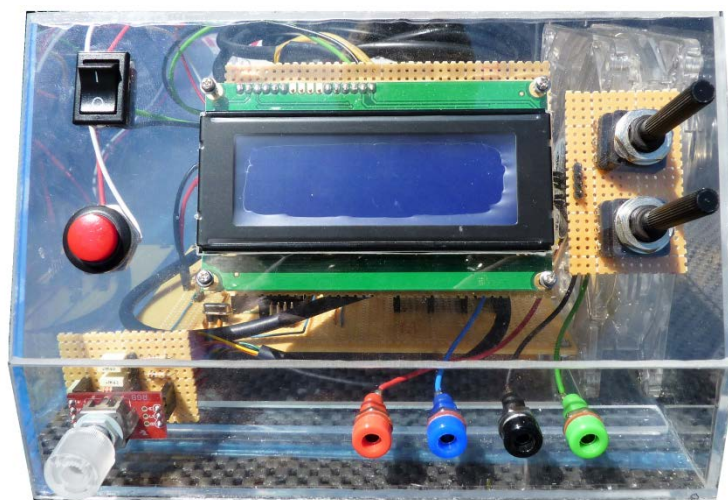




ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του Αριστεΐδη Μπαρτζή
Α.Μ.Φ 42179



Μελέτη μεθόδων ελέγχου κίνησης και προεπιλεγμένων
λειτουργιών βηματικού κινητήρα με χρήση μικροεπεξεργαστή

Study of motion control methods and preselected stepper motor
functions using microprocessor

Επιβλέπων Καθηγητής: Ηρακλής Βυλλιώτης, Καθηγητής Εφαρμογών

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Ηρακλή Βυλλιώτη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την υπομονή του κατά τη διάρκεια υλοποίησης αυτής της εργασίας, καθώς και για το ζήλο που έχει δείξει ο ίδιος και όλο το προσωπικό της σχολής όλα αυτά τα χρόνια στο λειτούργημα της εκπαίδευσης και της διδασκαλίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την υπομονή και τη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και όχι μόνο.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιάσει τα βήματα κατασκευής ενός συστήματος ελέγχου βηματικού κινητήρα, εκπαιδευτικού χαρακτήρα, κάνοντας χρήση μικροεπεξεργαστή καθώς και να εξηγήσει τον τρόπο λειτουργίας κάθε επιμέρους στοιχείου. Ένα μεγάλο μέρος της γνώσης και της εμπειρίας που αποκτήθηκε κατά την κατασκευή παρουσιάζεται στις παρακάτω σελίδες της.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται οι δύο μεγάλες κατηγορίες ηλεκτροκινητήρων, συνεχούς και εναλλασσομένου ρεύματος. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία αναλυτική περιγραφή των βηματικών κινητήρων και εξηγείται η αρχή λειτουργίας τους, η κατασκευή τους και ο τρόπος κατηγοριοποίησής τους. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο μπορούμε να ελέγξουμε ένα βηματικό κινητήρα. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του τρόπου χρήσης ενός μικροεπεξεργαστή για τον έλεγχο του βηματικού κινητήρα και στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή και ανάλυση της κατασκευής και παρουσιάζονται οι μετρήσεις και τα συμπεράσματα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ηλεκτροκινητήρες.....	4
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	4
1.2 Γενικά.....	7
1.3 Κινητήρες AC.....	8
1.4 Κινητήρες DC.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βηματικοί Κινητήρες.....	16
2.1 Εξέλιξη των βηματικών κινητήρων.....	16
2.2 Αρχή λειτουργίας.....	18
2.3 Κατηγορίες βηματικών κινητήρων.....	20
2.4 Με βάση την κατασκευή.....	21
2.5 Με βάση τη συνδεσμολογία.....	24
2.6 Θετικά και αρνητικά βηματικών κινητήρων.....	27
2.7 Εφαρμογές βηματικών κινητήρων.....	28
2.8 Ο βηματικός κινητήρας της κατασκευής.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Έλεγχος βηματικού κινητήρα.....	32
3.1 Παλμοδότηση.....	32
3.2 Διαδοχή παλμών τροφοδοσίας.....	34
3.3 Έλεγχος ταχύτητας βηματικού κινητήρα.....	36
3.4 Οδηγοί ελέγχου.....	37
3.5 Μικροβηματισμός.....	38
3.6 Για την κατασκευή.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μικροεπεξεργαστές.....	41
4.1 Άμεσος έλεγχος.....	42
4.2 Σύνδεση με τον οδηγό.....	43
4.3 Προγραμματισμός μικροεπεξεργαστή.....	44
4.4 Για την κατασκευή.....	45
4.4.1 Προεπιλεγμένες λειτουργίες.....	46
4.4.2 Κώδικας.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανάλυση κατασκευής.....	94
5.1 Κυκλώματα και Μετρήσεις.....	94
5.2 Συμπεράσματα.....	102
Βιβλιογραφία.....	103

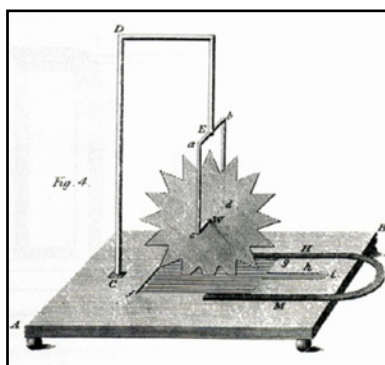
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ηλεκτροκινητήρες

