτές παράγουν μεγαλύτερη ροπή ιδιικά στις πιο χαμηλές ταχύτητες αλλά ως μειονέκτημα έχει το ότι είναι ηλεκτρονικά πολύπλοκες πλέον.



Εικόνα 4.6 - Bipolar Driver

### *L/R Οδηγός (L/R Driver)*

Ο σχεδιασμός αυτού του οδηγού είναι η βάση για τους περισσότερους από τους παλιούς οδηγούς. Αυτός ο οδηγός προσφέρει ολοκλήρου βήματος και μισού βήματος λειτουργία (βλέπε μέθοδοι βηματισμού), αλλά δεν επιτρέπει μεταβλητό έλεγχο του τρέχοντος επίπεδου. Οι βηματικοί κινητήρες οδηγούμενοι από L/R driver παράγουν χαμηλή έως μέτρια απόδοση. Ως εκ τούτου ο οδηγός αυτός χρησιμοποιείται συνήθως για την αντικατάσταση σε παλαιότερα συστήματα βηματικών κινητήρων. Δεν συνιστάτε να χρησιμοποιήσουμε L/R driver για νέο συστήματα έλεγχου κίνησης. Ο οδηγός αυτός είναι χαμηλής επίδοσης από το γεγονός ότι η πλήρης ονομαστική τρεχούμενη ροπή παρέχεται μόνο σε χαμηλές έως μέτριες ταχύτητες, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της ισχύος εξόδου. Ωστόσο, η παραγόμενη δύναμη και ταχύτητα μπορεί να είναι απολύτως επαρκής για ορισμένες εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας.



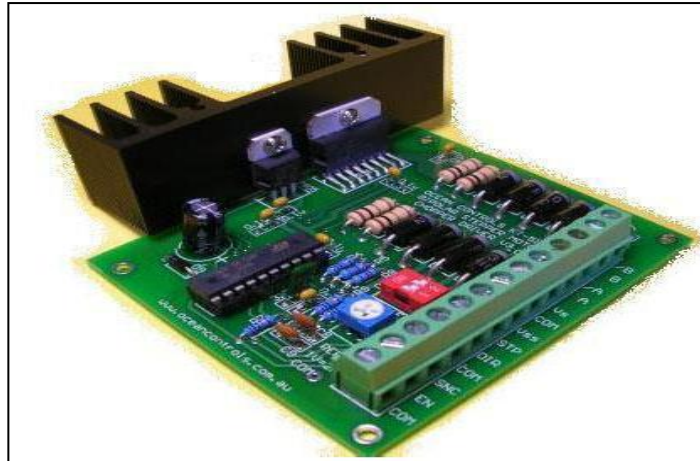
Εικόνα 4.7 - L/R Driver

### *Οδηγός τύπου chopper*

Οι οδηγοί τύπου chopper είναι μακράν οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι οδηγοί για βιομηχανικές εφαρμογές. Αν και είναι συνήθως πιο ακριβά για το σχεδιασμό, προσφέρουν υψηλή επίδοση και υψηλή αποδοτικότητα. Χρησιμοποιεί διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) για να ελέγξει το μέσο ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό για τους οδηγούς chopper είναι η ικανότητα οδήγησης βηματικών κινητήρων σε κατάσταση μικροβηματισμού (microstep mode). Έτσι για εφαρμογές που χρειαζόμαστε ομαλότητα είναι το καταλληλότερο. Διατηρούν σχετικά σταθερό ρεύμα στο κινητήρα μας σε όλες τις ταχύτητες. Μειονεκτήματα στους οδηγούς chopper είναι ότι μπορεί να παράγουν EMI\* και RFI\*\*, όπως και να έχει ο κινητήρας μας προβλήματα θέρμανσης. Ένα άλλο μειονέκτημα σε αυτό το τρόπο οδηγήσεις είναι ότι παράγεται ένας ηλεκτρικός θόρυβος (αρμόνικες).

\* EMI ή Electromagnetic interference: Είναι οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, οποιαδήποτε ανεπιθύμητη ηλεκτρομαγνητική εκπομπή ή οποιαδήποτε ηλεκτρική ή ηλεκτρονική διαταραχή είτε είναι φυσικές είτε τεχνητές. Προκαλεί μια ανεπιθύμητη αντίδραση, δυσλειτουργία και υποβάθμιση της απόδοσης του ηλεκτρολογικού μας εξοπλισμού.

\*\* RFI ή Radio frequency interference: Είναι οι παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων που έχουν ως αποτέλεσμα ανεπιθύμητη ηλεκτρική ενέργεια εντός του φάσματος μετάδοσης ραδιοσυχνοτήτων.



Εικόνα 4.8 – chopper driver

### Οδηγός τύπου Bilevel

Ο οδηγός τύπου Bilevel χρησιμοποιεί δυο τάσης: υψηλή και χαμηλή. Ο οδηγός Bilevel χρησιμοποιεί μια υψηλή τάση για να λάβει μια γρήγορη τιμή του χρόνου για την αύξηση του ρεύματος στα τυλίγματα του κινητήρα μας. Όταν ξεπεραστεί το μέγιστο επίπεδο ρεύματος, ο οδηγός απενεργοποιεί τη υψηλή τάση και διατηρεί το υπάρχον επίπεδο ρεύματος παρέχοντας του μια χαμηλή τάση. Ενώ ο κινητήρας μας κάνει βήματα, η υψηλή τάση οδηγεί το ρεύμα στα τυλίγματα, παρέχοντας περισσότερο από το απαιτούμενο ρεύμα καθώς αυξάνεται ο ρυθμός βηματισμού. Αυτή η εναλλαγή χαμηλής-υψηλής-χαμηλής τάσης έχει ως αποτέλεσμα μια υψηλότερη απόδοση και ένα χαμηλότερο κόστος από αυτά του chopper και των υπόλοιπων σχηματισμών. Ο οδηγός τύπου Bilevel εξαλείφει την ανάγκη για την πτώση της αντιστάσεις, αλλά είναι κάπως πιο ακριβό για να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί. Λόγο όμως της δημοτικότητας του οδηγού αυτού, η τιμή του σιγά σιγά μειώνεται. Επίσης δεν έχουν προβλήματα θέρμανσης ή RFI και EMI τα όποια σχετίζονται με των οδηγό τύπου chopper. Τέλος οι οδηγοί τύπου Bilevel μπορούν να οδηγήσουν μόνο κινητήρες στο μισό και στο ολόκληρο βήμα.



Εικόνα 4.9 – Bilevel Driver

## Κεφάλαιο 5

### Μέθοδοι βηματισμού(Step modes)

#### 5.1 Εισαγωγή

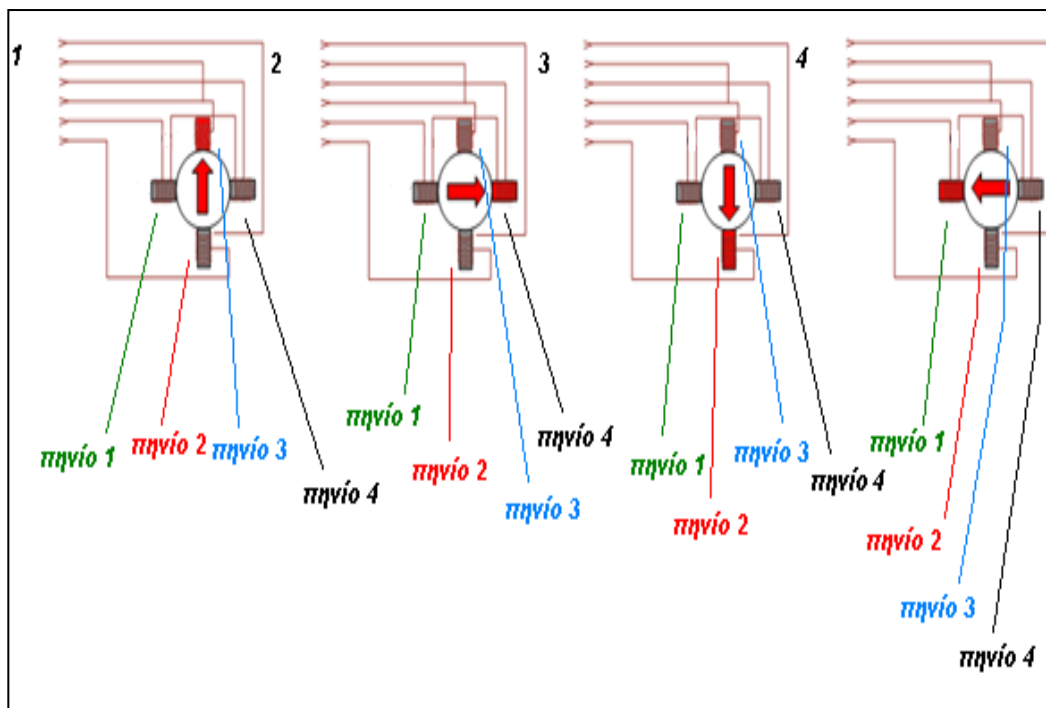
Οι διαφορετικές μέθοδοι οδήγησης έγκειται στις διαφορετικές συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων του στάτη. Για την επίτευξη του επιθυμητού βήματος όμως, ανεξάρτητα από τις συνδεσμολογίες αυτών των τυλιγμάτων παίζει ρόλο η σειρά και η ταχύτητα ενεργοποίησής τους. Οι τρόποι λειτουργίας ενός βηματικού κινητήρα και παράλληλα οι μέθοδοι βηματισμού διακρίνονται ανάλογα με τις φάσεις που ενεργοποιούνται.

Έτσι λοιπόν διακρίνουμε 4 βασικές μεθόδους:

- A) Μονό βήμα ή single step (μια φάση ενεργοποιημένη)
- B) Ολόκληρου βήματος ή full step (δυο φάσεις ενεργοποιημένες)
- Γ) Μισού βήματος ή half step ( μια και δυο φάσεις ενεργοποιημένες)
- Δ) Μικροβηματισμός ή microstepping

Η μέθοδος του μονού βήματος και του ολόκληρου βήματος βασίζονται στην μονοπολική λειτουργία ενώ η μέθοδος μισού βήματος στην διπολική λειτουργία.

#### 5.2 Μονό βήμα ή single step

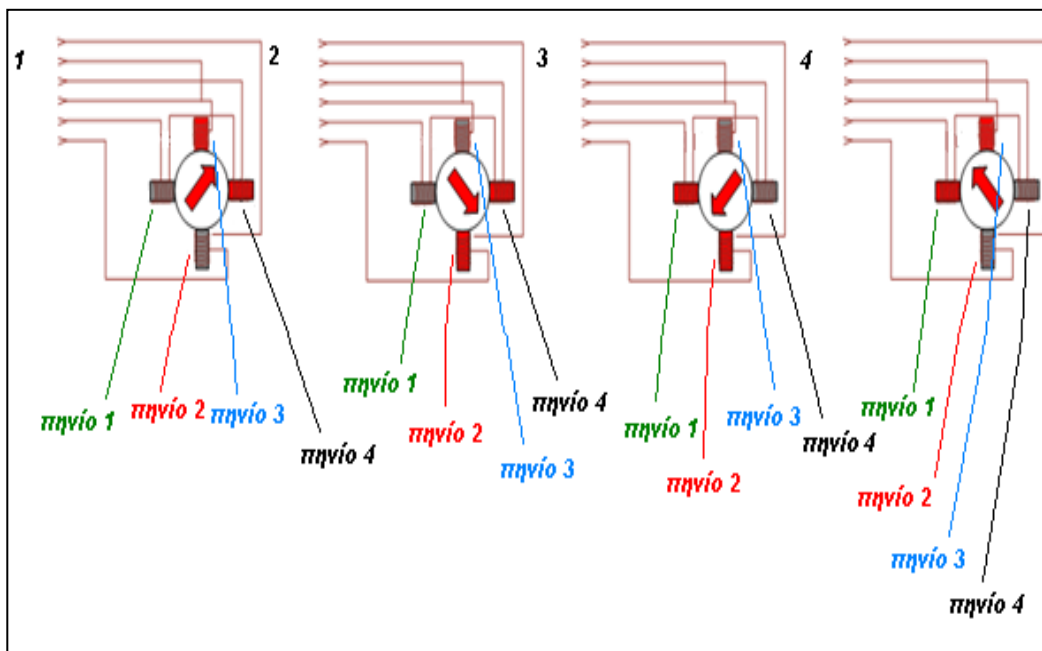


Εικόνα 5.1 – Λειτουργία μονού βήματος. Σειρά ενεργοποίησης τυλιγμάτων

ΧΡΟΝΟΣ	ΠΗΝΙΟ 3	ΠΗΝΙΟ 4	ΠΗΝΙΟ 2	ΠΗΝΙΟ 1
1	ON	OFF	OFF	OFF
2	OFF	ON	OFF	OFF
3	OFF	OFF	ON	OFF
4	OFF	OFF	OFF	ON

Όπως απεικονίζεται αναλυτικά στην εικόνα 5.1, στην λειτουργία αυτή σε κάθε βήμα ενεργοποιείται διαδοχικά μία από τις τέσσερις περιελίξεις. Αν παρατηρήσουμε τον πίνακα θα καταλάβουμε πως η συνεχής περιστροφή επιτυγχάνεται με την ενεργοποίηση των διαδοχικών τυλιγμάτων με τη σειρά. Αυτός είναι ο πιο απλός τρόπος βηματισμού ενός κινητήρα και χρησιμοποιείται συνήθως όταν η ροπή και η ταχύτητα δεν είναι σημαντική. Για παράδειγμα με την μέθοδο αυτή ένας κινητήρας χρειάζεται 48 παλμούς για μία περιστροφή, αν υποθέσουμε κάθε παλμός κινεί το ρότορα κατά 7,5°. Η επόμενη ακολουθία παλμών πρέπει να επαναληφθεί 12 φορές για μία πλήρη περιστροφή. Η λειτουργία αυτή απαιτεί την ελάχιστη ποσότητα ενεργείας από το τροφοδοτικό συγκριτικά με κάθε άλλο είδος βηματισμού.

5.3 Ολόκληρου βήματος ή full step

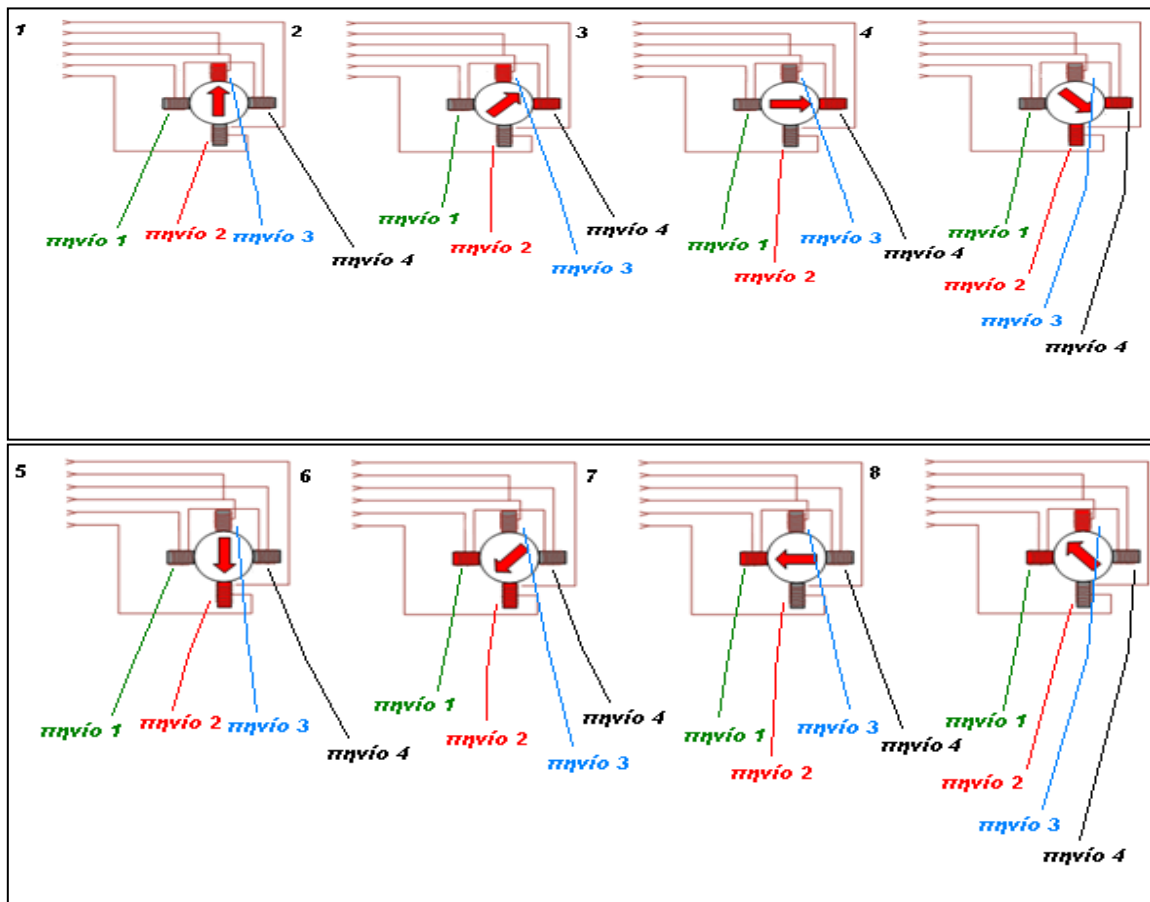


Εικόνα 5.2 - Λειτουργία ολόκληρου βήματος. Σειρά ενεργοποίησης τυλιγμάτων

ΧΡΟΝΟΣ	ΠΗΝΙΟ 3	ΠΗΝΙΟ 4	ΠΗΝΙΟ 2	ΠΗΝΙΟ 1
1	ON	ON	OFF	OFF
2	OFF	ON	ON	OFF
3	OFF	OFF	ON	ON
4	ON	OFF	OFF	ON

Η μέθοδος αυτή όπως απεικονίζεται και στο παραπάνω σχήμα ενεργοποιεί δυο τυλίγματα (πηνία) κάθε φορά. Αυτός ο τρόπος δίνει καλές επιδόσεις ροπής και ταχύτητας με ελάχιστα προβλήματα συντονισμού. Η διπλή αυτή ενεργοποίηση των τυλιγμάτων δίνει περίπου 30-40% περισσότερη ροπή από την προηγούμενη μέθοδο που γνωρίσαμε παραπάνω. Ωστόσο αυτό χρειάζεται την διπλασία απαιτούμενη ενέργεια από την τροφοδοσία συγκριτικά με την μέθοδο του μόνου βήματος. Ο κινητήρας και στην μέθοδο αυτή χρειάζεται 48 παλμούς για μία περιστροφή, γυρίζοντας κάθε παλμός το ρότορα κατά 7,5° αν λάβουμε υπόψη το προηγούμενο παράδειγμα. Οπτικά ο βηματισμός σε λειτουργία μονού βήματος και ολόκληρου βήματος είναι ίδια .