1.1 Ιστορική αναδρομή

Με την εφεύρεση της μπαταρίας (Alessandro Volta, 1800), τη μετατροπή του ηλεκτρικού ρεύματος σε μαγνητικό πεδίο και τη μελέτη του ηλεκτρομαγνητικού φαινομένου τοποθετήθηκαν τα θεμέλια για την δημιουργία των ηλεκτρικών κινητήρων. Κατά τη δεκαετία 1810-1820 ιδιαίτερα σημαντικό ήταν το ζήτημα αν οι ηλεκτροκινητήρες θα πρέπει να είναι περιστροφικές ή παλινδρομικές μηχανές.

Σε όλο τον κόσμο, πολλοί εφευρέτες εργάστηκαν παράλληλα σε αυτό το θέμα με αποτέλεσμα οι εξελίξεις και οι διαδοχικές εφευρέσεις στον τομέα της ηλεκτρικής επιστήμης και των εφαρμογών της να βρίσκονται στο ζενίθ.

Η πρώτη περιστρεφόμενη συσκευή που εκμεταλλεύονταν το φαινόμενο του ηλεκτρομαγνητισμού δημιουργήθηκε από τον Άγγλο Peter Barlow το 1822 και πήρε το όνομά του (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1, Τροχός του Barlow

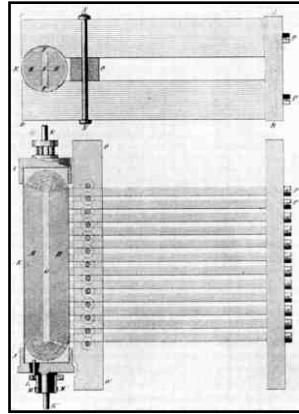
Μετά από πολλές προσπάθειες, επιτυχημένες ή μη, που είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σχετικά αδύναμων περιστροφικών και παλινδρομικών συσκευών, ο γερμανόφωνος Πρώσος Moritz Jacobi δημιούργησε τον πρώτο περιστρεφόμενο ηλεκτροκινητήρα το Μάιο του 1834, με αξιοσημείωτη για την εποχή μηχανική ισχύ

στην έξοδο. Ο κινητήρας του, μοναδικός σε ισχύ για εκείνη την εποχή, βελτιώθηκε τέσσερα χρόνια αργότερα, τον Σεπτέμβριο του 1838 από τον ίδιο. Ο δεύτερος κινητήρας του ήταν αρκετά ισχυρός ώστε να οδηγήσει μια βάρκα με 14 άτομα στην απέναντι όχθη ενός ποταμού. Μετά το 1840 άλλοι εφευρέτες σε όλο τον κόσμο κατάφεραν να κατασκευάσουν κινητήρες παρόμοιας και αργότερα υψηλότερης απόδοσης.

Ήδη από το 1833 ο Γερμανός Heinrich Friedrich Emil Lenz δημοσίευσε ένα άρθρο για τη σχέση των μαγνητοηλεκτρικών και ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, δηλαδή τη μετατροπή της ηλεκτρικής γεννήτριας σε κινητήρα και αντίστροφα. Το 1838 παρείχε λεπτομερή περιγραφή των πειραμάτων του με μια γεννήτρια Pixii (Hippolyte Pixii 1808–1835) που την λειτούργησε ως κινητήρια.

Το 1835 δύο Ολλανδοί, ο Sibrandus Stratingh και ο Christopher Becker κατασκεύασαν έναν ηλεκτροκινητήρα που κινούσε ένα μικρό αμαξίδιο. Αυτή είναι η πρώτη γνωστή πρακτική εφαρμογή μιας ηλεκτρικής μηχανής. Το Φεβρουάριο του 1837 χορηγήθηκε το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στον Αμερικανό Thomas Davenport για ένα ηλεκτρικό μοτέρ ωστόσο, όλες οι προηγούμενες προσπάθειες κατασκευής ηλεκτρικού κινητήρα δεν οδήγησαν στους ηλεκτροκινητήρες που γνωρίζουμε σήμερα.

Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος (DC) δημιουργήθηκε και εξελίχθηκε με την ανάπτυξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (δυναμόμετρα). Οι βάσεις για τη δημιουργία του κινητήρα τέθηκαν από τον William Ritchie και Hippolyte Pixii το 1832 με την εφεύρεση του συλλέκτη και έπειτα από τον Werner Siemens το 1856 και τον αρχιμηχανικό του, Friedrich Hefner-Alteneck, το 1872 με μια κατασκευή που παραπέμπει στα σημερινά τυλίγματα των κινητήρων (Σχήμα 1.2) με το τύμπανο να φέρει τυλίγματα τοποθετημένα στις εγκοπές του δρομέα.



Σχήμα 1.2, Τυλίγματα σε συστοιχίες Double T-anchor

Οι DC κινητήρες εξακολουθούν να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αγορά σήμερα σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος (κάτω του 1 kW) και χαμηλής τάσης (κάτω από 60 V).