5.4 Μισού βήματος



Εικόνα 5.3 - Λειτουργία μισού βήματος. Σειρά ενεργοποίησης τυλιγμάτων

ΧΡΟΝΟΣ	ΠΗΝΙΟ 3	ΠΗΝΙΟ 4	ΠΗΝΙΟ 2	ΠΗΝΙΟ 1
1	ON	OFF	OFF	OFF
2	ON	ON	OFF	OFF
3	OFF	ON	OFF	OFF
4	OFF	ON	ON	OFF
5	OFF	OFF	ON	OFF
6	OFF	OFF	ON	ON
7	OFF	OFF	OFF	ON
8	ON	OFF	OFF	ON



όποι περιστροφής που περιγράψαμε παραπάνω προκαλούν την περιστροφή ενός ολόκληρου βήματος δηλαδή στα παραδείγματα μας  $7,5^\circ$ . Στην μέθοδο του μισού βήματος συνδυάζουμε τους δυο τρόπους μόνου και ολόκληρου βήματος και έτσι επιτυγχάνουμε περιστροφή με μισό βήμα. Ανάμεσα στα βήματα διπλής ενεργοποίησης παρεμβάλλεται ένα βήμα μονής ενεργοποίησης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ροπή που αναπτύσσεται σε αυτή την περίπτωση δεν είναι σταθερή καθώς εναλλάσσονται τα βήματα. Για βήματα ακόμα μικρότερης γωνίας, ο δρομέας μας θα πρέπει να έχει περισσότερους πόλους. Έχει κατασκευαστεί βηματικός κινητήρας ακόμη και με 100 πόλους που εκεί καταλαβαίνουμε ότι το βήμα δεν γίνεται καν αντιληπτό. Η λειτουργία αυτή εξασφαλίζει ομαλότερη κίνηση του άξονα περιστροφής, αλλά όταν έχουμε μισά βήματα, η ροπή είναι μίση. Το αποτέλεσμα είναι αυτές οι θέσεις να μην είναι κατάλληλες για τελικές. Η λειτουργία μισού βήματος εξομαλύνει την περιστροφή, λόγω του διπλασιασμού των βημάτων, αλλά η ακρίβεια στον έλεγχο της τελικής θέσης παραμένει η ίδια. Ένα πλεονέκτημα στην μέθοδο αυτή είναι ότι δεν χρειάζεται να γίνει αλλαγή στα ηλεκτρονικά του οδηγού. Πρακτικά ένας βηματικός κινητήρας χρειάζεται διπλό βηματισμό σε αυτή την μέθοδο, αν θυμηθούμε όπως ποιο πάνω ότι ένα ολόκληρο βήμα είναι  $7,5^\circ$ , τότε με λειτουργία μισού βήματος θα χρειαστούμε 96 παλμούς για μία περιστροφή. Έτσι ο κάθε παλμός θα κινεί το ρότορα κατά  $3,75^\circ$ . (αυτό και πάλι με το παράδειγμα που έχουμε θέση)

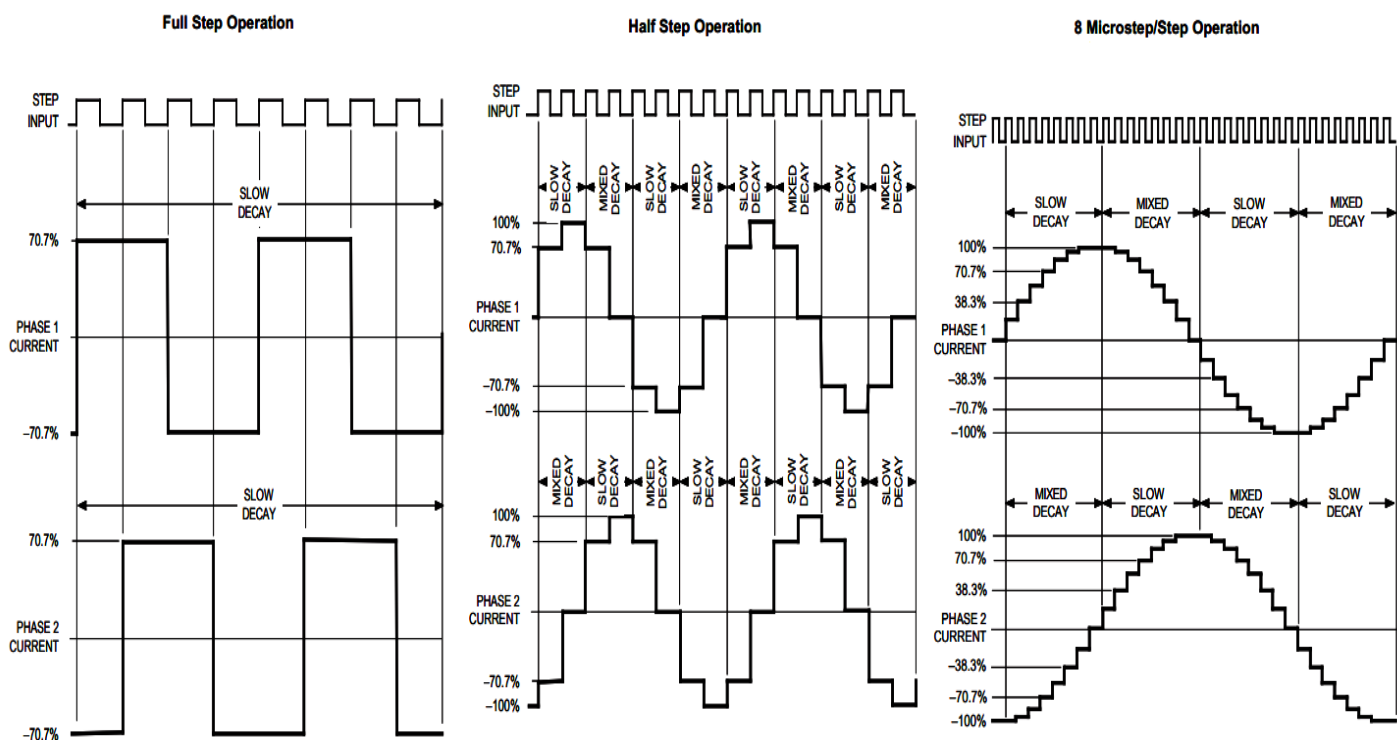
## 5.5 Μικροβηματισμός

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. Μειώνει ομαλά την ταχύτητα του βηματικού κινητήρα και ελαχιστοποιεί τις επιπτώσεις των χαμηλών συντονισμού ταχύτητας. Ο μικροβηματισμός παράγει περίπου 30% λιγότερη ροπή από την λειτουργία πλήρους βήματος με διπλή φάση.

Ο στόχος του μικροβηματισμού ουσιαστικά είναι να λειτουργεί ο βηματικός μας κινητήρας ομαλότερα. Λόγο της κατασκευής και της φύσης των βηματικών κινητήρων η περιστροφή τους δεν είναι ομαλή καθώς ο κινητήρας κινείται βήμα-βήμα. Αυτό ωστόσο λόγω της γρήγορης εναλλαγής των βημάτων δεν παρατηρείτε ιδιαίτερα. Για της εφαρμογές όμως που η ομαλότητα είναι απαραίτητη ο μικροβηματισμός επιβάλλεται.

Ο ελεγκτής μικροβηματισμού είναι ένας οδηγός που στέλνει παλμούς στον κινητήρα σε μορφή ιδανικής κυματομορφής. Η ιδέα του μικροβηματισμού έρχεται από κυματομορφές. Δυο κυματομορφές που έχουν διαφορά φάσης  $90^\circ$  είναι ο απόλυτα τέλει οδηγός για ομαλή κίνηση.

Στην παρακάτω εικόνα θα δούμε λεπτομερώς το πώς λειτουργεί ο μικροβηματισμός σε σύγκριση με τις λειτουργίες μόνου και πλήρους βήματος.



Εικόνα 5.4 – Λειτουργία microstepping σε σύγκριση με της άλλες μεθόδους βηματισμού.

## Κεφάλαιο 6

### Χαρακτηριστικά βηματικών κινητήρων

#### 6.1 Εισαγωγή/Γενικά χαρακτηριστικά

Ο βηματικός κινητήρας είναι ένας σταθερός μετατροπέας παραγωγής δύναμης, όπου η δύναμη ορίζεται ως το γινόμενο της ροπής με την ταχύτητα.  $F = T \times u$ . Αυτό σημαίνει ότι η ροπή των μηχανών είναι αντίστροφη της ταχύτητας. Για να βοηθήσουμε να καταλάβουμε γιατί η δύναμη ενός βηματικού κινητήρα είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα, πρέπει να κατασκευάσουμε (μεταφορικά) έναν ιδανικό βηματικό κινητήρα. Ένας ιδανικός βηματικός κινητήρας θα είχε μη μηχανική τριβή, η ροπή του θα ήταν ανάλογη προς τις αμπερ-στροφές και το μόνο ηλεκτρικό χαρακτηριστικό του θα ήταν η αυτεπαγωγή. Οι αμπερ-στροφές απλά σημαίνουν ότι η ροπή είναι ανάλογη προς τον αριθμό στροφών του καλωδίου στο στάτη της μηχανής πολλαπλασιαζόμενο με το ρεύμα που περνά μέσω εκείνων των στροφών του καλωδίου. Οποτεδήποτε υπάρχουν στροφές ενός καλωδίου γύρω από ένα μαγνητικό υλικό όπως ο σίδηρος στο στάτη της μηχανής, τότε αποκτάει μια ηλεκτρική ιδιότητα, την αυτεπαγωγή. Η αυτεπαγωγή περιγράφει την ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα μαγνητικό πεδίο όταν περάσει ρεύμα μέσω μιας σπείρας αυτού του καλωδίου. Η αυτεπαγωγή ( $L$ ) έχει μια ιδιότητα που ονομάζετε επαγωγική άεργη αντίσταση, η οποία για τους σκοπούς αυτής της συζήτησης μπορεί να θεωρηθεί ως αντίσταση ανάλογη προς τη συχνότητα και επομένως της ταχύτητας του κινητήρα. Σύμφωνα με το νόμο του Ohm, το ρεύμα είναι ίσο με την τάση που διαρρέει μια αντίσταση προς την αντίσταση αυτή. Σε αυτήν την περίπτωση αντικαθιστούμε την επαγωγική άεργη αντίσταση με την αντίσταση στο νόμο του Ohm και καταλήγουμε πως το ρεύμα των κινητήρων είναι αντίστροφο της ταχύτητας τους. Δεδομένου ότι η ροπή είναι ανάλογη προς τις αμπερ-στροφές (ρεύμα επί των αριθμό στροφών του καλωδίου στο τυλίγμα), και το ρεύμα είναι αντίστροφο της ταχύτητας, η ροπή πρέπει επίσης να είναι αντίστροφη της ταχύτητας. Σε έναν ιδανικό βηματικό κινητήρα, όσο η ταχύτητα προσεγγίζει το μηδέν τόσο η ροπή θα προσέγγιζε το άπειρο ενώ με άπειρη ταχύτητα η ροπή θα ήταν μηδέν. Επειδή το ρεύμα είναι ανάλογο προς τη ροπή, το ρεύμα θα ήταν επίσης άπειρο σε μηδενική ταχύτητα. Ηλεκτρικά, μια πραγματική μηχανή διαφέρει από ένα ιδανικό κινητήρα καταρχήν από την ύπαρξη μιας διάφορης του μηδενός αντίστασης τυλίγματος. Επίσης ο σίδηρος στη μηχανή υπόκειται στο μαγνητικό κορεσμό, καθώς επίσης και απώλεια ρεύματος στον στροβιλισμό και λόγω υστέρησης. Ο μαγνητικός κορεσμός θέτει ένα όριο στο ρεύμα και στην αναλογικότητα της ροπής ενώ ο στροβιλισμός και η υστέρηση (απώλειες σιδήρου) μαζί με την αντίσταση του τυλίγματος (απώλειες χαλκού) προκαλούν έκλυση θερμότητας.

## 6.2 Ροπή στρέψεως

Εάν ( $Z$ ) είναι ο συνολικός αριθμός των αγωγών του επαγωγικού τύμπανου, η ροπή στρέψεως, επί όλων των αγωγών καθορίζει την συνολική ροπή στρέψεως, που λέγεται και ροπή στρέψεως του κινητήρα. Μ (ονομάζεται και εσωτερική ροπή της μηχανής).

$T_a = Z \times M_a$  και βρίσκουμε :

$$T_a = T_s \times \Phi \times IR$$

Όπου:

$$T_s = \frac{2P}{2a} \times \frac{Z}{2\pi}$$

(παράμετρος ροπής του κινητήρα χαρακτηριστική σταθερά κάθε συγκεκριμένης μηχανής)

Επειδή  $\Phi = f(I_d, I_r)$  δηλαδή η χρήσιμη μαγνητική ροή ανά πόλο εξαρτάται κυρίως από το ρεύμα διεγέρσεως της μηχανής, αλλά και από το ρεύμα αντιδράσεως του επαγωγικού τύμπανου, συμπεραίνουμε ότι η ροπή στρέψεως μιας μηχανής DC εξαρτάται από την αλληλεπίδραση της μαγνητικής ροής ( $\Phi$ ) της μηχανής και του ρεύματος του επαγωγικού τύμπανου.

## 6.3 Μέγεθος και δύναμη

Εκτός από το ότι έχουν ταξινομηθεί από την γωνία του βηματος οι βηματικοι κινητήρες ταξινομούνται επίσης ανάλογα με το μέγεθος του πλαισίου που αντιστοιχεί στη διάμετρο του σώματος του κινητήρα. Για παράδειγμα, ένας βηματικός κινητήρας με 11 βήματα έχει διάμετρο σώματος περίπου 1,1 ίντσες.

Ομοίως, ένας βηματικός κινητήρας με 23 βήματα έχει διάμετρο 2,3 ίντσες (58 mm), κλπ. Το μήκος του σώματος δύναται, ωστόσο, διαφέρει από κινητήρα σε κινητήρα εντός της ίδια κατάταξη μέγεθος του πλαισίου. Σαν γενικό κανόνα, η διαθέσιμη ροπή εξόδου σε έναν κινητήρα ενός συγκεκριμένου μέγεθος πλαισίου θα αυξηθεί με την αύξηση του μήκους του σώματος.

Τα επίπεδα ισχύος για έναν IC ελεγκτή βηματικού κινητήρα συνήθως κυμαίνονται από λιγότερο του ενός watt για τους πολύ μικρούς κινητήρες μέχρι και 10 - 20 watts για μεγαλύτερες κινητήρες. Τα μέγιστα επίπεδα κατανάλωσης ισχύος ή θερμικά όρια του κινητήρα σπάνια δηλώνονται σαφή από τους κατασκευαστές. Για τον προσδιορισμό αυτό πρέπει να εφαρμόσουμε την σχέση  $P = V \times I$ . Για παράδειγμα, ένας βηματικός κινητήρας μεγέθους 23 βημάτων μπορεί να έχει 6V και 1A ανά φάση. Ως εκ τούτου, με δύο φάσεις ενεργοποιημένες ο κινητήρας έχει ονομαστική κατανάλωση ισχύος των 12 watt. Είναι συνήθης πρακτική να βαθμονομείτε ένα βηματικό κινητήρα στο επίπεδο δύναμης όπου η θερμοκρασία του κινητήρα υψώνεται 65°C πάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος ακόμη και σε αέρα. Ως εκ τούτου, εάν ο κινητήρας τοποθετηθεί σε μια ψήκτρα είναι συχνά δυνατόν να αυξηθεί το επιτρεπόμενο επίπεδο κατανάλωσης ισχύος. Αυτό είναι σημαντικό, καθώς ο κινητήρας έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιείται και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται στο μέγιστο της της κατανάλωσης ισχύος, για να είναι αποδοτική από μέγεθος/δύναμη στην έξοδο/κόστους.

#### 6.4 Αναπτυσσόμενη ροπή

Η ροπή που παράγεται από ένα βηματικό κινητήρα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες.

- Από το βήμα
- Από το ρεύμα του οδηγού στα τυλίγματα
- Από το τύπο και το σχεδιασμό του οδηγού.

Σε ένα βηματικό κινητήρα ροπή αναπτύσσεται όταν οι μαγνητικές ροές του ρότορα και του στάτορα μετατοπίζονται ο ένας από τον άλλον. Ο στάτης αποτελείται από υψηλής διαπερατότητας μαγνητικό υλικό. Η παρουσία αυτού του υλικού υψηλής διαπερατότητας προκαλεί την μαγνητική ροή να περιορίζεται ως επί το πλείστον για τις διαδρομές που ορίζεται από τη δομή του στάτη με τον ίδιο τρόπο που τα ρεύματα περιορίζονται στους αγωγούς ενός ηλεκτρονικού κύκλωμα. Αυτό χρησιμεύει για να επικεντρωθεί η ροή του ρεύματος στους πόλους του στάτορα.

Η ροπή εξόδου που παράγεται από τον κινητήρα είναι ανάλογη προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται όταν το τύλιγμα είναι ενεργοποιημένο .

Η βασική σχέση η οποία ορίζει την ένταση του μαγνητικού πεδίου ορίζεται από:

$$H = \frac{N \times i}{l}$$

όπου :

N = ο αριθμός των περιελίξεων

i = το ρεύμα

H = ένταση μαγνητικού πεδίου

l = μήκος διαδρομής μαγνητικής ροής

Αυτή η σχέση δείχνει ότι η ένταση της μαγνητικής ροής και κατά συνέπεια η ροπή είναι ανάλογη με

τον αριθμό των σπειρών του τυλίγματος και του ρεύματος και αντιστρόφως ανάλογη προς το μήκος διαδρομής της μαγνητικής ροής . Από αυτή τη βασική σχέση βλέπουμε ότι το ίδιου μεγέθους βηματικού κινητήρα θα μπορούσε να έχει πολύ διαφορετική ροπή εξόδου απλά με την αλλαγή οι του αριθμού τον περιελίξεων .

### 6.5 Χαρακτηριστική Ροπής-Γωνίας

Η χαρακτηριστική ροπής-γωνία σε ένα βηματικό κινητήρα είναι η σχέση μεταξύ της μετατόπισης του ρότορα και η ροπή που εφαρμόζεται στην άξονα του ρότορα όταν ο βηματικός κινητήρας λειτουργεί στην ονομαστική τάση του. Ένας ιδανικός βηματικός κινητήρας έχει μια ημιτονοειδή χαρακτηριστική ροπής-γωνίας όπως φαίνετε και στο παρακάτω σχήμα.

Θέσεις Α και Γ αντιπροσωπεύουν σταθερά σημεία ισορροπίας όταν καμία εξωτερική δύναμη ή φορτίο εφαρμόζεται στο δρομεα. Όταν εφαρμόζουμε μια εξωτερική δύναμη  $T_a$  στον άξονα του κινητήρα στην ουσία δημιουργούμε μια γωνιακή μετατόπιση,  $Q_a$ . Αυτή η γωνιακή μετατόπιση,  $Q_a$ , αναφέρεται ως

γωνία υστέρηση ανάλογα με το αν ο κινητήρας είναι ενεργά επιταχυνόμενος ή επιβραδυνόμενος. Όταν ο δρομέας σταματά με ένα εφαρμοσμένο φορτίο θα κάτσει στη θέση που ορίζεται από αυτή την μετατοπιζόμενη γωνία. Ο κινητήρας αναπτύσσει ροπή,  $T_a$ , και αντιστέκεται στην εφαρμοζόμενη εξωτερική δύναμη, προκειμένου να εξισορροπήσει το φορτίο. Καθώς το φορτίο αυξάνεται η γωνία μετατόπισης επίσης αυξάνεται μέχρι να φτάσει τη μέγιστη εκμεταλλεύσιμη ροπή,  $T_h$ , του κινητήρα. Μόλις αυτή η ροπή,  $T_h$ , υπερβεί την μέγιστη τιμή του, ο κινητήρας εισέρχεται σε μια ασταθή περιοχή. Σε αυτή την περιοχή μια ροπή δημιουργείται με αντίθετη κατεύθυνση και ο ρότορας υπερπηδά το ασταθές σημείο στο άμεσο επόμενο σταθερό σημείο.