Μεταξύ του 1885 και του 1889 εφευρέθηκε το τριφασικό ηλεκτρικό σύστημα ισχύος, που αποτελεί τη βάση για τη σύγχρονη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας και για τους προηγμένους ηλεκτροκινητήρες. Δεν μπορούμε να ονοματίσουμε έναν μόνο εφευρέτη του συστήματος ισχύος τριών φάσεων και αυτό γιατί υπάρχουν διάφορα περισσότερο ή λιγότερο γνωστά ονόματα που συμμετείχαν ενεργά στην εφεύρεση αυτή. Galileo Ferraris (1885), Friedrich August Haselwander (1887-1888), Charles Schenk Bradley (1887-1889), Michael Dolivo-Dobrowolsky (1889-1891), Jonas Wenström (1889-1893), Nikola Tesla (1882-1889) είναι μερικά από τα πρόσωπα που συνέβαλλαν στην εφεύρεση αυτή.

Σήμερα, ο τριφασικός σύγχρονος κινητήρας χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον σε πολύ δυναμικές εφαρμογές για παράδειγμα σε μεγάλες ρομποτικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις και σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τον Friedrich August Haselwander το 1887.

Ο άκρως επιτυχημένος τριφασικός επαγωγικός κινητήρας κλωβού κατασκευάστηκε για πρώτη φορά από τον Michael Dolivo-Dobrowolsky το 1889. Σήμερα, ο κινητήρας αυτός κατέχει την πρώτη θέση στην παραγωγή και τον συναντάμε πιο συχνά σε εφαρμογές ισχύος από 1 kW και άνω.

1.2 Γενικά

Στη σύγχρονη εποχή, είναι πλέον κοινά αποδεκτό, ότι χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα δύσκολα μπορούμε να κάνουμε οποιαδήποτε δουλειά. Αν κοιτάξουμε τον κόσμο στον οποίο ζούμε, η σημαντική εξέλιξη στην τεχνολογία και τον πολιτισμό έλαβε χώρα μόνο μετά την ανάπτυξη, παραγωγή και χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας και των ηλεκτρικών συσκευών. Είναι δύσκολο να φανταστούμε τη ζωή μας χωρίς ηλεκτρικό φωτισμό, ηλεκτρονικούς υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και πολλές άλλες ηλεκτρικές συσκευές.

Έτσι γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η ηλεκτρική ενέργεια και πολλές ηλεκτρικές συσκευές διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στην καθημερινότητά μας. Τέτοιες συσκευές οι οποίες αποτέλεσαν ένα γιγάντιο άλμα για την ανθρωπότητα τόσο στον οικιακό όσο και στον βιομηχανικό τομέα είναι οι ηλεκτρικοί κινητήρες. Σχεδόν κάθε μηχανική κίνηση που βλέπουμε γύρω μας πραγματοποιείται με τη χρήση ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Οι ηλεκτρικές μηχανές, αποτελούν μέσο για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας, σε μαγνητική και από μαγνητική, σε μηχανική.

Οι ηλεκτροκινητήρες που χρησιμοποιούνται για να κινήσουν εκατοντάδες βιομηχανικές ή οικιακές συσκευές που χρησιμοποιούμε στην καθημερινή μας ζωή, έχουν διάφορα μεγέθη.

Τεράστιοι κινητήρες που μπορεί να χειριστούν φορτία χιλιάδων ίππων δύναμης χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία. Μερικά παραδείγματα των εφαρμογών μεγάλων ηλεκτροκινητήρων μπορεί να είναι οι ανελκυστήρες, τα ηλεκτρικά τρένα, τα ανυψωτικά μηχανήματα και μύλοι βαρέων μετάλλων κύλισης. Εφαρμογές μικρών ηλεκτροκινητήρων αποτελούν τα αυτοκίνητα, τα ρομπότ, τα ηλεκτρικά εργαλεία χειρός και τα μπλέντερ τροφίμων. Μίκρο-μηχανές είναι ηλεκτρικές μηχανές με εξαρτήματα του μεγέθους των ερυθρών αιμοσφαιρίων, και βρίσκουν πολλές εφαρμογές στην ιατρική.

Οι ηλεκτροκινητήρες κυρίως κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Κινητήρες AC (εναλλασσόμενου ρεύματος) και κινητήρες DC (συνεχούς ρεύματος). Μέσα σε αυτές τις κατηγορίες περιέχονται πολυάριθμα είδη ηλεκτροκινητήρων, προσφέροντας το καθένα μοναδικές ικανότητες που ταιριάζει για κάθε διαφορετική εφαρμογή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ανεξάρτητα από τον τύπο, οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούνται από το στάτη (στατικό πεδίο) και το δρομέα ή ρότορα (περιστρεφόμενο πεδίο ή σπλισμός) και λειτουργούν μέσω της αλληλεπίδρασης της μαγνητικής ροής και του ηλεκτρικού ρεύματος για την παραγωγή της ταχύτητας περιστροφής και της ροπής.

1.3 Κινητήρες AC

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος έχουν ρόλο ζωτικής σημασίας στην καθημερινότητά μας, από την άντληση του πόσιμου νερού που φτάνει στα σπίτια μας μέχρι την κίνηση ενός σύγχρονου ρομποτικού βραχίονα. Ο κύριος παράγοντας που οδήγησε στην ευρεία χρήση των κινητήρων αυτών, σε διάφορους τομείς, είναι η

ευελιξία τους και η τεράστια ποικιλία τους, η οποία μπορεί να εξυπηρετήσει σχεδόν οποιοδήποτε εφαρμογή. Για να γνωρίζουμε όμως τι είδους κινητήρα θα χρησιμοποιήσουμε σε κάθε εφαρμογή, θα πρέπει να τους ταξινομήσουμε με βάση την αρχή λειτουργίας, την τροφοδοσία, την ταχύτητα ή την κατασκευή τους.

Ταξινόμηση Κινητήρων Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Με βάση την αρχή λειτουργίας τους, οι κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος ταξινομούνται σε:

- Σύγχρονους κινητήρες
 - Απλούς
 - Υπερσύγχρονους

Αυτοί οι κινητήρες έχουν δρομέα ο οποίος περιστρέφεται με ταχύτητα ίδια με την ταχύτητα περιστροφής του πεδίου στο στάτη. Με άλλα λόγια, μπορούμε να πούμε ότι αυτοί οι κινητήρες δεν έχουν ολίσθηση. Μερικές φορές χρησιμοποιούνται όχι για να κινήσουν κάποιο φορτίο, αλλά ως «σύγχρονοι πυκνωτές» για βελτίωση του συντελεστή ισχύος του τοπικού δικτύου με το οποίο συνδέεται. Επίσης συναντώνται συχνά και ως γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος αντί για κινητήρες. Αυτό το είδος των κινητήρων χρησιμοποιούνται ακόμη και σε συσκευές υψηλής ακρίβειας θέσης, όπως απαιτεί η σύγχρονη ρομποτική. Μπορούν επίσης να λειτουργήσουν και ως βηματικοί κινητήρες φορτίζοντάς κάθε φορά διαφορετικό τύλιγμα από τις τρεις η περισσότερες φάσεις.

- Ασύγχρονους κινητήρες
 - Επαγωγικούς
 - Κλωβού (απλού ή διπλού)
 - Δακτυλιοφόρου δρομέα (εξωτερική αντίσταση)
 - Κινητήρες με συλλέκτη
 - Σειράς (μονοφασικοί/universal)
 - Με τυλίγματα αντιστάθμισης (αγώγιμα/επαγωγικά)
 - Παράλληλοι (απλοί/με αντιστάθμιση)
 - Αντίδρασης (απλοί/με αντιστάθμιση)
 - Επαγωγικοί με αντίδραση κατά την εκκίνηση
 - Απωστικοί επαγωγικοί

Αποτελούν την πιο κοινή μορφή κινητήρα που χρησιμοποιείται στην καθημερινότητα. Αυτοί οι κινητήρες, σε αντίθεση με τους σύγχρονους έχουν ολίσθηση σε σχέση με το πεδίο του στάτη. Χρησιμοποιούνται γενικά για διάφορους τύπους αντλιών, συμπιεστών και λειτουργούν ως κινητήρια δύναμη σε πολλά μηχανήματα.

- Με βάση την τροφοδοσία:
 - Μονοφασικοί
 - Τριφασικοί

Οι κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες με βάση την τροφοδοσία τους. Οι μονοφασικοί κινητήρες γενικά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος όπως οικιακές συσκευές, ανεμιστήρες οροφής, μίξερ, φορητά ηλεκτρικά εργαλεία κ.λπ. Οι τριφασικοί

κινητήρες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις ισχύος, όπως μονάδες ισχύος για συμπιεστές, υδραυλικές αντλίες, συμπιεστές κλιματισμού, αντλίες άρδευσης και πολλά άλλα.

- Με βάση την ταχύτητα:
 - Σταθερής ταχύτητας
 - Μεταβαλλόμενης ταχύτητας
 - Ρυθμιζόμενης ταχύτητας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι εξαιρετικά εύχρηστοι, με ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους την ευκολία του ελέγχου της ταχύτητας τους. Υπάρχουν κινητήρες που θα πρέπει να λειτουργούν σε σταθερές στροφές για αεροσυμπιεστές. Ορισμένες αντλίες νερού ψύξης λειτουργούν με κινητήρες που πρέπει να λειτουργούν σε δύο ή τρεις ταχύτητες αλλάζοντας απλώς τον αριθμό των πόλων που χρησιμοποιούνται. Εάν ο αριθμός των πόλων αλλάξει τότε αλλάζει και η ταχύτητα του κινητήρα. Αυτοί οι κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως ως αντλίες ψύξης θαλασσινού νερού στα μηχανοστάσια των πλοίων αλλά και σε πολλές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ταχύτητα των κινητήρων μπορεί επίσης να είναι συνεχώς μεταβλητή μέσω ορισμένων ηλεκτρονικών ρυθμιστών, αυτό μπορεί να έχει εφαρμογή για παράδειγμα στα αντλιοστάσια ενός πλοίου, όπου η ταχύτητα της αντλίας πρέπει να αυξομειώνεται σύμφωνα με τις ανάγκες στο χώρο αποθήκευσης.