Η γωνία μετατόπισης καθορίζεται με την ακόλουθη σχέση :

$$X = \frac{Z}{2\pi} \times \sin \frac{T_a}{T_h}$$

όπου :

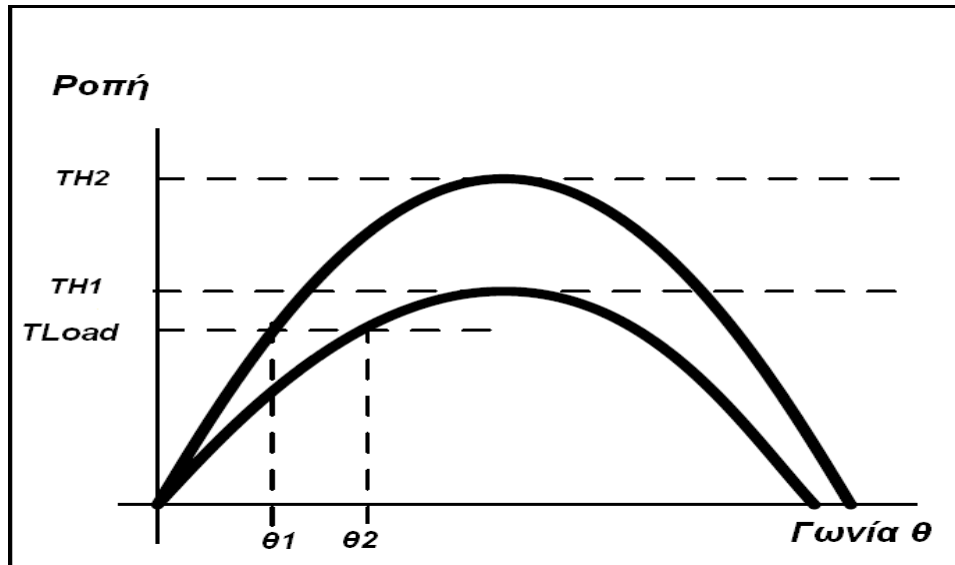
$Z$  =βαθμός οδοντώσεων ρότορα

$T_a$  = ροπή φορτίου

$T_h$  = ονομαστική εκμεταλλεύσιμη ροπή

$X$  = γωνία μετατόπισης .

Ως εκ τούτου , αν υπάρχει κάποιο πρόβλημα με το σφάλμα της γωνία του βήματος του κινητήρα σε κατάσταση ηρεμίας μπορούμε να το βελτιώσουμε αυτό αλλάζοντας το " άκαμπτα" σημεία του κινητήρα. Αυτό γίνεται με την αύξηση της εκμεταλλεύσιμης ροπής του κινητήρα. Μπορούμε να δούμε αυτό το αποτέλεσμα το οποίο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα .Η αύξηση της ροπής για ένα σταθερό φορτίο προκαλεί μια μετατόπιση της γωνίας υστέρησης από  $Q_2$  σε  $Q_1$  .

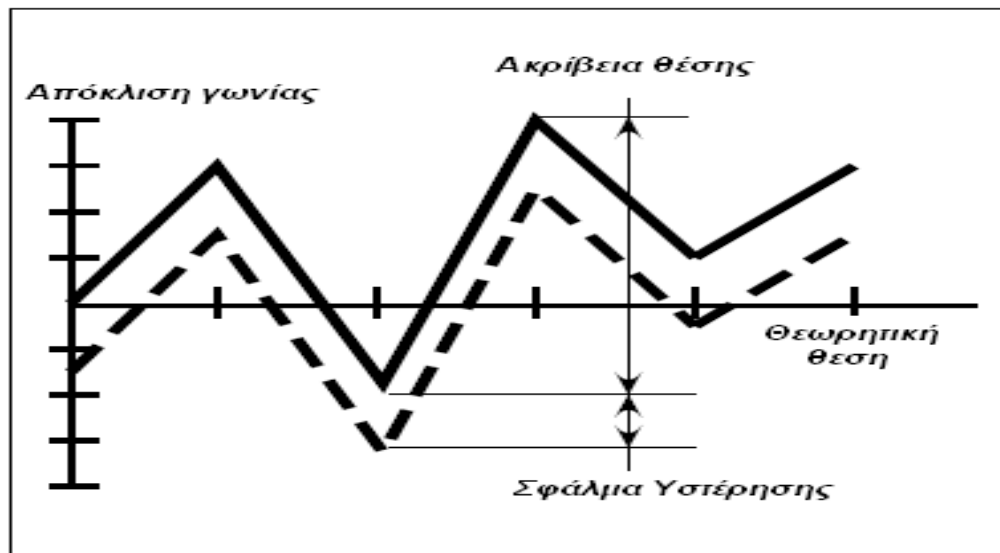


Εικόνα 6.1 - Χαρακτηριστική Ροπής-Γωνίας

### 6.6 Ακρίβεια της βηματικής γωνίας

Ένας λόγος για τον οποίο ο βηματικός κινητήρας είναι τόσο γνωστός ως μια συσκευή θέσης είναι η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα της. Συνήθως ένας βηματικός κινητήρας έχει ακρίβεια γωνίας μεταξύ 3-5 % σε ένα βήμα . Αυτό το σφάλμα είναι επίσης μη συσσωρευμένο από το βήμα σε βήμα .Η ακρίβεια του βηματικού κινητήρα είναι κυρίως η λειτουργία της μηχανικής ακρίβεια των εξαρτημάτων και η συναρμολόγησή τους .

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε μια τυπική γραφική παράσταση της ακρίβεια θέσης ενός βηματικού κινητήρα .



Εικόνα 6.2 – Χαρακτηριστική ακρίβειας της βηματικής γωνίας

**Σφάλμα βηματικής θέσης**

Το μέγιστο θετική ή αρνητική σφάλμα θέσης προκαλείται όταν ο κινητήρας έχει περιστραφεί ένα βήμα από την προηγούμενη θέση που κατείχε.

σφάλμα βηματικής θέσης= μετρούμενη βηματική γωνία - θεωρητική γωνία

**Σφάλμα θέσης**

Ο κινητήρας έχει μετατοπισθεί N φορές από την αρχική του θέση

( $N=360^\circ / \text{βηματική γωνία}$ ) και η γωνία από την αρχική θέση μετράται σε κάθε θέση του βήματος.

Αν η γωνία από την αρχική θέση στην θέση N-βήμα είναι  $\Theta_N$  και το σφάλμα είναι  $\Delta\Theta_N$  όπου :

$$\Delta\Theta N = \Delta\Theta N - X\beta \times N$$

$X\beta$ = γωνία βήματος

Το σφάλμα θέσης είναι η διαφορά της μέγιστης και ελάχιστης ,αλλά συνήθως εκφράζεται με ένα  $\pm$ . Έτσι έχουμε:

$$\text{Σφαλμα θέσης} = \pm \frac{1}{2} (\Delta\Theta_{Max} - \Delta\Theta_{Min})$$

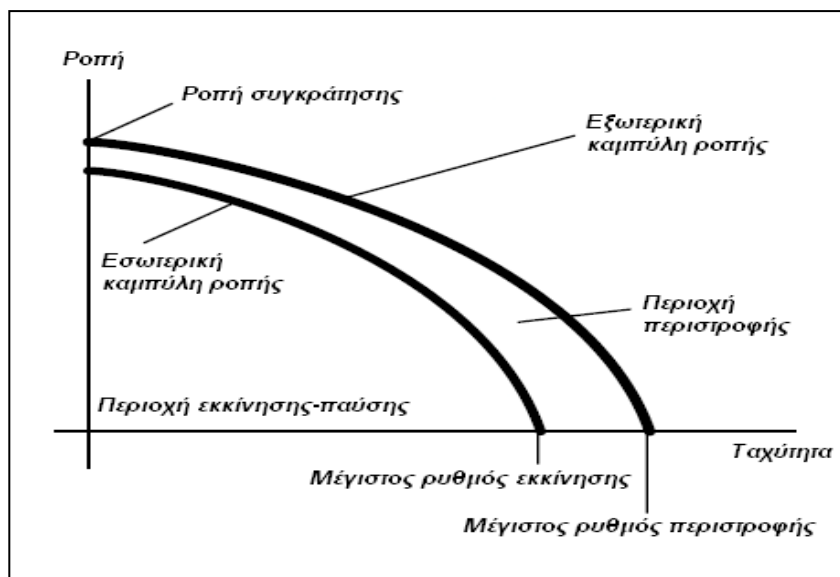
**Σφάλμα θέσης υστέρησης**

Οι τιμές που λαμβάνονται από τη μέτρηση των σφαλμάτων θέσης και στις δυο κατευθύνσεις.



## 6.7 Χαρακτηριστική ροπή – ταχύτητας

Η χαρακτηριστική ροπή-γωνίας είναι το κλειδί για την επιλογή του σωστού κινητήρα και την μέθοδο οδήγησης για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Αυτές οι χαρακτηριστικές εξαρτώνται από τον κινητήρα, τον τρόπο διέγερσης, τον τύπο του οδηγού και την μέθοδο του οδηγού. Μια τυπική καμπύλη μεταξύ ταχύτητας και ροπής προβάλλεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 6.3 - Χαρακτηριστική ροπή – ταχύτητας

Για μια καλύτερη κατανόηση της καμπύλης αυτής είναι χρήσιμο να καθορίσουμε ξεχωριστά καθένα από τα διάφορα σημεία της καμπύλης.

### **Ροπή συγκράτησης**

Η μέγιστη ροπή που παράγεται από το κινητήρα σε ακινησία

### **Η εσωτερική καμπύλη**

Εσωτερική καμπύλη προσδιορίζει την περιοχή εκκίνησης-παύσης. Ποιο συγκεκριμένα ορίζει την μέγιστη συχνότητα από την οποία ο κινητήρας μπορεί είτε να ξεκινήσει είτε να σταματήσει στιγμιαία με φορτίο στον άξονα του, χωρίς να χάσει τον συγχρονισμό του.

### **Μέγιστος ρυθμός εκκίνησης**

Η μέγιστη βηματική συχνότητα κατά την εκκίνηση, χωρίς να υπάρχει φορτίο.

### **Εξωτερική καμπύλη**

Η εξωτερική καμπύλη προσδιορίζει την περιοχή περιστροφής. Ποιο συγκεκριμένα ορίζει την μέγιστη συχνότητα στην οποία ο κινητήρας μας μπορεί να λειτουργήσει χωρίς να χάσει τον συγχρονισμό του. Δεδομένου ότι αυτή η περιοχή είναι έξω από την περιοχή της εσωτερικής καμπύλης ο κινητήρας πρέπει να αναπήδα (επιταχύνει η επιβραδύνει) σε αυτή την περιοχή.

### *Μέγιστος ρυθμός περιστροφής*

Η μέγιστη συχνότητα λειτουργίας του κινητήρα χωρίς εφαρμοζόμενο φορτίο. Τα εσωτερικά χαρακτηριστικά εξαρτώνται ανάλογα με το φορτίο. Όσο μεγαλύτερη είναι η αδράνεια του φορτίου τόσο μικρότερη είναι η εσωτερική περιοχή. Μπορούμε να το διαπιστώσουμε από τη μορφή της καμπύλης που το ποσοστό βήματος επηρεάζει την ικανότητα παραγωγής ροπής του βηματικού κινητήρα. Η μείωση της παραγόμενης ροπής όσο αυξάνεται η ταχύτητα προκαλείται από το γεγονός ότι σε υψηλές ταχύτητες η αυτεπαγωγή του κινητήρα είναι το κυρίαρχο στοιχείο πάνω στο κύκλωμα.

Το σχήμα της καμπύλης ταχύτητας-ροπής μπορεί να αλλάξει δραματικά ανάλογα με τον τύπο του οδηγού που χρησιμοποιείται. Οι διπολικόι οδηγοί τύπου ψαλιδιστοί ή όποιοι είναι κατασκευασμένοι από την Ericsson Components μεγιστοποιούν την απόδοση ταχύτητας-ροπής για έναν δεδομένο κινητήρα. Οι περισσότεροι κατασκευαστές βηματικών κινητήρων παρέχουν την καμπύλη ταχύτητας-ροπής για τους κινητήρες τους. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τι οδηγό και τη μέθοδο οδηγήσεις ο κατασκευαστής της μηχανής χρησιμοποίησε στην ανάπτυξη της καμπύλης διότι η χαρακτηριστική ροπής –ταχύτητας ενός δεδομένου κινητήρα μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την μέθοδο οδήγησης που χρησιμοποιήθηκε.

### **6.8 Μηχανικοί παράμετροι, Φορτίο, Τριβή, Αδράνεια**

Η απόδοση ενός συστήματος βηματικού κινητήρα (οδηγός και κινητήρας μαζί) εξαρτάται επίσης από της μηχανικές παραμέτρους του φορτίου. Το φορτίο καθορίζει την απόδοση όπως ακριβώς την καθορίζει και ο οδηγός. Αυτοί οι παράμετροι συνήθως είναι η τριβή, η αδράνεια η συνδυασμός και των δυο. Η τριβή είναι η αντίσταση στην κίνηση λόγω της ανομοιομορφίας των επιφανιών που έρχονται σε επαφή. Η τριβή είναι σταθερή με την ταχύτητα. Ένα ελάχιστο επίπεδο ροπής που απαιτείται καθόλα την διάρκεια του βήματος για να ξεπεράσει αυτή την τριβή (τουλάχιστον ίση με την τριβή). Η αύξηση της τριβής στο φορτίο μειώνει την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής, μειώνει την επιτάχυνση και αυξάνει το σφάλμα θέσης. Το αντίστροφο θα ίσχυε εάν η τριβή του φορτίου μειωνόταν. Η αδράνεια είναι αντίσταση ενός σώματος σε οποιαδήποτε μεταβολή της κινητικής του κατάστασης (αντίσταση στην αλλαγή ταχύτητας). Ένα φορτίο με μεγάλη αδρανειακή αντίδραση απαιτεί μια υψηλή αδρανειακή ροπή εκκίνησης, κάτι που παρόμοιος ισχύει και για το φρενάρισμα του κινητήρα. Αυξάνοντας το αδρανειακό φορτίο, αυξάνεται και σταθερή ταχύτητα, αυξάνοντας το ποσό του χρόνου που χιάζεται για να επιτευχθεί μια επιθυμητή ταχύτητα και να μειώσουμε τον μέγιστο ρυθμό στον παλμό εκκίνησης. Το αντίστροφο πάλι θα ισχύει εάν μειώσουμε την αδράνεια. Οι ταλαντώσεις του δρομέα σε έναν βηματικό κινητήρα θα ποικίλουν ανάλογα με την ποσότητα της τριβής και την αδράνεια του φορτίου. Εξαιτίας αυτής της σχέσης οι ανεπιθύμητες ταλαντώσεις του δρομέα μπορούν να μειωθούν με μηχανικά μέσα απόσβεσης ωστόσο είναι περισσότερο συχνά απλούστερο να μειώσουμε αυτές τις ανεπιθύμητες ταλαντώσεις με μεθόδους ηλεκτρικής απόσβεσης όπως να αλλάξουμε τον τρόπο οδήγησης από ολόκληρου βήματος σε μισού βήματος.

## 6.9 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Βηματικών Κινητήρων

### ➤ *Πλεονεκτήματα*

- Όταν ο κινητήρας βρίσκεται σε κατάσταση ακινησίας τότε λειτουργεί υπό πλήρη ροπή με την προϋπόθεση ότι τα πηνία τροφοδοτούνται με ρεύμα, το γεγονός αυτό το ξεχωρίζει από άλλους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, με αποτέλεσμα για την ακινησία να μην χρειαζόμαστε τρόπο πέδησης.
- Ο βηματικός κινητήρας είναι πιο αξιόπιστος όσον αφορά διάρκεια ζωής του καθώς δεν υπάρχει επαφή ψηκτρών με των δρομέα, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει καταπόνηση εξαρτημάτων λόγω τριβής ως εκ τούτου η διάρκεια ζωής του κινητήρα εξαρτάται από τη ζωή εδράνου κύλισης (ρουλεμάν).
- 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
- Η γωνία περιστροφής του κινητήρα είναι ανάλογη με τον παλμό εισόδου.
- Οι μετακινήσεις είναι ακριβείς καθώς οι βηματικοί κινητήρες έχουν ακρίβεια 35% σε κάθε βήμα. Δηλαδή άριστη ανταπόκριση στην αρχική λειτουργία, τη διακοπή, και την αλλαγή φορά περιστροφής θέσης χωρίς συσσωρευτική απόκλιση.

### ➤ *Μειονεκτήματα*

- 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.

## Κεφάλαιο 7

### Arduino



#### 7.1 Εισαγωγή

Για να επιτύχουμε το κατασκευαστικό μέρος της πτυχιακής μας εργασίας χρησιμοποιήσαμε μια διάταξη γνωστή στην αγορά για εφαρμογές σε μικρό αυτοματισμούς και ρομποτικής ονομαζόμενη Arduino. Στο παρόν κεφάλαιο θα γνωρίσουμε το Arduino καθώς και θα αναλύσουμε τα θεωρητικά του χαρακτηριστικά.

#### 7.2 Ιστορία

Το 2005 στην Ivrea της Ιταλίας κατασκευάζεται μία συσκευή η οποία θα είχε την δυνατότητα να ελέγχει και να αλληλεπιδρά σύμφωνα με το περιβάλλον. Σκοπός των κατασκευαστών ήταν αυτή η συσκευή να κοστίζει λιγότερο σε σχέση με άλλες παρόμοιων δυνατοτήτων. Η ομάδα αποτελούνταν από τους Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, David Mellis και Gianluca Martino. Το όνομα της συσκευής έχει τις ρίζες του από τον Arduin of Ivrea, έναν βασιλιά της Ιταλίας του ενάτου αιώνα όπου κατοικούσε στην ίδια πόλη. Η συσκευή ονομάστηκε “Arduino” που αντιστοιχούσε σε ένα ιταλικό ανδρικό όνομα και σήμαινε “ισχυρός φίλος”.

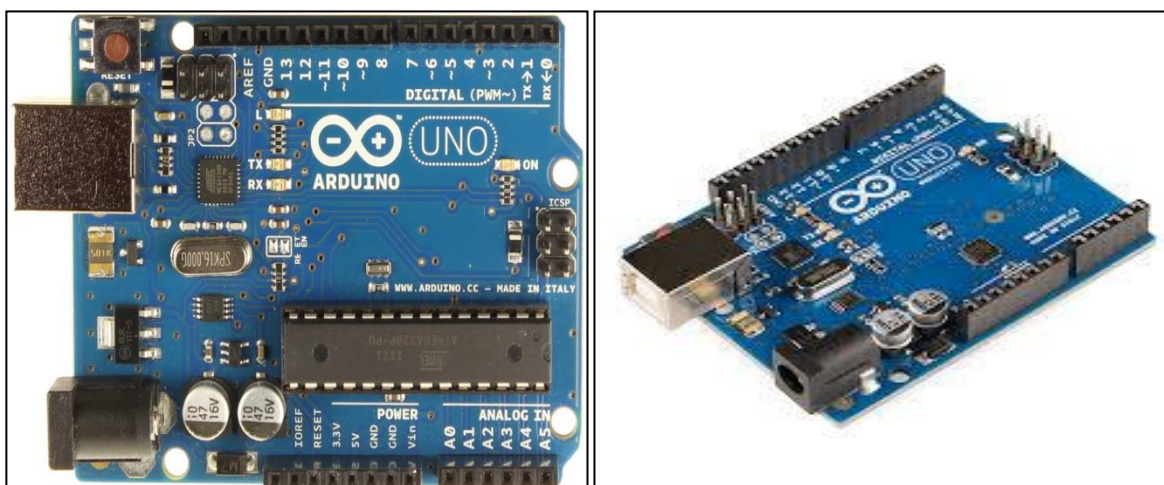
Το arduino αναπτύχθηκε σύμφωνα με την πλατφόρμα Wiring, μία πτυχιακή εργασία του Hernando Barragan από το Interaction Design Institute Ivrea. Είχε ως στόχο να είναι μία ηλεκτρονική εκδοχή της Processing που θα χρησιμοποιούσε ένα περιβάλλον προγραμματισμού δικό της αλλά θα έμοιαζε σχεδιαστικά και συντακτικά με αυτό της Processing. Όχι πολύ καιρό πριν, αυτοί που εργάζονταν πάνω στον τομέα του hardware σήμαινε ότι κατασκεύαζαν κυκλώματα από το μηδέν, χρησιμοποιώντας εκατοντάδες διαφορετικές ηλεκτρονικές διατάξεις όπως αντιστάσεις, πυκνωτές, πηνία, τρανζίστορ, και πολλά άλλα. Τα κυκλώματα αυτά ήταν ενσύρματα με σκοπό να πραγματοποιήσουν συγκεκριμένες εργασίες. Όταν απαιτούνταν αλλαγές στις εργασίες τους, τότε έπρεπε να γίνουν και κάποιες χρονοβόρες αλλαγές στον σχεδιασμό των κυκλωμάτων, όπως αποσυγκολλήσεις και συγκολλήσεις των απαιτούμενων διατάξεων, αποσυνδέσεις και συνδέσεις καλωδίων κ.α.. Με την εμφάνιση της ψηφιακής τεχνολογίας και των μικροεπεξεργαστών, αυτές οι λειτουργίες οι οποίες πρώτα έπρεπε να γίνουν με καλώδια και διατάξεις τώρα αντικαταστάθηκαν από τα λογισμικά προγράμματα.