- Με βάση την κατασκευή τους:
 - Ανοιχτού τύπου
 - Κλειστού τύπου
 - Ημίκλειστου τύπου
 - Αεριζόμενοι
 - Με ψήκτρες
 - Ανεστραμμένου πλαισίου

Αυτοί οι τύποι κινητήρων έχουν ειδική διαμόρφωση στο εξωτερικό τους περίβλημα, ανάλογα με τη χρήση ή οποιαδήποτε ειδική βιομηχανική απαίτηση. Για τους κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε αποθηκευτικούς χώρους φυσικού αερίου και πετρελαίου, το περίβλημα πρέπει να είναι εγγενώς ασφαλές, έτσι μπορεί να έχουν είτε ένα κλειστό περίβλημα ή η ψύξη να πραγματοποιείται με μια διάταξη ψηκτρών τέτοια ώστε οι σπινθήρες που παράγονται στο εσωτερικό του κινητήρα να μην προκαλέσουν πυρκαγιά έξω από αυτό. Τέλος πολλοί κινητήρες μπορεί να είναι εντελώς κλειστού τύπου ώστε να προφυλάσσονται από το περιβάλλον, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στα εργοστάσια υδροηλεκτρικής ενέργειας.

1.4 Κινητήρες DC

Υπάρχουν διάφορα είδη κινητήρων συνεχούς ρεύματος, αλλά όλα έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του κινητήρα, ώστε μπορούμε να επιλέξουμε το σωστό για κάθε εφαρμογή. Όπως οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος έτσι και οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος μπορούν να

ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες. Αυτές είναι με βάση την κατασκευή, την τροφοδοσία και την συνδεσμολογία τους.

Ταξινόμηση Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος

Με βάση την κατασκευή τους, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος ταξινομούνται σε:

- Μόνιμου μαγνήτη
- Ηλεκτρομαγνήτη

Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη περιέχουν στο εσωτερικό τους μαγνήτες με τέτοια κατανομή ώστε να δημιουργούν ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο. Οι κινητήρες αυτοί έχουν αρκετά ικανοποιητική ροπή εκκίνησης με καλή σταθεροποίηση στην ταχύτητά τους. Ένα μειονέκτημα των κινητήρων συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη είναι ότι έχουν περιορισμένη ισχύ φορτίου γι αυτό και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με ανάγκες μικρής ιπποδύναμης.

Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι η ροπή περιορίζεται συνήθως στο 150% της ονομαστικής ροπής για την πρόληψη απομαγνήτισης των μονίμων μαγνητών.

Οι κινητήρες ηλεκτρομαγνήτη αντί για μόνιμους μαγνήτες έχουν ηλεκτρομαγνήτες για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου. Έχουν όλα τα θετικά των κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες, δηλαδή ικανοποιητική ροπή εκκίνησης και σχετικά σταθερή ταχύτητά ενώ η ισχύς φορτίου που μπορούν να χειριστούν είναι μεγαλύτερη. Επίσης δεν έχουν περιορισμό στη ροπή τους όμως και αυτού του είδους οι κινητήρες συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με χαμηλές απαιτήσεις.

Με βάση την τροφοδοσία οι κινητήρες μπορούν να ταξινομηθούν ως υποκατηγορία των κινητήρων με ηλεκτρομαγνήτη σε:

- Ξένης διέγερσης
- Αυτοδιέγερσης

Στους κινητήρες ξένης διέγερσης, τα τυλίγματα του ηλεκτρομαγνήτη που δημιουργεί το στατικό πεδίο, τροφοδοτούνται από ξεχωριστή πηγή τροφοδοσίας. Αυτό σημαίνει ότι η περιέλιξη του στάτη (ηλεκτρομαγνήτη) διαχωρίζεται ηλεκτρικά από το τύλιγμα του δρομέα. Οι κινητήρες αυτοί δεν χρησιμοποιούνται συχνά επειδή αυξάνεται το κόστος λειτουργίας τους λόγω της απαίτησης μιας επιπλέον πηγής τροφοδοσίας. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργαστήρια για ερευνητικές δοκιμές, σε εφαρμογές που απαιτείται ακριβής έλεγχος της ταχύτητας και σε μερικές άλλες εφαρμογές όπου οι αυτοδιεγείρομενοι κινητήρες δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις.

Στους κινητήρες αυτοδιέγερσης τα τυλίγματα του στάτη τροφοδοτούνται από το ηλεκτρικό κύκλωμα του δρομέα, με διάφορους τρόπους για να επιτευχθεί μια ποικιλία χαρακτηριστικών απόδοσης.

Με βάση την συνδεσμολογία οι κινητήρες μπορούν να ταξινομηθούν ως υποκατηγορία των αυτοδιεγείρομενων κινητήρων σε:

- Διέγερσης Σειράς
- Παράλληλης διέγερσης
- Σύνθετης διέγερσης

Στους κινητήρες διέγερσης σειράς το τύλιγμα του στάτη συνδέεται σε σειρά με αυτό του δρομέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το τύλιγμα του στάτη να διαρρέεται με όλο το φορτίο του δρομέα, δηλαδή φορτίζεται με το ολικό ρεύμα του κυκλώματος. Γι αυτό το λόγο τα τυλίγματα έχουν σχεδιαστεί με λίγες στροφές, χοντρό σύρμα περιέλιξης και η αντίσταση να διατηρείται πολύ χαμηλή, περίπου 0,5 Ohm.

Στους κινητήρες παράλληλης διέγερσης ο ηλεκτρομαγνήτης συνδέεται παράλληλα με το τύλιγμα του δρομέα. Σε αυτή την περίπτωση η τάση είναι αυτή που είναι κοινή για τα δύο τυλίγματα και έτσι κατασκευαστικά το τύλιγμα του στάτη αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό στροφών με υψηλή αντίσταση που μπορεί να φτάνει περίπου τα 100 Ohm. Ωστόσο λόγω της υψηλής αντίστασης υπάρχει περιορισμός στο ρεύμα τροφοδοσίας που θα πρέπει να είναι λιγότερο από το 5% του ονομαστικού ρεύματος του τυλίγματος του δρομέα.

Στη σύνθετη διέγερση υπάρχουν δύο τυλίγματα στο στάτη. Ένα συνδέεται σε σειρά και το άλλο συνδέεται παράλληλα με το τύλιγμα του δρομέα. Εδώ υπάρχουν δύο κατηγορίες συνδεσμολογίας. Η σύνδεση μικρής διακλάδωσης και η σύνδεση μακράς διακλάδωσης.

Στη μικρή διακλάδωση το τύλιγμα του στάτη συνδέεται παράλληλα μόνο με το τύλιγμα του δρομέα, ενώ στη μακρά διακλάδωση το τύλιγμα του στάτη συνδέεται παράλληλα στο συνδυασμό σε σειρά τύλιγμα στάτη – τύλιγμα δρομέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βηματικοί Κινητήρες

2.1 Εξέλιξη των βηματικών κινητήρων

Μετά τη βιομηχανική επανάσταση, την ανακάλυψη και την εξέλιξη του ηλεκτροκινητήρα, άρχισε να γίνεται επιτακτική η ανάγκη δημιουργίας ηλεκτρομηχανών που η διεύθυνση της κίνησης τους, αλλά κυρίως η ακριβής θέση του δρομέα τους θα ήταν εύκολα ελέγξιμη. Έτσι σταδιακά άρχισαν να κατασκευάζονται και να εξελίσσονται οι πρώτοι κινητήρες θέσης ακριβείας ή βηματικοί κινητήρες.

Ο πρώτος βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης με αμφίδρομη κίνηση, αναπτύχθηκε για το Βρετανικό Ναυτικό το 1933. Είχε χρησιμοποιηθεί ως απομακρυσμένος αναμεταδότης για την κατάδειξη της θέσης της πυξίδας και της θέσης των όπλων. Ο έλεγχος του κινητήρα ήταν υποτυπώδης και πρόχειρος αλλά αποτελεσματικός για αυτές τις εφαρμογές που απαιτούσαν αργή και σταθερή ταχύτητα. Το σύστημα υιοθετήθηκε αργότερα από το Ναυτικό των ΗΠΑ κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Ο βηματικός κινητήρας εξελίχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1950 από τον Harrison D Brailsford ο οποίος επινόησε έναν βηματικό κινητήρα χωρίς συλλέκτη και ψήκτρες. Χρησιμοποιήθηκε σε περιορισμένο αριθμό πρωταρχικών ψηφιακών συστημάτων ελέγχου μεταξύ 1955-1960. Με την εισαγωγή όμως των θυρίστορ το 1957, που τότε ονομάζονταν SCRs (Silicone-Controlled Rectifiers), και τη χρήση τους ως οδηγών ελέγχου των κινητήρων άνευ ψηκτρών (brushless), επικράτησαν μετά το 1960 του κινητήρα που χρησιμοποιούνταν μέχρι εκείνη την εποχή ο οποίος ήταν ένας servo κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος, κλειστού βρόχου, συνεχούς επαγωγής.

Η ικανότητα των βηματικών κινητήρων DC άνευ ψηκτρών με τη χρήση των οδηγών ελέγχου SCRs να παράγουν στην έξοδο ισχύ από 1W έως 375W στο κενό, τους κατέστησε ιδανικούς ώστε να χρησιμοποιηθούν σε διαστημικές εφαρμογές από το 1965. Το σύστημα ανακύκλωσης οξυγόνου στο Apollo και η αντλία ψυκτικού στους διαστημικούς πυραύλους Saturn I-B και Saturn V χρησιμοποιήθηκαν DC κινητήρες χωρίς ψήκτρες (brushless).