Το λογισμικό είναι πιο εύκολο να τροποποιηθεί από ότι το hardware. Με μερικά πατήματα πλήκτρων, μπορεί να αλλάξει ριζικά η λογική μίας συσκευής και να δημιουργηθούν επιπλέον ακόμη δύο ή τρεις δοκιμαστικές εκδόσεις. Η διαδικασία αυτή θα απαιτούσε το ίδιο χρονικό διάστημα όσο και ο χρόνος που απαιτείται για να κολληθεί ένα ζεύγος αντιστάσεων. Όπως είναι φυσικό μαζί με τον χρόνο μειώθηκε και το κόστος για τις τροποποιήσεις καθώς και για τις δοκιμαστικές εκδόσεις.

Όπως το περιγράφει ο δημιουργός του, το Arduino είναι μία open-source (ανοικτού κώδικα) πλατφόρμα «πρωτοτυποποίησης» ηλεκτρονικών κυκλωμάτων βασισμένη σε εύελκτο και εύκολο στη χρήση hardware και software που προορίζεται για οποιονδήποτε έχει λίγη προγραμματιστική εμπειρία, στοιχειώδεις γνώσεις ηλεκτρονικών και ενδιαφέρεται να δημιουργήσει διαδραστικά αντικείμενα ή περιβάλλοντα.

Το Arduino αποτελείται από δύο κύρια μέρη, την πλακέτα Arduino το οποίο είναι το κομμάτι του hardware πάνω στο οποίο εργάζεται ο κατασκευαστής όταν πραγματοποιεί μία κατασκευή ενώ το δεύτερο τμήμα είναι το Arduino IDE, το κομμάτι του λογισμικού που τρέχει στον υπολογιστή. Το IDE χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί ένα sketch (ένα μικρό πρόγραμμα στον υπολογιστή) που φορτώνεται στον μικροελεγκτή της πλακέτα Arduino. Το sketch λέει στην πλακέτα arduino τι πρέπει να κάνει.

### 7.3 Τι είναι το Arduino;



Εικόνα 7.1 – Πλακέτα arduino

Το Arduino είναι ένας μικροελεγκτής ο οποίος περιλαμβάνει ένα chip ATmega. Με λίγα λόγια διαθέτει εισόδους και εξόδους που αντιδρούν βάση του προγραμματισμού που κάναμε και που φορτώσαμε στο chip με τη βοήθεια του υπολογιστή. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιεί είναι η Wiring, η οποία είναι αρκετά εύκολη στη σύνταξη και διατίθεται σε πλατφόρμες Linux, MAC και Windows με αδειά χρήσης GPL.

Αυτό όμως που κάνει το Arduino ακόμα πιο σημαντικό είναι ότι όλο το κύκλωμα της πλακέτας διατίθεται με άδεια χρήσης Creative Commons, πράγμα που σημαίνει ότι ο καθένας μπορεί να κατασκευάσει την δική του πλακέτα όπως αυτός θέλει. Φυσικά για τους αρχάριους το να κατασκευάσουν την πλακέτα μόνοι τους, ίσως ακουστεί λίγο τραβηγμένο, οπότε είναι ευκολότερο να αγοράσουν μια έτοιμη πλακέτα Arduino από το διαδίκτυο η οποία διατίθεται σε πάρα πολύ προσιτή τιμή.

Αν και μικροσκοπικό (7x5 cm) οι δυνατότητες που προσφέρει είναι πάρα πολλές. Μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε σε εφαρμογές ρομποτικής και γενικότερα σε αυτοματισμούς καταφέροντας έτσι πάρα πολλά όπως: την κίνηση servo, stepper και DC κινητήρων, τη λήψη πληροφοριών από διάφορους αισθητήρες (θερμοκρασίας, υγρασίας, υπέρυθρων κ.α), την αμφίδρομη σειριακή επικοινωνία μεταξύ Arduino και PC χρησιμοποιώντας γλώσσες προγραμματισμού (όπως Java και python), όπως επίσης την αναπαραγωγή και αντίληψη ήχων.

Φυσικά οι δυνατότητες του Arduino δεν σταματούν εκεί, στο site του Arduino ( <http://arduino.cc/> ) θα ανακαλύψουμε μια μεγάλη κοινότητα με αρκετές πληροφορίες όσο αφορά τις εκδόσεις την αγορά και το προγραμματισμό της πλακέτας. Η πλακέτα Arduino μέχρι αυτή τη στιγμή διατίθεται σε 12 βασικές παραλλαγές οι οποίες αναφέρονται σε διαφορετικές χρήσεις η κάθε μια, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής μας.

#### 7.4 Μικροελεγκτής – η καρδιά του Arduino



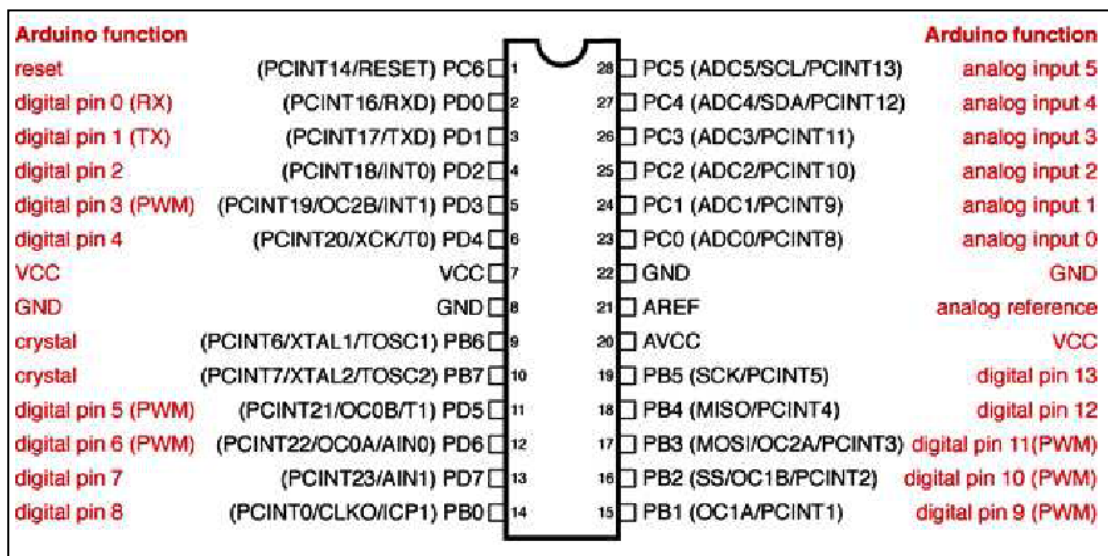
Εικόνα 7.2 - Μικροελεγκτής ATmega328

Το Arduino βασίζεται στον ATmega328, έναν 8-bit RISC μικροελεγκτή, τον οποίο χρονίζει στα 16MHz. Ο ATmega328 διαθέτει ενσωματωμένη μνήμη τριών τύπων:

-2Kb μνήμης SRAM που είναι η ωφέλιμη μνήμη που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα προγράμματά σας για να αποθηκεύουν μεταβλητές, πίνακες κ.λπ. κατά το runtime. Όπως και σε έναν υπολογιστή, αυτή η μνήμη χάνει τα δεδομένα της όταν η παροχή ρεύματος στο Arduino σταματήσει ή αν γίνει reset.

-1Kb μνήμης EEPROM η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για «ωμή» εγγραφή/ανάγνωση δεδομένων (χωρίς datatype) ανά byte από τα προγράμματά σας κατά το runtime. Σε αντίθεση με την SRAM, η EEPROM δεν χάνει τα περιεχόμενά της με απώλεια τροφοδοσίας ή reset οπότε είναι το ανάλογο του σκληρού δίσκου.

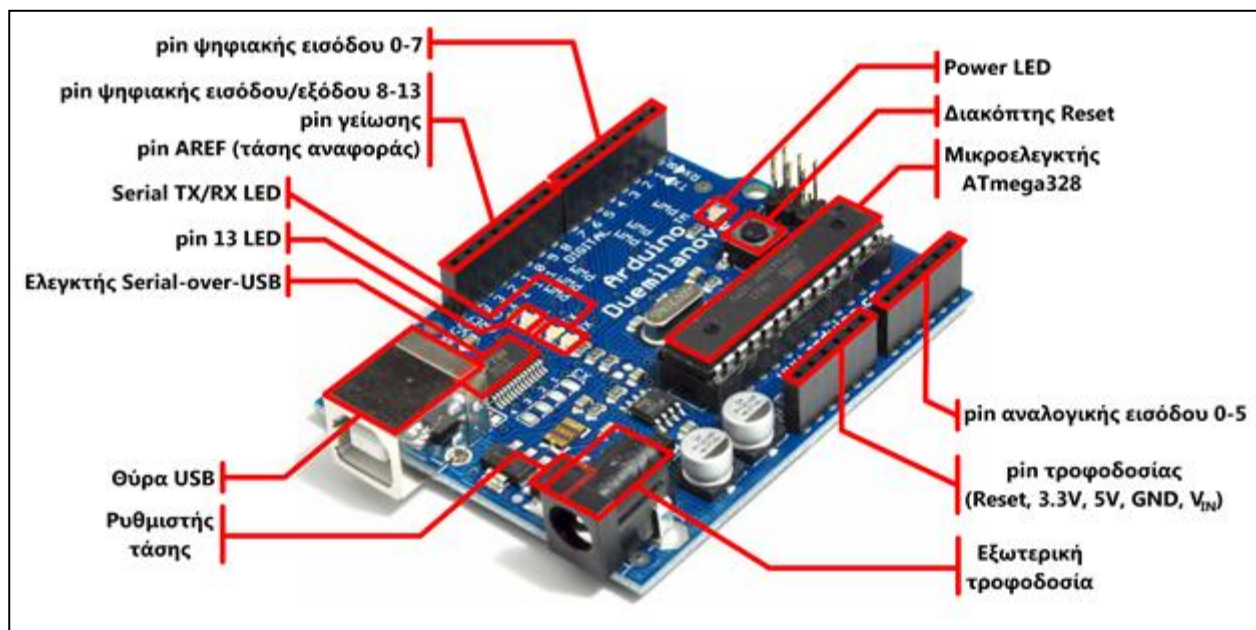
-32Kb μνήμης Flash, από τα οποία τα 2Kb χρησιμοποιούνται από το firmware του Arduino που έχει εγκαταστήσει ήδη ο κατασκευαστής του. Το firmware αυτό που στην ορολογία του Arduino ονομάζεται bootloader είναι αναγκαίο για την εγκατάσταση των δικών σας προγραμμάτων στον μικροελεγκτή μέσω της θύρας USB, χωρίς δηλαδή να χρειάζεται εξωτερικός hardware programmer. Τα υπόλοιπα 30Kb της μνήμης Flash χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αυτών ακριβώς των προγραμμάτων, αφού πρώτα μεταγλωττιστούν στον υπολογιστή σας. Η μνήμη Flash, όπως και η EEPROM δεν χάνει τα περιεχόμενά της με απώλεια τροφοδοσίας ή reset. Επίσης, ενώ η μνήμη Flash υπό κανονικές συνθήκες δεν προορίζεται για χρήση runtime μέσα από τα προγράμματά σας, λόγω της μικρής συνολικής μνήμης που είναι διαθέσιμη σε αυτά (2Kb SRAM + 1Kb EEPROM), έχει σχεδιαστεί μια βιβλιοθήκη που επιτρέπει την χρήση όσου χώρου περισσεύει (30Kb μείον το μέγεθος του προγράμματός σας σε μεταγλωττισμένη μορφή).



Εικόνα 7.3 – Functions στις επαφές του ATmega328

## 7.5 Είσοδοι – Έξοδοι

Καταρχήν το Arduino διαθέτει σειριακό interface. Ο μικροελεγκτής ATmega υποστηρίζει σειριακή επικοινωνία, την οποία το Arduino προωθεί μέσα από έναν ελεγκτή Serial-over-USB ώστε να συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω USB. Η σύνδεση αυτή χρησιμοποιείται για την μεταφορά των προγραμμάτων που σχεδιάζονται από τον υπολογιστή στο Arduino αλλά και για αμφίδρομη επικοινωνία του Arduino με τον υπολογιστή μέσα από το πρόγραμμα την ώρα που εκτελείται.



Εικόνα 7.4 – Εξαρτήματα - Λειτουργικά μέρη της πλακέτας

Επιπλέον, στην πάνω πλευρά του Arduino βρίσκονται 14 θηλυκά pin, αριθμημένα από 0 ως 13, που μπορούν να λειτουργήσουν ως ψηφιακές εισοδοι και έξοδοι. Λειτουργούν στα 5V και καθένα μπορεί να παρέχει ή να δεχτεί το πολύ 40mA. Ως ψηφιακή έξοδος, ένα από αυτά τα pin μπορεί να τεθεί από το πρόγραμμά σας σε κατάσταση HIGH ή LOW, οπότε το Arduino θα ξέρει αν πρέπει να διοχετεύσει ή όχι ρεύμα στο συγκεκριμένο pin. Με αυτόν τον τρόπο μπορείτε λόγω χάρη να ανάψετε και να σβήσετε ένα LED που έχετε συνδέσει στο συγκεκριμένο pin. Αν πάλι ρυθμίσετε ένα από αυτά τα pin ως ψηφιακή είσοδο μέσα από το πρόγραμμά σας, μπορείτε με την κατάλληλη εντολή να διαβάσετε την κατάστασή του (HIGH ή LOW) ανάλογα με το αν η εξωτερική συσκευή που έχετε συνδέσει σε αυτό το pin διοχετεύει ή όχι ρεύμα στο pin (με αυτόν τον τρόπο λόγω χάρη μπορείτε να «διαβάζετε» την κατάσταση ενός διακόπτη). Μερικά από αυτά τα 14 pin, εκτός από ψηφιακές εισοδοι/έξοδοι έχουν και δεύτερη λειτουργία. Συγκεκριμένα:

Τα pin 0 και 1 λειτουργούν ως RX και TX της σειριακής όταν το πρόγραμμά σας ενεργοποιεί την σειριακή θύρα. Έτσι, όταν λόγω χάρη το πρόγραμμά σας στέλνει δεδομένα στην σειριακή, αυτά προωθούνται και στην θύρα USB μέσω του ελεγκτή Serial-Over-USB αλλά και στο pin 0 για να τα διαβάσει ενδεχομένως μια άλλη συσκευή (π.χ. ένα δεύτερο Arduino στο δικό του pin 1). Αυτό φυσικά



σημαίνει ότι αν στο πρόγραμμά σας ενεργοποιήσετε το σειριακό interface, χάνετε 2 ψηφιακές εισόδους/εξόδους.

Τα pin 2 και 3 λειτουργούν και ως εξωτερικά interrupt (interrupt 0 και 1 αντίστοιχα). Με άλλα λόγια, μπορείτε να τα ρυθμίσετε μέσα από το πρόγραμμά σας ώστε να λειτουργούν αποκλειστικά ως ψηφιακές εισοδοί στις οποίες όταν συμβαίνουν συγκεκριμένες αλλαγές, η κανονική ροή του προγράμματος σταματάει \*άμεσα\* και εκτελείται μια συγκεκριμένη συνάρτηση. Τα εξωτερικά interrupt είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε εφαρμογές που απαιτούν συγχρονισμό μεγάλης ακρίβειας.

Τα pin 3, 5, 6, 9, 10 και 11 μπορούν να λειτουργήσουν και ως ψευδοαναλογικές έξοδοι με το σύστημα PWM (Pulse Width Modulation), δηλαδή το ίδιο σύστημα που διαθέτουν οι μητρικές των υπολογιστών για να ελέγχουν τις ταχύτητες των ανεμιστήρων. Έτσι, μπορείτε να συνδέσετε λόγω χάρη ένα LED σε κάποιο από αυτά τα pin και να ελέγξετε πλήρως την φωτεινότητά του με ανάλυση 8bit (256 καταστάσεις από 0-σβηστό ως 255-πλήρως αναμμένο) αντί να έχετε απλά την δυνατότητα αναμμένο-σβηστό που παρέχουν οι υπόλοιπες ψηφιακές έξοδοι. Είναι σημαντικό να καταλάβετε ότι το PWM δεν είναι πραγματικά αναλογικό σύστημα και ότι θέτοντας στην έξοδο την τιμή 127, δεν σημαίνει ότι η έξοδος θα δίνει 2.5V αντί της κανονικής τιμής των 5V, αλλά ότι θα δίνει ένα παλμό που θα εναλλάσσεται με μεγάλη συχνότητα και για ίσους χρόνους μεταξύ των τιμών 0 και 5V.

Στην κάτω πλευρά του Arduino, με τη σήμανση ANALOG IN, θα βρείτε μια ακόμη σειρά από 6 pin, αριθμημένα από το 0 ως το 5. Το καθένα από αυτά λειτουργεί ως αναλογική είσοδος κάνοντας χρήση του ADC (Analog to Digital Converter) που είναι ενσωματωμένο στον μικροελεγκτή. Για παράδειγμα, μπορείτε να τροφοδοτήσετε ένα από αυτά με μια τάση την οποία μπορείτε να κυμάνετε με ένα ποτενσιόμετρο από 0V ως μια τάση αναφοράς Vref η οποία, αν δεν κάνετε κάποια αλλαγή είναι προρυθμισμένη στα 5V. Τότε, μέσα από το πρόγραμμά σας μπορείτε να «διαβάσετε» την τιμή του pin ως ένα ακέραιο αριθμό ανάλυσης 10-bit, από 0 (όταν η τάση στο pin είναι 0V) μέχρι 1023 (όταν η τάση στο pin είναι 5V). Η τάση αναφοράς μπορεί να ρυθμιστεί με μια εντολή στο 1.1V, ή σε όποια τάση επιθυμείτε (μεταξύ 2 και 5V) τροφοδοτώντας εξωτερικά με αυτή την τάση το pin με την σήμανση AREF που βρίσκεται στην απέναντι πλευρά της πλακέτας. Έτσι, αν τροφοδοτήσετε το pin AREF με 3.3V και στην συνέχεια δοκιμάσετε να διαβάσετε κάποιο pin αναλογικής εισόδου στο οποίο εφαρμόζετε τάση 1.65V, το Arduino θα σας επιστρέψει την τιμή 512. Τέλος, καθένα από τα 6 αυτά pin, με κατάλληλη εντολή μέσα από το πρόγραμμα μπορεί να μετατραπεί σε ψηφιακό pin εισόδου/εξόδου όπως τα 14 που βρίσκονται στην απέναντι πλευρά και τα οποία περιγράφηκαν πριν. Σε αυτή την περίπτωση τα pin μετονομάζονται από 0~5 σε 14~19 αντίστοιχα.

## 7.6 Ρεύμα λειτουργίας

Το Arduino μπορεί να δουλέψει με ρεύμα από τη USB θύρα του υπολογιστή σας ή με αυτόνομη παροχή ρεύματος από μπαταρία. Η μονάδα παρέχει σταθερά τάση 5V στις εξόδους της. Για παροχή ρεύματος στη μονάδα από εξωτερική πηγή δέχεται τροφοδοσία από εξωτερικό βύσμα - συνιστώμενη παρεχόμενη τάση λειτουργίας είναι στα 7V έως 12V, ώστε να μπορεί να λειτουργήσει και να δώσει σταθερά τα 5V στην έξοδο. Μπορείτε να συνδέσετε την παροχή ρεύματος απευθείας στα pins που προορίζονται για αυτό το σκοπό: (+) στο Pin VCC IN και (-) στο Gnd δίπλα του. Στην περίπτωση που είναι συνδεδεμένη η μονάδα μας μόνιμα με θύρα USB τότε δουλεύει χωρίς πρόβλημα με τα 5V που παρέχει η USB θύρα.

### 7.7 Βασικά Πλεονεκτήματα πλατφόρμας Arduino

Οικονομική: Η πλατφόρμα Arduino αποτελεί οικονομική λύση διότι είναι φθηνότερη. Επιπλέον, είναι αρχιτεκτονικά ανοιχτή και μπορεί ο οποιοσδήποτε να την αναπτύξει από μόνος του.

Μεταφέρσιμη: Σε σχέση με τις υπάρχουσες πλατφόρμας στο εμπόριο η πλατφόρμα Arduino παρέχει πλήρη μεταφερσιμότητα με αποτέλεσμα να μπορεί να προγραμματιστεί στα περισσότερα λειτουργικά συστήματα.

Επεκτάσιμη: Το υλικό και το λογισμικό της πλατφόρμας Arduino είναι ανοιχτά και ελεύθερα για όλους. Καθημερινά, χιλιάδες υποστηρικτές του ελεύθερου λογισμικού αναπτύσσουν διάφορες βιβλιοθήκες για την υποστήριξη της πλατφόρμας. Παράλληλα, τόσο η αρχιτεκτονική όσο και το υλικό της πλατφόρμας εξελίσσονται συνεχώς

### 7.8 Το λογισμικό του Arduino

Το περιβάλλον ανάπτυξης του Arduino (IDE) έχει συγγραφεί με την γλώσσα προγραμματισμού Java και αυτό το καθιστά μεταφέρσιμο στα περισσότερα λειτουργικά συστήματα. Το IDE του Arduino περιέχει έναν έξυπνο συντάκτη, μεταγλωττιστή της C, C++, τερματικό για σειριακή επικοινωνία με το Arduino, κ.α.

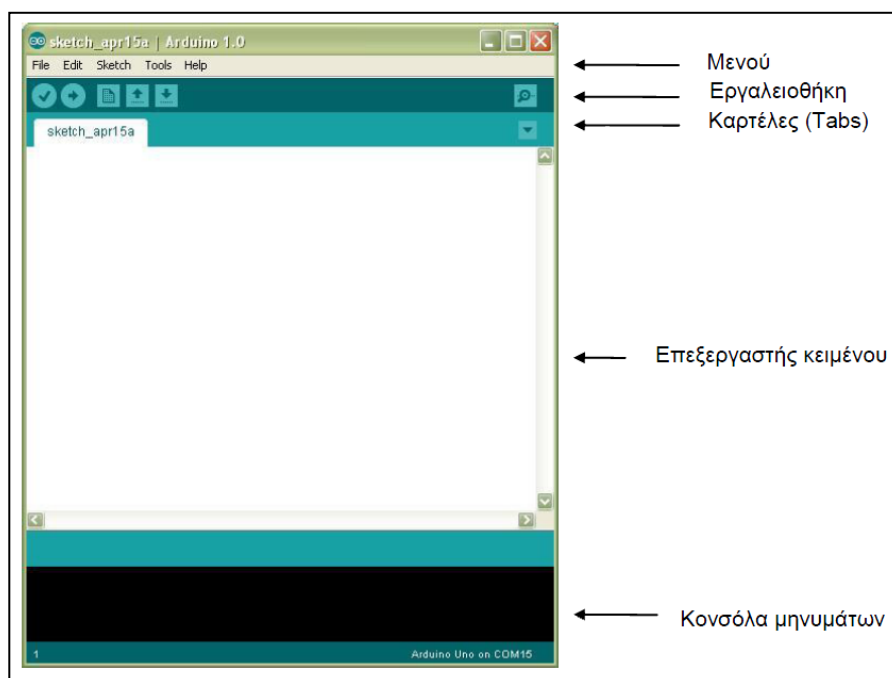
Πιο συγκεκριμένα, η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται για την συγγραφή προγραμμάτων στο Arduino είναι η Wiring (C, C++). Το IDE του Arduino χρησιμοποιεί εργαλεία GNU toolchain και AVR Libc για να παρέχει την μεταγλώττιση προγραμμάτων από C, C++ σε κατάλληλες AVR εντολές γλώσσας μηχανής, καθώς και το εργαλείο avrdude για την αποστολή του εκτελέσιμου προγράμματος στην Flash memory του Arduino.

Η ψηφιακή σχεδίαση του υλικού μέρους του Arduino είναι ανοιχτή και προσβάσιμη από όλους μια και είναι δημοσιευμένη υπό την άδεια Creative Commons Attribution Share-Alike 2.5. Επίσης, το περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) του Arduino είναι ελεύθερο λογισμικό και είναι δημοσιευμένο υπό την άδεια GNU General Public License Version 2.

## 7.9 Ολοκληρωμένο Περιβάλλον Ανάπτυξης του Arduino

Το περιβάλλον ανάπτυξης Arduino περιέχει μια περιοχή επεξεργασίας κειμένου για τη συγγραφή κώδικα, μια περιοχή μηνυμάτων, ένα μενού, μια γραμμή εργαλείων με κουμπιά για κοινές λειτουργίες, καθώς και μια σειρά από μενού. Συνδέεται με το υλικό Arduino για τη φόρτωση προγραμμάτων και για να επικοινωνούν μεταξύ τους.

Ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα συνήθως ονομάζεται sketch. Αυτό το sketch είναι γραμμένο με το πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου. Έχει δυνατότητες για την αντιγραφή/επικόλληση και για την αναζήτηση/αντικατάσταση κειμένου. Η κονσόλα απεικονίζει την έξοδο του κειμένου από το περιβάλλον Arduino συμπεριλαμβάνοντας πλήρη μηνύματα λάθους και άλλες πληροφορίες. Τα κουμπιά της γραμμής εργαλείων επιτρέπουν τον έλεγχο και το ανέβασμα των προγραμμάτων, τη δημιουργία νέου sketch, το άνοιγμα και την αποθήκευση των sketch και άνοιγμα της σειριακής οθόνης.



Εικόνα 7.5 – Το λογισμικό περιβάλλον του arduino



Verify/Compile (Έλεγχος/Μεταγλώττιση): Έλεγχος για λάθη στον κώδικα



Upload: Ανέβασμα του κώδικα στον μικροελεγκτή



New(Νέο): Δημιουργεί ένα νέο sketch



Open(Άνοιγμα): Παρουσιάζει ένα μενού με όλα τα sketch, κάνοντας κλικ σε ένα από αυτά θα ανοίξει μέσα στο τρέχον παράθυρο



Save(Αποθήκευση): Αποθηκεύει το sketch



Serial Monitor(Σειριακή οθόνη): Ανοίγει την σειριακή οθόνη ώστε να μπορούμε να δώσουμε δεδομένα από το πληκτρολόγιο

### 7.9.1 Η Δομή το προγράμματος

Ένα τυπικό πρόγραμμα Arduino έχει την παρακάτω δομή:

```
//δήλωση μεταβλητών
```

```
void setup ()
```

```
{
```

```
//αρχικοποιήσεις
```

```
}
```

```
void loop ()
```

```
{
```

```
//Κώδικας
```

```
}
```

Υπάρχουν δυο ειδικές συναρτήσεις που είναι μέρος του κάθε sketch του Arduino οι οποίες είναι η setup() και η loop(). Η setup() καλείται μια φορά, όταν το sketch ξεκινά ή όποτε κάνει επαναφορά (reset) η πλατφόρμα Arduino. Κυρίως, σε αυτήν γίνονται οι αρχικοποιήσεις των μεταβλητών, η ρύθμιση της κατάστασης των ακίδων (pins) και η προετοιμασία των βιβλιοθηκών. Αντιθέτως, η συνάρτηση loop() καλείται ξανά και ξανά επιτρέποντας έτσι στο πρόγραμμα να ανταποκριθεί σε εξωτερικά ερεθίσματα. Και οι δυο συναρτήσεις πρέπει να περιλαμβάνονται στο sketch, ακόμα και αν δεν περιέχουν κάτι και να είναι κενές.

### 7.9.2 Βασικές δομές και λειτουργίες προγραμματισμού

Παρακάτω, ακολουθούν μερικές από τις πιο βασικές δομές και λειτουργίες που μπορεί να αξιοποιηθεί ως εργαλεία κατά την συγγραφή ενός προγράμματος Arduino :

#### *Δομές ελέγχου ροής*

if (δομή ελέγχου μίας συνθήκης)

if ... else (δομή ελέγχου πολλαπλών συνθηκών)

for (δομή επαναληπτικού ελέγχου συνθήκης)

while (δομή επαναληπτικού ελέγχου συνθήκης)

do ... while (δομή επαναληπτικού ελέγχου συνθήκης)

switch ... case (δομή ελέγχου περιπτώσεων)

break (εντολή διακοπής μιας επαναληπτικής δομής)

continue (εντολή παράλειψης της τρέχουσας επανάληψης)

return (εντολή επιστροφής από μία συνάρτηση)

goto (εντολή μετάβασης σε κάποιο σημείο του κώδικα)

#### *Αριθμητικοί τελεστές*

= (τελεστής εκχώρησης)

+ (τελεστής πρόσθεσης)

- (τελεστής αφαίρεσης)

\* (τελεστής πολλαπλασιασμού)

/ (τελεστής διαίρεσης)

% (τελεστής υπόλοιπου ακεραίας διαίρεσης)

Λογικοί τελεστές

&& (λογική σύζευξη)

|| (λογική διάζευξη)

! (λογική άρνηση)

**Δυαδικοί τελεστές**

& (δυαδική σύζευξη)

| (δυαδική διάζευξη)

^ (δυαδική αποκλειστική διάζευξη)

~ (δυαδική άρνηση)

<< (δυαδική αριστερή ολίσθηση)

>> (δυαδική δεξιά ολίσθηση)

**Τελεστές αύξησης και μείωσης**

++ (αύξηση κατά μία ακέραιη μονάδα)

-- (μείωση κατά μία ακέραιη μονάδα)

**Σύνθετοι τελεστές**

+=, -=, \*=, /=, %= (σύνθετοι αριθμητικοί τελεστές)

&=, |=, ^=, ~=, <<=, >>= (σύνθετοι δυαδικοί τελεστές)

**Τελεστές σύγκρισης**

== (ισότητα)

!= (ανισότητα)

< (μικρότερο)

> (μεγαλύτερο)

<= (μικρότερο ή ίσο)

>= (μεγαλύτερο ή ίσο)

**Τελεστές δεικτών**

\* (τελεστής απόκτησης περιεχομένου)

& (τελεστής απόκτησης διεύθυνσης)

**Σταθερές**

HIGH (τιμή υψηλής στάθμης για μία επαφή εισόδου ή εξόδου)

LOW (τιμή χαμηλής στάθμης για μία επαφή εισόδου ή εξόδου)

false (λογικό επίπεδο ψεύδους σε μία συνθήκη)

true (λογικό επίπεδο αλήθειας σε μία συνθήκη)

INPUT (χρησιμοποιείται για τον ορισμό μίας επαφής ως είσοδο)

OUTPUT (χρησιμοποιείται για τον ορισμό μίας επαφής ως έξοδο)

A0, ..., A5 (συμβολοσταθερές για τις αναλογικές επαφές εισόδου)

**Τύποι δεδομένων**

boolean (λογική δυαδική τιμή)

char (προσημασμένος χαρακτήρας 8 ψηφίων)

unsigned char (μη προσημασμένος χαρακτήρας 8 ψηφίων)

byte (μη προσημασμένος χαρακτήρας 8 ψηφίων)

int (προσημασμένος ακέραιος αριθμός 16 ψηφίων)

unsigned int (μη προσημασμένος ακέραιος αριθμός 16 ψηφίων)

word (μη προσημασμένος ακέραιος αριθμός 16 ψηφίων)

long (προσημασμένος ακέραιος αριθμός 32 ψηφίων)

unsigned long (μη προσημασμένος ακέραιος αριθμός 32 ψηφίων)

float, double (αριθμός κινητής υποδιαστολής απλής ακρίβειας)

String (αντικείμενο αλφαριθμητικού με χρήσιμες μεθόδους)

Ως αλφαριθμητικό μπορεί να θεωρηθεί και ο πίνακας χαρακτήρων

**Συναρτήσεις μετατροπής τύπων**

char(), byte()

int(), word(), long()

float(), double()

**Συναρτήσεις εισόδου και εξόδου**

pinMode() (ορίζει μια επαφή ως είσοδο ή έξοδο)

**Συναρτήσεις ψηφιακής εισόδου και εξόδου**

digitalWrite() (γράφει σε μία ψηφιακή επαφή εξόδου)

digitalRead() (διαβάζει από μία ψηφιακή επαφή εισόδου)

**Συναρτήσεις αναλογικής εισόδου και εξόδου**

analogReference() (ορίζει την τάση αναλογικής αναφοράς)

analogWrite() (γράφει PWM σήματα σε μία επαφή εξόδου)

analogRead() (διαβάζει από μία αναλογική επαφή εισόδου)

Προηγμένες συναρτήσεις εισόδου και εξόδου

tone() (παράγει ένα τετραγωνικό σήμα ορισμένης συχνότητας)

noTone() (διακόπτει την παραγωγή τετραγωνικών σημάτων)

shiftOut() (ολισθαίνει τα ψηφία μιας τιμής σε μία επαφή εξόδου)

pulseIn() (επιστρέφει την διάρκεια σε μs ενός παλμού HIGH ή LOW)



**Συναρτήσεις χρόνου**

millis() (διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος σε ms)

micros() (διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος σε μs)

delay() (παύση προγράμματος - η διάρκεια δίδεται σε ms)

delayMicroseconds() (παύση προγράμματος - η διάρκεια δίδεται σε μs)

**Μαθηματικές και Τριγωνομετρικές συναρτήσεις**

max() (βρίσκει τον μεγαλύτερο ανάμεσα σε δύο αριθμούς)

min() (βρίσκει τον μικρότερο ανάμεσα σε δύο αριθμούς)

abs() (επιστρέφει την απόλυτη τιμή ενός αριθμού)

constrain() (ελέγχει για υπερχείλιση ή υποχείλιση ορίων)

map() (πραγματοποιεί γραμμικό μετασχηματισμό ορίων)

pow() (επιστρέφει το αποτέλεσμα μίας δύναμης)

sqrt() (επιστρέφει την ρίζα ενός αριθμού)

sin() (υπολογίζει το ημίτονο ενός αριθμού)

cos() (υπολογίζει το συνημίτονο ενός αριθμού)

tan() (υπολογίζει την εφαπτομένη ενός αριθμού)

Συναρτήσεις γεννήτριας ψευδοτυχαίων αριθμών

random() (δίδεται ένας νέος αριθμός από την γεννήτρια)

randomSeed() (θέτει τον σπόρο της γεννήτριας παραγωγής)

**Συναρτήσεις επεξεργασίας δυαδικών αριθμών**

lowByte() (επιστρέφει το δεξιότερο byte μίας μεταβλητής)

highByte() (επιστρέφει το αριστερότερο byte μίας μεταβλητής)

bitRead() (διαβάζει ένα συγκεκριμένο ψηφίο μίας μεταβλητής)

bitWrite() (γράφει σε ένα συγκεκριμένο ψηφίο μιας μεταβλητής)

bitSet() (γράφει την τιμή 1 σε κάποιο ψηφίο μίας μεταβλητής)

bitClear() (γράφει την τιμή 0 σε κάποιο ψηφίο μιας μεταβλητής)

bit() (υπολογίζει μία συγκεκριμένη δύναμη με βάση το 2)

**Συναρτήσεις χρήσης ρουτινών εξυπηρέτησης διακοπών**

attachInterrupt() (ενεργοποιεί μία ρουτίνα εξυπηρέτησης διακοπής)

detachInterrupt() (απενεργοποιεί μία ρουτίνα εξυπηρέτησης διακοπής)

**Συναρτήσεις ενεργοποίησης και απενεργοποίησης διακοπών**

interrupts() (ενεργοποιεί τα σήματα διακοπής)

noInterrupts() (απενεργοποιεί τα σήματα διακοπής)

**Υποστήριξη σειριακής επικοινωνίας**

Serial (αντικείμενο σειριακής επικοινωνίας με χρήσιμες μεθόδους)

## 7.10 Αναλογικές ακίδες εισόδου (Analog input pins)

Οι ελεγκτές Atmega που χρησιμοποιούνται για την πλατφόρμα Arduino περιέχουν έναν ενσωματωμένο αναλογικό-σε-ψηφιακό μετατροπέα 6 καναλιών. Ο μετατροπέας διαθέτει ανάλυση 10 bit, επιστρέφοντας ακέραιους από 0 έως 1023. Ενώ η κύρια λειτουργία της αναλογικής ακίδας για τους περισσότερους χρήστες Arduino είναι να διαβάζει αναλογικούς αισθητήρες, οι αναλογικές ακίδες έχουν επίσης όλες τις λειτουργίες των γενικών ακίδων εισόδου/εξόδου. Οι συναρτήσεις αναλογικής εισόδου και εξόδου είναι οι παρακάτω:

- `analogWrite()`: Γράφει μια αναλογική τιμή (PWM κύμα) σε μια ακίδα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα να ανάψει ένα LED σε διάφορες φωτεινότητες ή να οδηγήσει ένα κινητήρα σε διάφορες ταχύτητες. Μετά από μια κλήση της `analogWrite()`, η ακίδα θα δημιουργήσει ένα σταθερό τετραγωνικό κύμα του καθορισμένου κύκλου λειτουργίας μέχρι την επόμενη κλήση της `analogWrite()` (ή μια κλήση της `digitalWrite()` ή `digitalRead()` για την ίδια ακίδα). Η συχνότητα του σήματος PWM είναι περίπου 490 Hz. Στις περισσότερες πλατφόρμες Arduino η συνάρτηση αυτή λειτουργεί στις ακίδες 3, 5, 6, 9, 10, 11.

Σύνταξη: `analogWrite(pin, value)`

Παράμετροι:

`pin`: Ο αριθμός της ακίδας της οποίας θα γράψει επάνω

`value`: ο κύκλος λειτουργίας μεταξύ 0 και 255

- `analogRead()`: Διαβάζει την τιμή από την καθορισμένη αναλογική ακίδα. Σύνταξη: `analogRead(pin)`

Παράμετροι:

`pin`: Ο αριθμός της αναλογικής ακίδας εισόδου από όπου θα διαβάζει

Επιστέφει: ακέραιο από 0 έως 1023

## Κεφάλαιο 8

### Πορεία /Περιγραφή κατασκευής

#### 8.1 Εισαγωγή

Ο έλεγχος ενός βηματικού κινητήρα μπορεί να παρά πολλούς τρόπους και όσο η τεχνολογία εξελίσσεται τόσο και περισσότεροι τρόποι οδήγησεις και έλεγχου θα είναι διαθέσιμη στην αγορά. Μερικά παραδείγματα για τρόπους οδήγησης και έλεγχου ενός βηματικού κινητήρα είναι μέσο μικροελεγκτή, μέσο plc, μέσο παράλληλης θύρας ηλεκτρονικού υπολογιστή, ασύρματος έλεγχος ,έλεγχος και οδήγηση απευθείας σε πλακέτα και παρα πολλές αλλης ιδεες.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιήσουμε την διάταξη arduino ,ο οποίος λειτουργεί σαν μικροελεγκτής, για να ελέγξουμε τον βηματικό μας κινητήρα μέσα από το υπολογιστή μας με πρόγραμμα γραμμένο στο περιβάλλον Arduino. Εκτός από το Arduino θα χρησιμοποιήσουμε το ολοκληρωμένο ULN2003 που θα είναι ο οδηγός μας στο σύστημα μας.