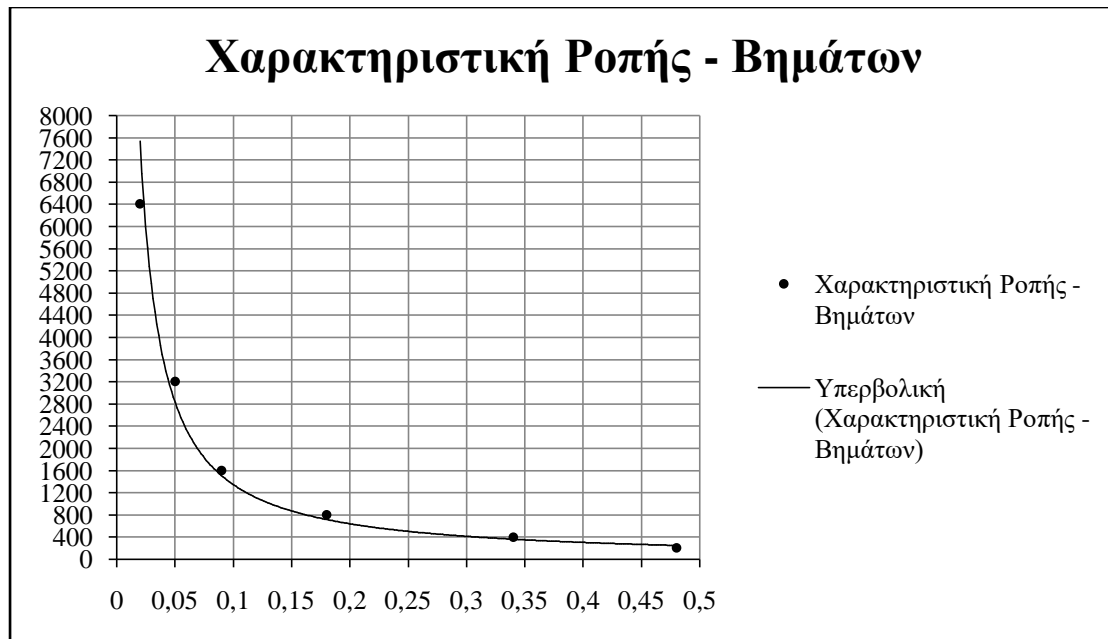
Το 1970 η Siemens Electric Co. ανέπτυξε το πρώτο εμπορικό προϊόν, ένα κασετόφωνο μπαταρίας, χρησιμοποιώντας ένα βηματικό κινητήρα DC δύο φάσεων με τον οδηγό ελέγχου κίνησης, για το μικρό ποσό των 25 δολαρίων. Ο ίδιος DC κινητήρας και ο οδηγός ελέγχου κίνησης ήταν ακόμα στην παραγωγή 10 χρόνια αργότερα.

Με την πάροδο των χρόνων οι βηματικοί κινητήρες εξελίχθηκαν, εισήχθησαν στην κατασκευή των μαγνητών τους σπάνιες γαίες, που αύξησαν αισθητά τη ροπή τους ενώ ταυτόχρονα εξελίχθηκαν και οι μέθοδοι για τον έλεγχό τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα δύο μέθοδοι ελέγχου βηματικών κινητήρων διαφορετικής συνδεσμολογίας. Ο ένας μονοπολικός όπου ο έλεγχός του πραγματοποιείται με σύνδεση αστέρα και ο άλλος διπολικός όπου γίνεται έλεγχος με σύνδεση μιας διπλής γέφυρας H. Η μέθοδος της διπλής γέφυρας H έγινε το πιο δημοφιλές σύστημα ελέγχου κίνησης στις αρχές του 1980. Μέχρι το 1974 οι περισσότερες εφαρμογές υψηλής απόδοσης χρησιμοποιούσαν ένα σύστημα μετάδοσης κίνησης τριών φάσεων. Αυτό το τριφασικό σύστημα, πλήρους κύματος, τραπεζοειδούς κυματομορφής, χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα.

2.2 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας των βηματικών κινητήρων βασίζεται στο γεγονός ότι οι μαγνητικά αντίθετοι πόλοι έλκονται. Αν και υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη ως προς την κατασκευή ενός βηματικού κινητήρα, όλοι βασίζονται στην ίδια αρχή. Στο στάτη βρίσκονται τα τύλιγματα τα οποία αποτελούν τους πόλους του κινητήρα. Κάθε φορά που ενεργοποιείται ένα τύλιγμα ένας πόλος μαγνητίζεται. Ανάλογα τη φορά της περιέλιξης (αριστερόστροφη ή δεξιόστροφη) ο πόλος γίνεται βόρειος ή νότιος. Το τύμπανο, όπου βρίσκεται συνήθως ένας μόνιμος μαγνήτης, στρέφεται και προσανατολίζεται κάθε φορά στον ενεργοποιημένο πόλο δημιουργώντας πάντα ένα ζεύγος βόριου – νότιου. Όταν τροφοδοτούμε λοιπόν με ρεύμα το ένα τύλιγμα του στάτη δημιουργείται μαγνητικό πεδίο που έλκει το μόνιμο μαγνήτη του δρομέα. Έπειτα τροφοδοτούμε το δεύτερο τύλιγμα και ο μαγνήτης έλκεται πραγματοποιώντας ένα βήμα. Το δεύτερο τύλιγμα τροφοδοτείται με ρεύμα αντίθετης πολικότητας ο μαγνήτης έλκεται και πάλι πραγματοποιώντας ένα δεύτερο βήμα. Σειρά έχει το πρώτο τύλιγμα που τροφοδοτείται και αυτό από ρεύμα αντίθετης πολικότητας από την αρχική και ο μαγνήτης κάνει ένα βήμα ακόμα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και ο κινητήρας περιστρέφεται βηματικά.

Σε κάθε βήμα ο κινητήρας «κλειδώνει» σε συγκεκριμένες θέσεις σύμφωνα με την κατασκευή του εκεί παρατηρείται και η μέγιστη ροπή του ή ροπή συγκράτησης. Αυτή η ροπή μεταβάλλεται σύμφωνα με τον συνολικό αριθμό βημάτων του δρομέα σε μια πλήρη περιστροφή. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η χαρακτηριστική ροπής - βημάτων ενός βηματικού κινητήρα.