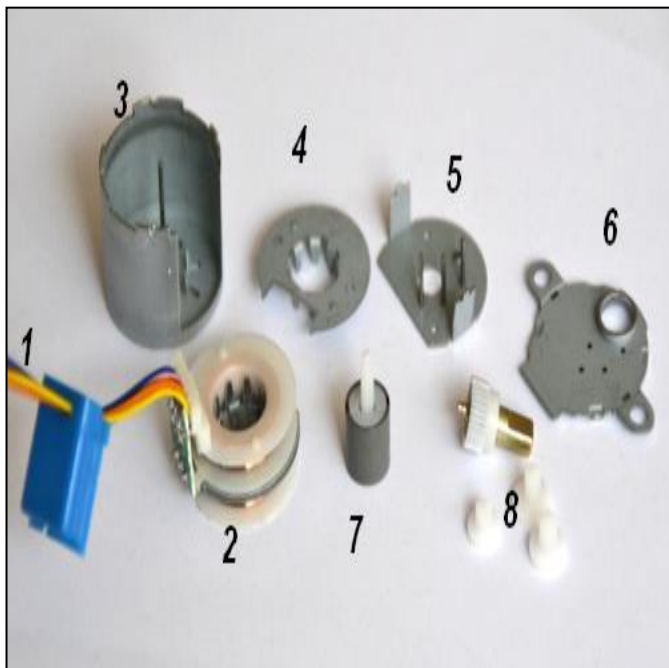
Στο πειραματικό μέρος της πτυχιακής εργασίας μας στόχος μας είναι να ελέγξουμε έναν κοινό βηματικό κινητήρα μέσα από τον ηλεκτρονικό μας υπολογιστή με την διάταξη andruino όπως και προαναφέραμε. Τα βασικά εξαρτήματα που χρειαστήκαμε για να επιτύχουμε την κατασκευή μας είναι:

- 1)Βηματικός κινητήρας 28byj-48 5V
- 2)Πλακέτα οδήγησης ZC-A0591 με το ολοκληρωμένο ULN2003
- 3)Καλώδιο εκτυπωτή usb
- 4)Προγραμματισμός γλώσσας Arduino
- 5)Πλακέτα Arduino uno 3

## 8.2 Ο βηματικός κινητήρας 28byj-48 5V



Είναι ένας μικρός ,εύχρηστος βηματικός κινητήρας ,οικονομικός και εφαρμόζεται σε απλά συστήματα ρομποτικής. Είναι ένας μονοπολικός κινητήρας 5 καλωδίων με τέσσερις φάσης που λειτουργεί σε τιμές τάσης 5 volts. Τα χρώματα των καλωδίων είναι μπλε και κίτρινο για το ένα ζεύγος των πηνίων και πορτοκαλή με ροζ για το άλλο ζεύγος των πηνίων ,ενώ ο μεσαίος ακροδέκτης έχει κόκκινο χρώμα. Παράγει ταχύτητα περίπου 15rpm (στροφες ανά λεπτό) και έχει πολύ καλή ροπή για το μέγεθος του. Είναι εφικτό να αυξήσουμε της στροφές ανά λεπτό σχεδόν στις 25 εάν το τροφοδοτήσουμε με τάση 12 v. Σε λειτουργία μισού βήματος( κάτι το οποίο συνιστάτε ) ο βηματικός κινητήρας 28byj-48 5V κάνει 64 βήματα για μια πλήρη περιστροφή πράγμα που σημαίνει ότι ένα βήμα ισούται με 5,625 μοίρες περιστροφής, μπορούμε να πούμε ότι είναι αρκετά καλά για έναν οικονομικό βηματικό κινητήρα. Σε λειτουργία ολοκλήρου βήματος στο οποίο έχουμε 4 σήματα έλεγχου (σε αντίθεση με του μισού βήματος που έχουμε 8 σήματα έλεγχου) ο κινητήρας σε μια πλήρης περιστροφή κάνει 32 βήματα που το κάθε βήμα αντιστοιχεί με 11,25 μοίρες, δηλαδή μισά από ότι μας προσφέρει η λειτουργία μισού βήματος. Τέλος το βάρος του είναι περίπου 30 γραμμάρια



- 1)Καλώδια σύνδεσης
- 2) τυλίγματα με εσωτερικές οδόντωσης
- 3)περίβλημα μηχανής και οδοντώσεις στο κάτω μέρος
- 4)μεταλλικό κάλυμμα με εσωτερικές οδοντώσεις.
- 5)εσωτερικό μεταλλικό κάλυμμα
- 6)εξωτερικό μεταλλικό κάλυμμα
- 7)δρομέα μονίμου μαγνήτη
- 8)οδοντώσεις μεταφοράς της κίνησης.

Εικόνα 8.1 - Ανοιγμένος βηματικός κινητήρας 28byj-48 5V

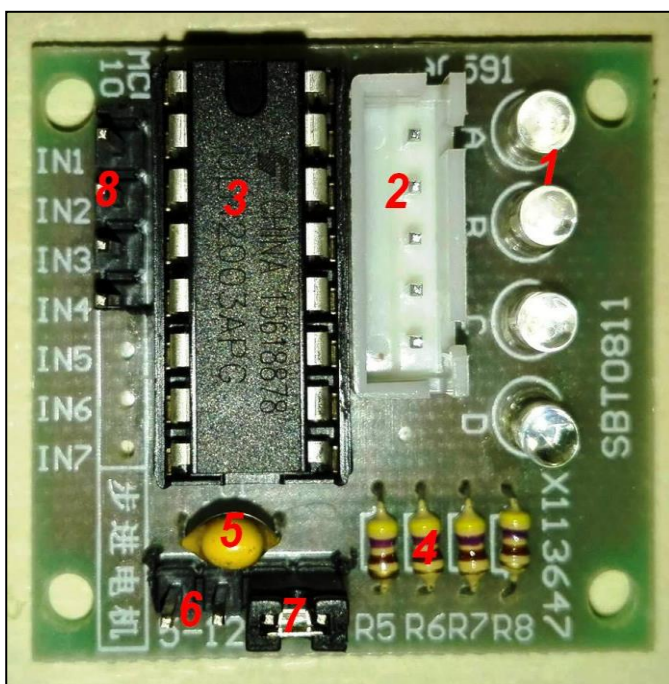
Στην παραπάνω εικόνα 8.1 βλέπουμε ακριβώς τι περιέχει μέσα ο βηματικός κινητήρας 28byj-48 αριθμημένα. Είναι απλός στην κατασκευή του και για αυτό δεν κοστίζει πολλά, περιέχει όπως όλους τους βηματικούς κινητήρες τον δρομέα του που αποτελείται από ένα μόνιμο μαγνήτη και τον στάτη που αποτελείται από τα εξαρτήματα 2,3,4 στα οποία έχουμε τις οδοντώσεις του στάτη. Οι οδοντώσεις είναι 32 συνολικά, 16 περιέχουν τα 2 τυλίγματα στο εσωτερικό του (εξάρτημα 2), 8 στο κάτω μέρος του στάτη (εξάρτημα 3) και αλλά 8 στην μεταλλική επιφάνια που τοποθετείται πάνω από τα τυλίγματα (εξάρτημα 4). Τα εξαρτήματα 5-6 είναι κύριος για να σταθεροποιήσουν τον στάτη και δεν έχουν κάποια λειτουργία. Οι οδοντώσεις (πλαστικά γρανάζια) έχουν σκοπό να μεταφέρουν την κίνηση του δρομέα από το κέντρο στο άκρο της μηχανής. Η σειρά συναρμολογείας του βηματικού κίνητρα αριθμούμενη όπως δίνεται στο παραπάνω σχήμα είναι η έξις: 3-2,1-4-7-5-8-6

### Τεχνικά χαρακτηριστικά βηματικού κινητήρα 28byj-48 5V

- Φάσης: 4
- Ρεύμα: 160 mA σε κάθε τύλιγμα (320 mA σε λειτουργία διπλής ενεργοποίησης)  
Μετρήθηκε: 250 mA σταματημένο, 200 mA ενώ τρέχει γρήγορα.
- Αντίσταση: 31 Ω σε κάθε τύλιγμα (από το κόκκινο καλώδιο σε οποιοδήποτε άλλο)
- Τάση: 5 volt DC
- Βηματική γωνία που κάνει μόνος του ο κινητήρας ( με αλληλουχία 8 βημάτων ):  $5,625^\circ$  (64 βήματα για μια πλήρη περιστροφή)
- Βηματική γωνία που κάνει μόνος του ο κινητήρας ( με αλληλουχία 4 βημάτων ):  $11,25^\circ$  (32 βήματα για μια πλήρη περιστροφή)
- Λόγος μετάδοσης μειωτήρα:  $1/64$  (η πραγματική ακριβής μετάδοση είναι  $1/63,68395$ )
- Πραγματικά βήματα στον άξονα (με αλληλουχία 8 βημάτων):  $64 \times 64 = 4096$  βήματα
- Πραγματικά βήματα στον άξονα (με αλληλουχία 4 βημάτων):  $32 \times 64 = 2048$  βήματα
- No-Load Pull-Out Frequency : 800pps
- No-Load Pull-In Frequency : 500pps
- Pull-In Torque :  $\geq 78.4 \text{mN.m}$
- Καλωδίωση: A(μπλε), B(ροζ), C(κίτρινο), D (πορτοκαλί), E(κόκκινο, μεσαίος ακροδέκτης)
- Βάρος: 30g

### 8.3 Πλακέτα οδήγησης ZC-A0591 με το ολοκληρωμένο ULN2003

Η πλακέτα οδήγησης που θα χρησιμοποιήσουμε φέρει πάνω του το ολοκληρωμένο UNL2003 το οποίο στην ουσία είναι ο οδηγός στο σύστημα μας. Είναι κατασκευασμένη για να οδηγεί βηματικούς κινητήρες τεσσάρων φάσεων .Η πλακέτα έχει διαστάσεις 3,15 εκατοστών x 3,5 εκατοστών. Πάνω της η πλακέτα εκτός από το ολοκληρωμένο UNL2003 φέρει 4 led τα οποία είναι για την ένδειξη του βήματος(step indicator LEDs),4 αντιστάσεις της τιμής τον 470 ohms  $\pm 5\%$  ,ένας δέκτης για την σύνδεση του βηματικού κινητήρα 28byj-48,ένας πυκνωτής της τιμης των 10nF, δέκτης πηγής τάσεως 5-12v, ένας on/off jumper και τέλος 4 επαφές (IN1,IN2,IN3,IN4) οι οποίες αποτελούν τα σήματα εξόδου της πλακέτας μας προς την διάταξη Arduino.



- 1) Step indicator LEDs
- 2) Stepper motor connector
- 3) ULN2003
- 4) Αντιστάσεις
- 5) Πυκνωτής
- 6) DC power (5-12v)
- 7) on/off jumper
- 8) Επαφές σήματος

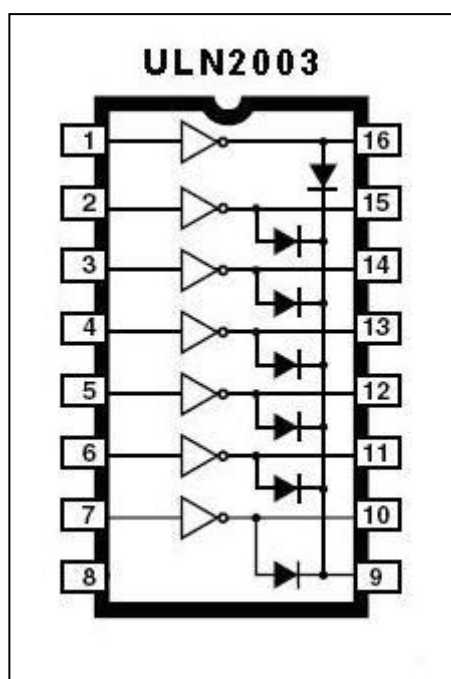
Εικόνα 8.2 - Πλακέτα οδήγησης ZC-A0591

Να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη πλακέτα είναι ιδικά κατασκευασμένη για τον βηματικό κινητήρα 28byj-48 ,ωστόσο αυτό δεν σημαίνει ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την οδήγηση κάποιου άλλου βηματικού κινητήρα με παρόμοια χαρακτηριστικά.

## 8.4 ULN2003

Στην κατασκευή μας για να επιτύχουμε την οδήγηση του κινητήρα μας θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε σαφώς κάποιον οδηγό για να οδηγήσει τα τυλίγματα του κινητήρα μας. Στο σύστημα μας έχουμε το ολοκληρωμένο ULN2003.

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ULN2003 είναι ένας οδηγός που αποτελείται από επτά ζεύγη Darlington. Έχει τάση εξόδου μέχρι και 50V – 500mA. Στην ουσία ένα ζεύγος Darlington χρησιμεύει για τη ‘μετατροπή’ της τάσης εξόδου του καλωδίου στην πλακέτα arduino (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:



Εικόνα 8.3 - ολοκληρωμένο ULN2003

Περιλαμβάνει επτά διατάξεις τρανζίστορ σε συνδεσμολογία **Darlington**. Σε κάθε κύκλωμα εξόδου υπάρχει ενσωματωμένη μια διόδος η οποία χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις οδήγησης επαγωγικών φορτίων και λειτουργεί ως διόδος 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 μέσω της προστατευτικής διόδου.

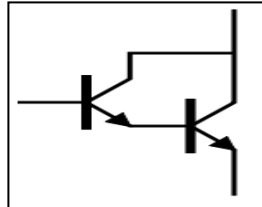


Ο οδηγός ισχύος ULN2003 είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα τεχνολογίας TTL. Τυπικές χρήσεις αυτού του ολοκληρωμένου είναι η οδήγηση διαφόρων τύπων ηλεκτρονόμων, DC κινητήρων, μονάδων απεικόνισης με LED, κεφαλές θερμικής εκτύπωσης, κ.λ.π. Για κάθε ένα από τα επτά εσωτερικά κυκλώματα εξόδου υπάρχει μια δίοδος, της οποίας η άνοδος συνδέεται στον αντίστοιχο ακροδέκτη εξόδου και η κάθοδος της συνδέεται σε έναν κόμβο κοινό για όλα τα κυκλώματα εξόδου, στον οποίο 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:

ULN2003A	
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

### 8.4.1 Ζεύγη Darlington

Ένα ζεύγος Darlington αποτελείται 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:



Εικόνα 8.4 - Συνδεσμολογία των τρανζίστορ σε ζεύγος Darlington

Η διατάξη 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).

Μία γενική σχέση που ισχύει μεταξύ των  $\beta$  των δύο τρανζίστορ δίνεται παρακάτω:

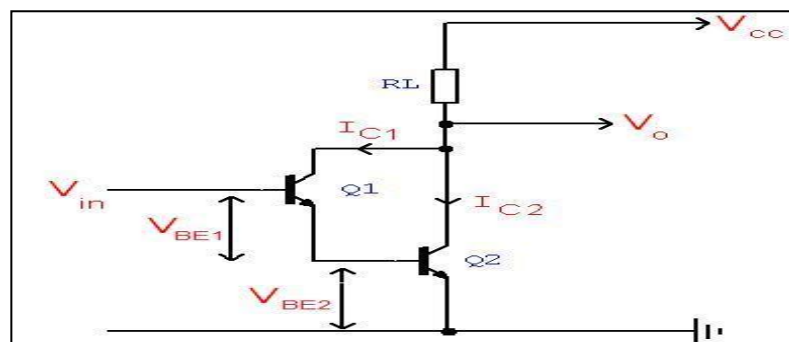
$$\beta_{Darlington} = \beta_1 \times \beta_2 + \beta_1 + \beta_2$$

Αν  $\beta_1$  και  $\beta_2$  έχουν πολύ μεγάλες τιμές, τότε η προηγούμενη σχέση προσεγγίζεται από την παρακάτω:

$$\beta_{Darlington} \approx \beta_1 \times \beta_2$$

Η σχέση που ισχύει μεταξύ των τάσεων βάσεως εκπομπού των δύο τρανζίστορ δίνεται παρακάτω:

$$V_{BE} = V_{BE1} + V_{BE2} \approx 2V_{BE1}$$



Εικόνα 8.5 – Κύκλωμα δυο τρανζίστορ Darlington

### 8.5 Πλακέτα Arduino uno 3

Η εταιρία της arduino προσφέρει διάφορα είδη πλακέτας της πατέντα της ανάλογα με τη χρήση θέλει να κάνει ο αγοραστής. Εμείς επιλέξαμε την έκδοση uno 3 η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη στην αγορά. Η πλακέτα έχει την δυνατότητα να συνδεθεί με καλώδιο usb στον υπολογιστή μας από όπου θα γίνει και ο έλεγχος του κινητήρα μας. Επίσης η πλακέτα μπορεί να τροφοδοτηθεί από ανεξάρτητη πηγή τάσεως 5-12v. Εμείς ωστόσο θα χρησιμοποιήσουμε την τάση των 5v την οποία η πλακέτα μας δέχεται μέσω το usb από τον υπολογιστή μας. Όπως είδαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο το arduino έχει πολλές επαφές διαθέσιμες. Στην κατασκευή μας ωστόσο θα χρησιμοποιήσουμε τις εξής:

1)Επαφές τροφοδοσίας (Power) συγκεκριμένα την επαφή των 5v και μια επαφή γείωσης (GND)

2)4 Επαφές σήματος DIGITAL <PWM> συγκεκριμένα τις επαφές 2,3,4,5

Οι έπαθες αυτές με της σειρά τους θα οδηγηθούν στην πλακέτα οδήγησης.

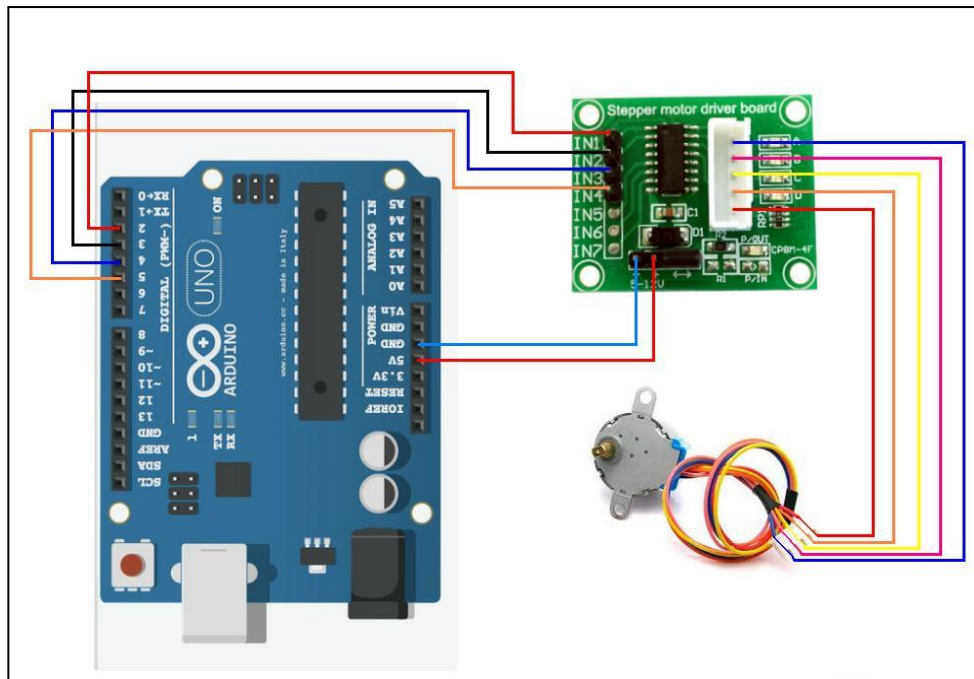
### 8.6 Διαδικασία κατασκευής

Μετά την αγορά και την πλήρη κατανόηση όλων των θεωρητικών στοιχείων που εμπλέκονται στην πτυχιακή μας εργασία σειρά πήρε εκπόνηση της κατασκευής μας.

Αρχικά συνδέσαμε την πλακέτα arduino στον υπολογιστή μας να βεβαιωθούμε ότι λειτουργεί. Από το διαδίκτυο έγινε λήψη του δωρεάν λογισμικού arduino το οποίο εγκαταστήσαμε και εκκινήσαμε. Αφού παρατηρήσαμε το περιβάλλον κάναμε τις αρχικές ρύθμισης η οποίες ήταν να θέσουμε την λειτουργία του προγράμματος μόνο με την έκδοση uno , να δούμε αν το πρόγραμμα αναγνωρίζει ότι έχουμε συνδεδεμένη την πλακέτα arduino και έπειτα να θέσουμε την κατάλληλη θύρα(port) στην οποία το πρόγραμμα θα περάσει τις εντολές.

Σειρά πήραν κάποιες δοκιμαστικές πρόβες πρώτου συνδέσουμε την πλακέτα οδήγησης. Χρησιμοποιώντας το πολύμετρο μας και δίνοντας την πιο βασική εντολή στο arduino δηλαδή να δώσει σήμα HIGH στην επαφή 2, το πολυμερή στην επαφή αυτή μας έδωσε από την αρχική τιμή 0v σε 5v.Μετά από αυτό κατανοήσαμε πλήρες πως λειτουργεί η διάταξη μας.

Μελετώντας καλά όλες της εντολές στην γλωσσά προγραμματισμού του arduino φτιάξαμε ένα κώδικα ο οποίος ήταν λιτός και κατανοητός. Συγκεκριμένα θα έδινε στις έπαθες 2,3,4,5 τιμές Low και High με μια χρονική καθυστέρηση. Για να δοκιμάσουμε όμως τον κώδικα αυτό στον κινητήρα μας θα έπρεπε πρώτα να συνδέσουμε όλο το σύστημα μας. Όπως απεικονίζεται και στο παρακάτω σχήμα συνδέσαμε τις επαφές 2,3,4,5 στις αντίστοιχες επαφές που έχει ο πλακέτα οδήγησης, επίσης από της έπαθες τροφοδοσίας τις πλακέτας οδήγησης πήγαμε στις επαφές τροφοδοσία της πλακέτας arduino (5v,GND).



Εικόνα 8.6 – Συνδεσμολογία κατασκευής

Μετά την συνδεσμολογία συνδέσαμε όλο το σύστημα μας στον υπολογιστή.

Αρχικά θέσαμε υψηλή χρονική καθυστέρηση στα σήματα μας. Αυτό διότι θεωρητικά ξέραμε ότι κάθε φορά που ένα σήμα θα πήγαινε σε θέση high θα ενεργοποιήσουμε το αντίστοιχο τύλιγμα και επειδή από κατασκευαστικής μεριάς (συμφώνα με το όσα ισχυρίζονται οι πολίτες του) ξέραμε ότι κάθε φορά που ενεργοποιείτε ένα τύλιγμα θα ανάβει και το αντίστοιχο του LED, θα ήταν αδύνατο για μας με χαμάλη χρονική καθυστέρηση να παρατηρήσουμε τα led που στην ουσία είναι τα τυλίγματα μας. Μετά από επιτυχής εναλλαγή των τυλιγμάτων κάθε 1 δευτερόλεπτο περίπου χαμηλώσαμε την χρονική καθυστέρηση σε κλάσματα του δευτερόλεπτου ώστε να γίνουν περισσότερα και ποιο γρήγορα βήματα για να δούμε αν ο βηματικός μας κινητήρας περιστρέφεται.

Ύστερα από όλα αυτά και αφού καταλάβαμε πως το πείραμα μας προχώρα με επιτυχία μελετήσαμε διαφορές εντολές για το λογισμικό μας ώστε να ελέγχουμε τον βηματικός μας κινητήρα με ευκολία στην ταχύτητα και στην φορά που θέλουμε και επίσης σε όλους τους τρόπους βηματισμού (μισού βήματος, ολόκληρου βήματος, μονού βήματος).

## 8.6 Κώδικας οδήγησης

### *Μισού βήματος*

```
void setup()
{
pinMode(2, OUTPUT);
pinMode(3, OUTPUT);
pinMode(4, OUTPUT);
pinMode(5, OUTPUT);
}
```

```
void loop()
{
int speed1 = 10;
int speed2 = 0;

digitalWrite(2, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(2, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(2, HIGH);
digitalWrite(3, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(2, LOW);
digitalWrite(3, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(3, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(3, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(3, HIGH);
digitalWrite(4, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(4, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(4, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(4, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(4, HIGH);
digitalWrite(5, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(5, LOW);
delay(speed2);
```

```
digitalWrite(5, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(5, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(5, HIGH);
digitalWrite(2, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(5, LOW);
digitalWrite(2, LOW);
delay(speed2);

}
```

### *Reverse μισού βήματος (αλλαγή φοράς περιστροφής)*

```
void setup()
{
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
}
```

```
void loop()
{
  int speed1 = 1000;
  int speed2 = 0;
```

```
digitalWrite(5, HIGH);
digitalWrite(2, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(5, LOW);
digitalWrite(2, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(5, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(5, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(4, HIGH);
digitalWrite(5, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(5, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(4, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(4, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(3, HIGH);
digitalWrite(4, HIGH);
delay(speed1);
```

```
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(4, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(3, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(3, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(2, HIGH);
digitalWrite(3, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(2, LOW);
digitalWrite(3, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(2, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(2, LOW);
delay(speed2);

}
```

### *Μονού βήματος*

```
void setup()
{
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
}
```

```
void loop()
{
  int speed1 = 10;
  int speed2 = 0;

  digitalWrite(2, HIGH);
  delay(speed1);
  digitalWrite(2, LOW);
  delay(speed2);
  digitalWrite(3, HIGH);
  delay(speed1);
  digitalWrite(3, LOW);
  delay(speed2);
  digitalWrite(4, HIGH);
  delay(speed1);
  digitalWrite(4, LOW);
  delay(speed2);
  digitalWrite(5, HIGH);
  delay(speed1);
  digitalWrite(5, LOW);
  delay(speed2);
}
```

**Reverse μονού βήματος (αλλαγή φοράς περιστροφής)**

```
void setup()
{
pinMode(2, OUTPUT);
pinMode(3, OUTPUT);
pinMode(4, OUTPUT);
pinMode(5, OUTPUT);
}
```

```
void loop()
{
int speed1 = 10;
int speed2 = 0;

digitalWrite(5, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(5, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(4, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(4, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(3, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(3, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(2, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(2, LOW);
delay(speed2);
}
```

**Ολόκληρου βήματος**

```
void setup()
{
pinMode(2, OUTPUT);
pinMode(3, OUTPUT);
pinMode(4, OUTPUT);
pinMode(5, OUTPUT);
}
```

```
void loop()
{
int speed1 = 10;
int speed2 = 0;

digitalWrite(2, HIGH);
digitalWrite(3, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(2, LOW);
```



```
digitalWrite(3, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(3, HIGH);
digitalWrite(4, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(4, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(4, HIGH);
digitalWrite(5, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(5, LOW);
delay(speed2);
digitalWrite(5, HIGH);
digitalWrite(2, HIGH);
delay(speed1);
digitalWrite(5, LOW);
digitalWrite(2, LOW);
delay(speed2);
}
```

#### *Reverse ολόκληρου βήματος (αλλαγή φοράς περιστροφής)*

```
void setup()
{
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
}

void loop()
{
  int speed1 = 10;
  int speed2 = 0;

  digitalWrite(2, HIGH);
  digitalWrite(5, HIGH);
  delay(speed1);
  digitalWrite(2, LOW);
  digitalWrite(5, LOW);
  delay(speed2);
  digitalWrite(5, HIGH);
  digitalWrite(4, HIGH);
  delay(speed1);
  digitalWrite(5, LOW);
  digitalWrite(4, LOW);
  delay(speed2);
  digitalWrite(4, HIGH);
  digitalWrite(3, HIGH);
  delay(speed1);
  digitalWrite(4, LOW);
```

```
digitalWrite(3, LOW);  
delay(speed2);  
digitalWrite(3, HIGH);  
digitalWrite(2, HIGH);  
delay(speed1);  
digitalWrite(3, LOW);  
digitalWrite(2, LOW);  
delay(speed2);  
}
```

## Βιβλιογραφία

### *Πηγές Πληροφοριών από διαδικτυακά sites:*

<http://www.mechatronics.gr/>

[Physiclessons.gr](http://Physiclessons.gr)

[Ilektroaytomatismoι.gr](http://Ilektroaytomatismoι.gr)

<http://multimechatronics.com/>

[Engineersgarage.com](http://Engineersgarage.com)

[Solarbotics.net](http://Solarbotics.net)

[haydonkerk.com](http://haydonkerk.com)

[anaheimautomation.com](http://anaheimautomation.com)

[alldatasheet.com](http://alldatasheet.com)

<http://www.atmel.com>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Darlington\\_transistor](http://en.wikipedia.org/wiki/Darlington_transistor)

<http://www.nmbtc.com/>

### *Πηγές πληροφοριών από βιβλία:*

Stepping Motors - A Guide to Theory and Practice

Takashi Kenjo-Stepping Motors and Their Microprocessor Controls (Monographs in Electrical and Electronic Engineering) - Oxford University Press (1984)

**Παράρτημα**



UNISONIC TECHNOLOGIES CO., LTD

ULN2003

**LINEAR INTEGRATED CIRCUIT**

**7CH DARLINGTON SINK DRIVER**

■ **DESCRIPTION**

The UTC **ULN2003** are high-voltage, high-current darlington drivers comprised of seven NPN Darlington pairs.

All units feature integral clamp diodes for switching inductive loads.

Applications include relay, hammer, lamp and display (LED) drivers.

■ **FEATURES**

\*Output Current (Single Output): 500mA (MAX.)

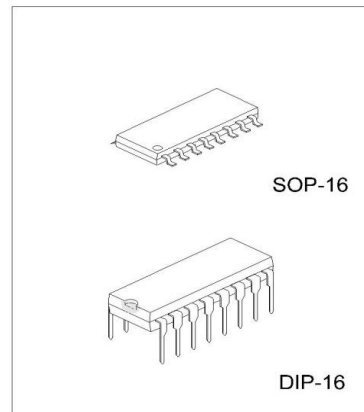
\*High Sustaining Voltage Output: 50V (MIN.)

\*Output Clamp Diodes

\*Inputs Compatible With Various Types Of Logic

■ **ORDERING INFORMATION**

Ordering Number		Package	Packing
Lead Free	Halogen Free		
ULN2003L-D16-T	ULN2003G-D16-T	DIP-16	Tube
ULN2003L-S16-R	ULN2003G-S16-R	SOP-16	Tape Reel
ULN2003L-S16-T	ULN2003G-S16-T	SOP-16	Tube

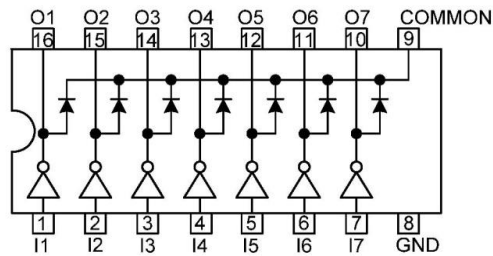


ULN2003L-D16-T 	(1) Packing Type (2) Package Type (3) Lead Free	(1) R: Tape Reel, T: Tube (2) D16: DIP-16, S16: SOP-16 (3) G: Halogen Free, L: Lead Free
--------------------	---	--

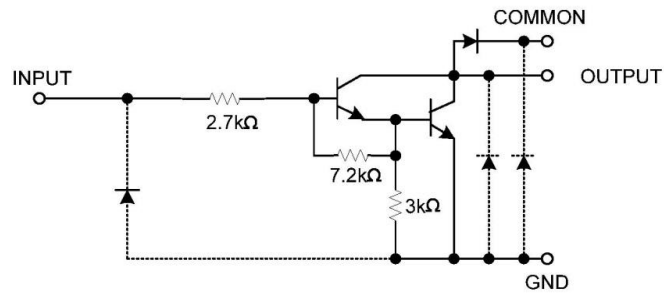
ULN2003

LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

■ PIN CONNECTION



■ BLOCK DIAGRAM



Note: The input and output parasitic diodes cannot be used as clamp diodes.

## ULN2003

## LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

■ ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_A=25^\circ\text{C}$ )

PARAMETER	SYMBOL	RATING	UNIT
Output Sustaining Voltage	$V_{OUT}$	-0.5~50	V
Input Voltage	$V_{IN}$	-0.5~30	V
Clamp Diode Reverse Voltage	$V_R$	50	V
Output Current	$I_{OUT}$	500	mA / ch
Clamp Diode Forward Current	$I_F$	500	mA
Power Dissipation	DIP-16	1.47	W
	SOP-16	1.25 (Note2)	W
Junction Temperature	$T_J$	+125	$^\circ\text{C}$
Operating Temperature	$T_{OPR}$	-40~+85	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	$T_{STG}$	-55~+150	$^\circ\text{C}$

Note: 1. Absolute maximum ratings are those values beyond which the device could be permanently damaged.

Absolute maximum ratings are stress ratings only and functional device operation is not implied.

2. On PCB (Test Board: JEDEC 2s2p)

■ RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS ( $T_A=-40\sim+85^\circ\text{C}$ )

CHARACTERISTIC	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
Output Sustaining Voltage	$V_{OUT}$		0		50	V
Output Current	DIP-16 SOP-16	$I_{OUT}$ $T_{PW} = 25\text{ms}$ 7 Circuits $T_A = 85^\circ\text{C}$ $T_J = 120^\circ\text{C}$	Duty = 10%	0	350	mA/ch
			Duty = 50%	0	100	
			Duty = 10%	0	300	
			Duty = 50%	0	90	
Input Voltage	$V_{IN}$		0		24	V
Input Voltage (Output On)	$V_{IN(ON)}$	$I_{OUT} = 400\text{mA}$	2.8		24	V
Input Voltage (Output Off)	$V_{IN(OFF)}$		0		0.7	V
Clamp Diode Reverse Voltage	$V_R$				50	V
Clamp Diode Forward Current	$I_F$				350	mA
Power Dissipation	DIP-16	$T_A = 85^\circ\text{C}$			0.76	W
	SOP-16	$T_A = 85^\circ\text{C}$ (Note)			0.65	

Note: On PCB (Test Board: JEDEC 2s2p)

■ ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_A=25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified)

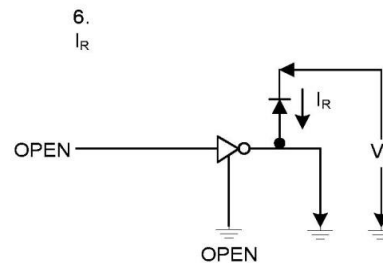
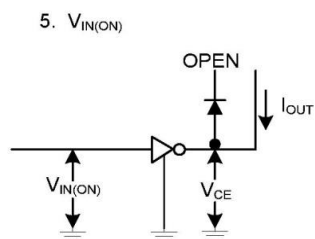
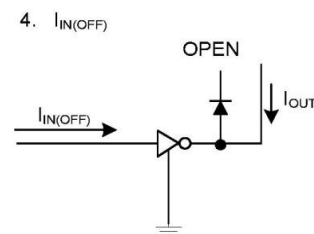
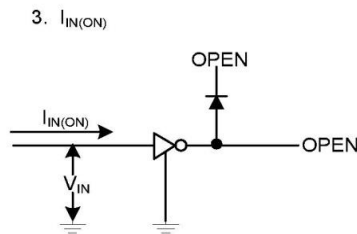
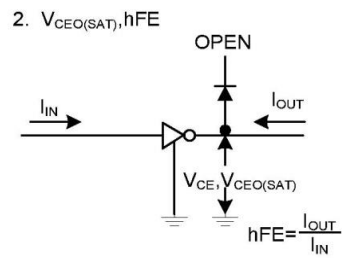
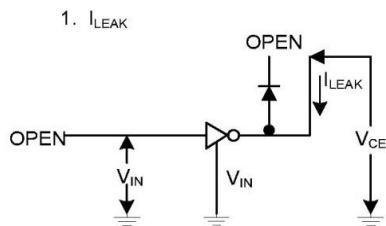
CHARACTERISTIC	SYMBOL	TEST CIRCUIT	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
Output Leakage Current	$I_{LEAK}$	1	$V_{CE} = 50\text{V}, T_A = 25^\circ\text{C}$			50	$\mu\text{A}$
			$V_{CE} = 50\text{V}, T_A = 85^\circ\text{C}$			100	
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CEO(SAT)}$	2	$I_{OUT} = 350\text{mA}, I_{IN} = 500\mu\text{A}$		1.3	1.6	V
			$I_{OUT} = 200\text{mA}, I_{IN} = 350\mu\text{A}$		1.1	1.3	
			$I_{OUT} = 100\text{mA}, I_{IN} = 250\mu\text{A}$		0.9	1.1	
DC Current Transfer Ratio	$h_{FE}$	2	$V_{CE} = 2\text{V}, I_{OUT} = 350\text{mA}$	1000			
Input Current (Output On)	$I_{IN(ON)}$	3	$V_{IN} = 2.4\text{V}, I_{OUT} = 350\text{mA}$		0.4	0.7	mA
Input Current (Output Off)	$I_{IN(OFF)}$	4	$I_{OUT} = 500\mu\text{A}, T_A = 85^\circ\text{C}$	50	65		$\mu\text{A}$
Input Voltage (Output On)	$V_{IN(ON)}$	5	$V_{CE} = 2\text{V}$	$I_{OUT} = 350\text{mA}$		2.6	V
				$I_{OUT} = 200\text{mA}$		2.0	
Clamp Diode Reverse Current	$I_R$	6	$V_R = 50\text{V}, T_A = 25^\circ\text{C}$			50	$\mu\text{A}$
			$V_R = 50\text{V}, T_A = 85^\circ\text{C}$			100	
Clamp Diode Forward Voltage	$V_F$	7	$I_F = 350\text{mA}$			2.0	V
Input Capacitance	$C_{IN}$				15		pF
Turn-On Delay	$t_{ON}$	8	$V_{OUT} = 50\text{V}, R_L = 125\Omega$ $C_L = 15\text{pF}$		0.1		$\mu\text{s}$
Turn-Off Delay	$t_{OFF}$	8	$V_{OUT} = 50\text{V}, R_L = 125\Omega$ $C_L = 15\text{pF}$		0.2		

ULN2003

LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

■ TEST CIRCUIT

Components in the test circuits are used only to obtain and confirm the device characteristics. These components and circuits are not guaranteed to prevent malfunction or failure from occurring in the application equipment.

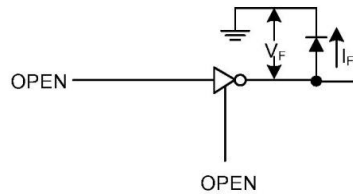


ULN2003

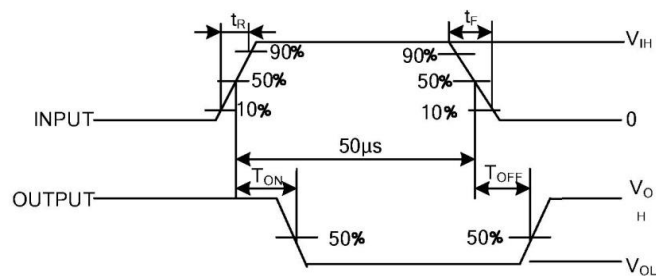
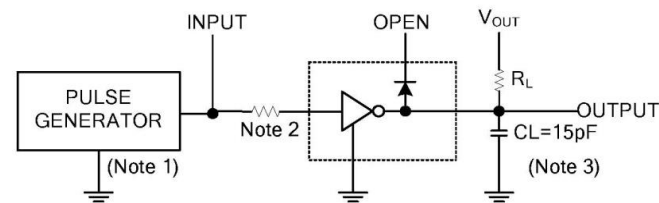
LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

■ TEST CIRCUIT(Cont.)

7.  $V_F$



8.  $t_{ON}, t_{OFF}$



Note 1: Pulse width 50μs ,duty cycle 10%  
Output impedance 50Ω  $t_R$  5ns,  $t_F$  10ns

Note 2: See below

INPUT CONDITION

TYPE NUMBER	R1	$V_{IH}$
ULN2003	0	3V

Note 3:  $C_L$  includes probe and jig capacitance



## ULN2003

## LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

## ■ APPLICATION NOTES

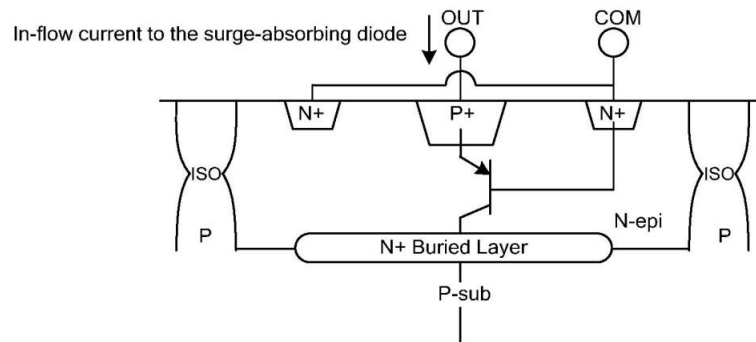
This UTC **ULN2003** does not include built-in protection circuits for over-current or over-voltage. If this IC is subjected to over-current or over-voltage, it may be destroyed. Hence, the utmost care must be taken when systems which incorporate this IC are designed. Utmost care is necessary in the design of the output line, COMMON and GND line since IC may be destroyed due to short-circuit between outputs, air contamination fault, or fault by improper grounding.

The UTC **ULN2003** is a darlington driver array, and can be directly coupled to a general logic circuit such as TTL or CMOS. Resistors are connected in series to each of the inputs to achieve a stable input current.

The load should be connected between the output and the power supply. To protect the IC from excessive swing voltage, the COMMON pin (Pin 9) should be connected to the power supply.

The UTC **ULN2003** can absorb the surge current because of the on-chip diode. The bottom Figure shows the configuration of the on-chip diode.

In the construction of the surge-absorbing diode, there is parasitic PNP, output pin for emitter, COMMON pin for base and the substrate (P-sub) for collector. When the diode is on, current flows from the output pin to the substrate. When using the surge-absorbing diode, appropriate measures should be taken for the thermal characteristics of the design considering the current. For example, when motor back-rush current or other conditions that can create continued surge current flow to the surge-absorbing diode, we strongly recommend connecting a Schottky barrier diode (or other type of diode with a low forward voltage) in parallel with the surge-absorbing diode to construct a bypass route for the surge current.



Construction of the Surge-Absorbing Diode

## ULN2003

## LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

## ■ NOTICE ON PRODUCT USE

(1) The absolute maximum ratings of the IC are a set of ratings that must not be exceeded, even for a moment. Exceeding the rating(s) may cause the device breakdown, damage or deterioration, and may cause injury by explosion or combustion.

(2) To ensure that a large current does not continuously flow in case of over current and/or IC failure, an appropriate power supply fuse should be used. The IC will fully breakdown under conditions that exceed its absolute maximum ratings. For example, when the wiring is routed improperly or when an abnormal pulse noise occurs from the wiring or load, causing a large current to continuously flow and the breakdown can lead smoke or ignition. To minimize the effects of the flow of a large current in case of breakdown, careful settings, such as fuse capacity, fusing time and insertion circuit location, are required.

(3) If the design includes an inductive load such as a motor coil, the current resulting from the inrush current at power ON or the negative current resulting from the back electromotive force at power OFF can cause device malfunction or breakdown, so a protection circuit need to be incorporated into the design. IC breakdown may cause injury, smoke or ignition. When the power supply is unstable, the build-in protection function may not operate, causing IC breakdown. IC breakdown may cause injury, smoke or ignition.

(4) Do not mount devices in the wrong orientation or incorrectly. Make sure that the positive and negative terminals of power supplies are connected properly. Otherwise, the current or power consumption may exceed the absolute maximum rating, and may cause the device breakdown, damage or deterioration, and may result injury by explosion or combustion. In addition, do not use any device that is applied the current with inserting in the wrong orientation or incorrectly even just one time.

(5) Carefully select external components (such as inputs and negative feedback capacitors) and load components (such as speakers), for example, power amp and regulator. If there is a large amount of leakage current such as input or negative feedback condenser, the IC output DC voltage will increase. If this output voltage is connected to a speaker with low input withstand voltage, over-current or IC failure can cause smoke or ignition. (The over-current can cause smoke or ignition from the IC itself.) In particular, please pay attention to the Bridge Tied Load (BTL) connection type IC that inputs output DC voltage to a speaker directly.

## ■ POINTS TO REMEMBER ON PRODUCT USE

## (1) Heat Radiation Design

When IC is used with large current flow such as power amp, regulator or driver, the heat radiation consideration should be designed carefully, not to exceed the specified junction temperature ( $T_J$ ) at any time and condition. An inadequate IC heat radiation design can lead to decrease in IC life, deterioration of IC characteristics or IC breakdown. Meanwhile, also should take into considerate the effect of IC heat radiation with peripheral components.

## (2) Back-EMF

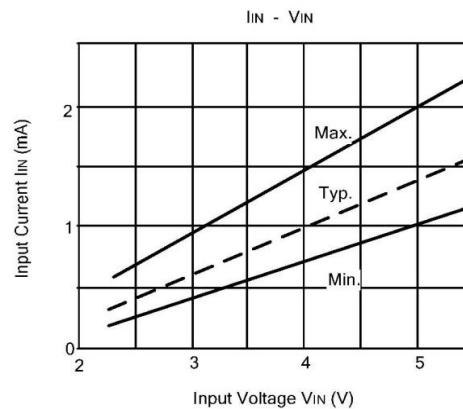
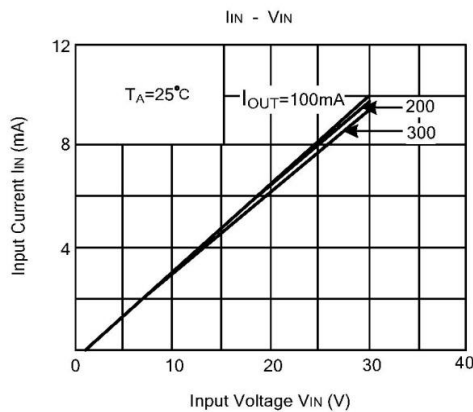
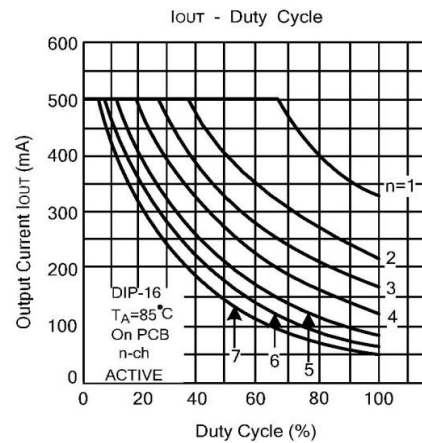
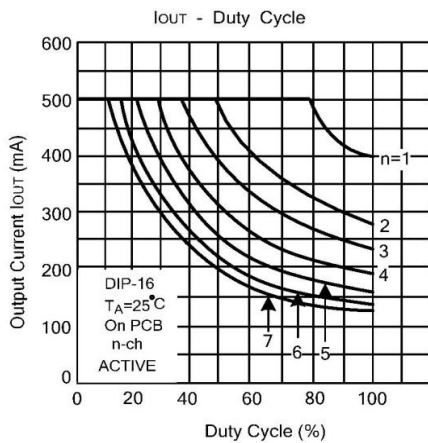
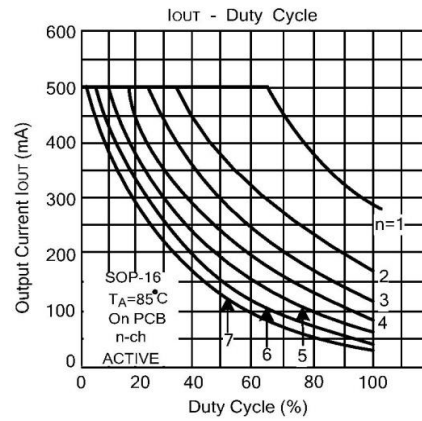
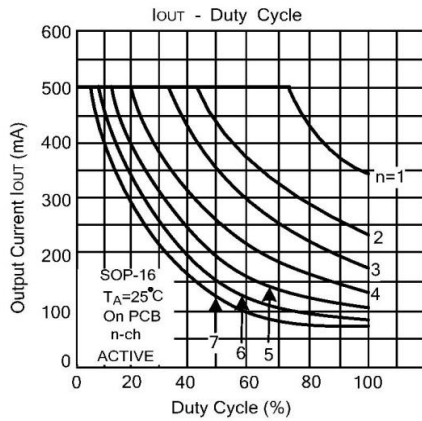
When a motor rotates in the reverse direction, stops or slows down abruptly, a current flow back to the motor's power supply due to the effect of back-EMF. The device's motor power supply and output pins might be exposed to conditions exceeding absolute maximum ratings, when the current sink capability of the power supply is small. To avoid happening, take the effect of back-EMF into consideration in system design.



ULN2003

LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

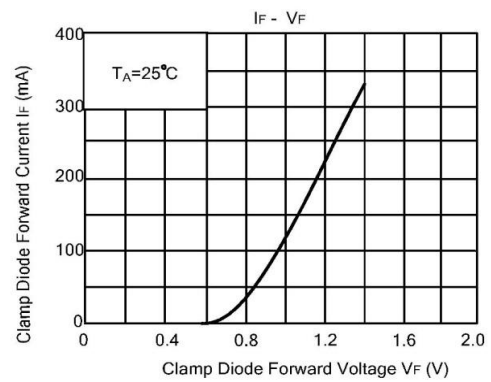
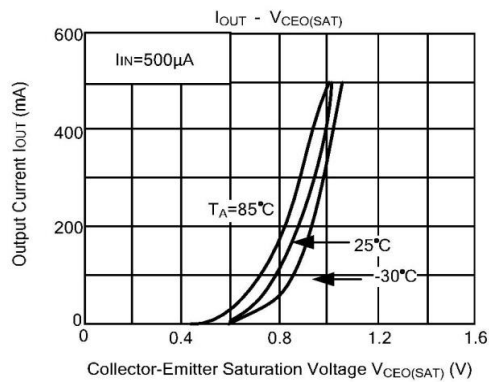
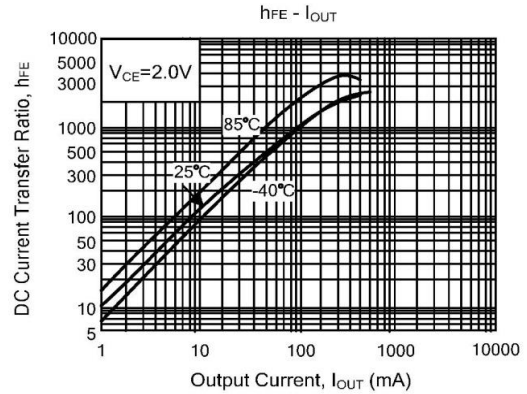
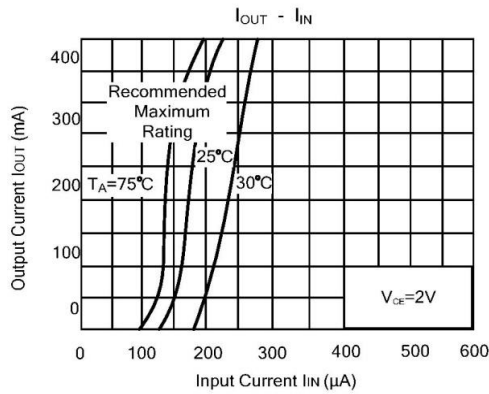
■ TYPICAL CHARACTERISTICS



ULN2003

LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

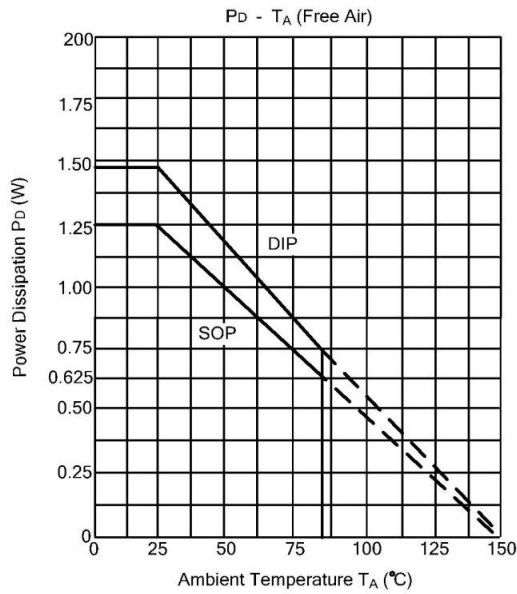
■ TYPICAL CHARACTERISTICS(Cont.)



ULN2003

LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

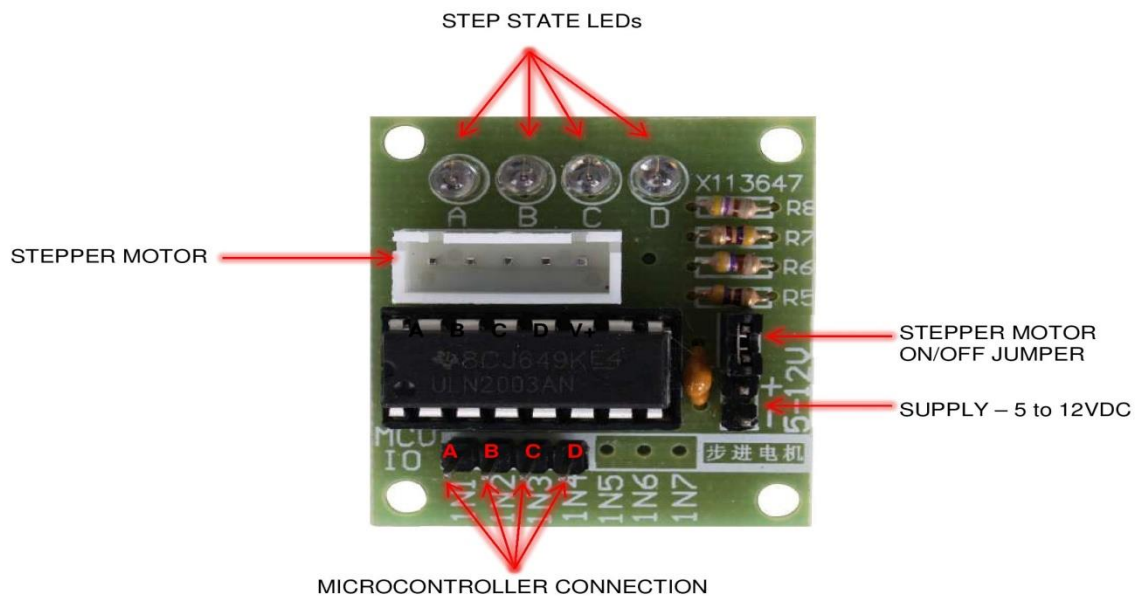
■ TYPICAL CHARACTERISTICS(Cont.)



UTC assumes no responsibility for equipment failures that result from using products at values that exceed, even momentarily, rated values (such as maximum ratings, operating condition ranges, or other parameters) listed in products specifications of any and all UTC products described or contained herein. UTC products are not designed for use in life support appliances, devices or systems where malfunction of these products can be reasonably expected to result in personal injury. Reproduction in whole or in part is prohibited without the prior written consent of the copyright owner. The information presented in this document does not form part of any quotation or contract, is believed to be accurate and reliable and may be changed without notice.

#### 4 Phase ULN2003 Stepper Motor Driver PCB

The ULN2003 stepper motor driver PCB provides a direct drive interface between your microcontroller and stepper motor. The PCB provides 4 inputs for connection to your microcontroller, power supply connection for the stepper motor voltage, and ON/OFF jumper, a direct connect stepper motor header and 4 LEDs to indicate stepping state.



##### Stepper Motor Connection

Connect stepper motor to this header. If you use one of our stepper motors they will just plug directly into the header. If you have another brand without the correct header plug, you could solder the wires directly to the back of the PCB.

##### Step State LEDs

Indicate which channel is active.

##### ON/OFF Jumper

Isolates power to the stepper Motor

##### Supply

Power to drive stepper motor. Make sure it matches the rating of the stepper motor you are using.

##### Microcontroller Connection

Connect 4 outputs from your microcontroller to the four inputs.

Supply Volts: 5-12VDC

Maximum Current per output : 500mA

### Operation

The driver board accepts a four bit command from any microcontroller and in turn applies the necessary power pulse to step the motor. At the heart of the driver is a ULN2003AN integrated circuit. The board can supply between 5V to 12V to the motor from an independent power supply. It also has a bank of LED's that correspond to the input signals received from the controller. They provide a nice visual when stepping.

Some typical stepper motor details:

- Model: 28KYJ-48
- Voltage: 5VDC
- Phase: 4
- Step Angle: 5.625° (1/64)
- Reduction ratio: 1/64

It takes 4096 steps to rotate the spindle 360°. It is impossible to see a single step. When testing it pays to have something distinct on the spindle to show it is turning.

Physically connecting a microcontroller to the driver board is straight forward. Pick a free GPIO pin on an expansion header and run a wire from it to one of the input pins on the driver board. The driver board requires power. Make sure your power supply has sufficient power to drive the stepper motor. It is usually a good idea to use a separate power source to the one that is driving the microcontroller. Having wired a GPIO pins to the driver board you can test the interface. Set the GPIO pin high and the corresponding LED on the driver board will illuminate. Set it low and the LED turns off.

Typical Connections

Signal Name	Microcontroller Pin	Driver Board Pin
VDD_5V		+
GND	GND	-
GPIO1	PORTA.0	IN1
GPIO2	PORTA.1	IN2
GPIO3	PORTA.2	IN3
GPIO4	PORTA.3	IN4

The motor steps when a specific combination of inputs are driven from the microcontroller. This is just a pulse of power, just enough to get the motor to step. This driver uses a very simple protocol. Applying a signal to an input pin causes power to be sent to the motor on a corresponding wire.

### MCU IO Code Wire Color

IN1	A	Blue
IN2	B	Pink
IN3	C	Yellow
IN4	D	Orange

The following codes define the step commands.

8 Step : A – AB – B – BC – C – CD – D – DA  
 4 Step : AB – BC – CD – DA (Usual application)

### Step Command IN4 IN3 IN2 IN1

A	01H	0	0	0	1
AB	03H	0	0	1	1
B	02H	0	0	1	0
BC	06H	0	1	1	0
C	04H	0	1	0	0
CD	0CH	1	1	0	0
D	08H	1	0	0	0
DA	09H	1	0	0	1

Some compilers have specific STEP commands and instructions included and do all the work for you. But now you know how to control the stepper motor by directly driving the IO pins.

### 28BYJ-48 – 5V Stepper Motor

The 28BYJ-48 is a small stepper motor suitable for a large range of applications.



Rated voltage :	5VDC
Number of Phase	4
Speed Variation Ratio	1/64
Stride Angle	5.625°/64
Frequency	100Hz
DC resistance	50Ω±7%(25°C)
Idle In-traction Frequency	> 600Hz
Idle Out-traction Frequency	> 1000Hz
In-traction Torque	>34.3mN.m(120Hz)
Self-positioning Torque	>34.3mN.m
Friction torque	600-1200 gf.cm
Pull in torque	300 gf.cm
Insulated resistance	>10MΩ(500V)
Insulated electricity power	600VAC/1mA/1s
Insulation grade	A
Rise in Temperature	<40K(120Hz)
Noise	<35dB(120Hz,No load,10cm)
Model	28BYJ-48 – 5V