Σχήμα 2.1, Χαρακτηριστική Ροπής – Βημάτων βηματικού κινητήρα

Άλλο ένα μέγεθος που μεταβάλλεται από τον αριθμό των βημάτων είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Τα δύο μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα με αποτέλεσμα όσο αυξάνεται ο αριθμός των βημάτων τόσο να μειώνεται και η ταχύτητα περιστροφής. Πράγματι όταν αυξάνεται ο αριθμός των πόλων τότε μειώνεται και η απόσταση που θα πρέπει να διανύσει ο άξονας ώστε να ευθυγραμμιστεί στο μαγνητικό πεδίο. Αν θεωρήσουμε δύο διαφορετικούς κινητήρες με 200 βήματα/περιστροφή και 400 βήματα/περιστροφή έκαστος τότε αν ο χρόνος παλμοδότησης παραμένει ίδιος και σταθερός για τους δύο κινητήρες τότε ο κινητήρας των 200 βημάτων θα έχει ολοκληρώσει δύο περιστροφές έναντι μίας του άλλου κινητήρα. Παρακάτω δίνεται η χαρακτηριστική ταχύτητας βημάτων.



Σχήμα 2.2, Χαρακτηριστική Ταχύτητας – Βημάτων βηματικού κινητήρα

Η ταχύτητα ενός βηματικού κινητήρα όμως εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά του. Παρακάτω θα δούμε πώς μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα περιστροφής ενός βηματικού κινητήρα και ποια είναι τα χαρακτηριστικά αυτά τα οποία συμβάλλουν στην μεταβολή της ταχύτητάς του.

2.3 Κατηγορίες Βηματικών Κινητήρων

Ο βηματικός κινητήρας είναι ουσιαστικά ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος, σύγχρονων στροφών, δύο φάσεων, χωρίς συλλέκτη και ψήκτρες. Δεν περιστρέφεται συνεχώς αντίθετα η κίνηση του είναι παλμική με ένα βήμα σε κάθε παλμό. Είναι προφανές λοιπόν γιατί ονομάζεται βηματικός κινητήρας. Την παραπάνω τροφοδοσία αναλαμβάνουν ειδικά κυκλώματα και οδηγοί ελέγχου βηματικών κινητήρων.

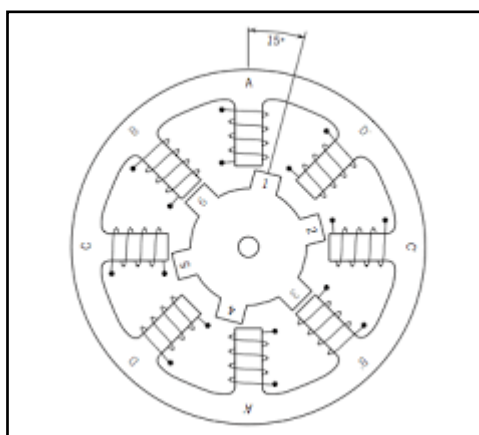
Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του κάθε κινητήρα για να μπορούμε να επιλέξουμε αυτόν που θα καλύψει τις απαιτήσεις της εφαρμογής μας.

Οι βηματικοί κινητήρες ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες, με βάση τη κατασκευή τους και με βάση την συνδεσμολογία των τυλιγμάτων τους.

2.4 Με βάση την κατασκευή

Με βάση την κατασκευή τους οι βηματικοί κινητήρες διακρίνονται σε τρία είδη. Τους βηματικούς κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης, τους βηματικούς κινητήρες μόνιμου μαγνήτη και τους υβριδικούς βηματικούς κινητήρες. Ας δούμε τα τρία αυτά είδη πιο αναλυτικά.

- Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης

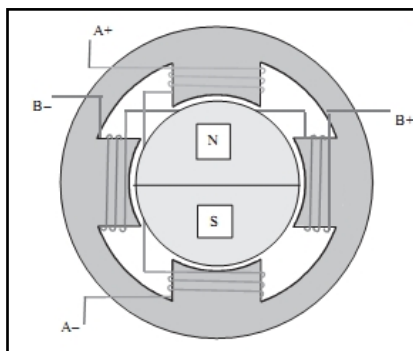


Σχήμα 2.3, Διατομή βηματικού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης

Οι βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης, αποτελούν την πιο απλή μορφή βηματικού κινητήρα. Ο δρομέας του αποτελείται από μαλακό σίδηρο και έχει όψη γραναζιού. Όταν εφαρμόζεται συνεχές ρεύμα στις περιελίξεις του στάτη, οι πόλοι μαγνητίζονται. Ο βηματισμός πραγματοποιείται όταν «τα δόντια» του ρότορα, που όπως είπαμε έχει όψη γραναζιού, έλκονται από τους μαγνητισμένους πόλους του στάτη. Δεδομένου ότι ο μαγνήτης του δρομέα, του κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής

αντίδρασης, είναι μικρότερος και ελαφρύτερος από εκείνον του κινητήρα μόνιμου μαγνήτη, είναι πιο γρήγορος. Όσο μικρότερο είναι το διάκενο μεταξύ των οδοντωτών του δρομέα και του στάτη, τόσο μικρότερη είναι η απώλεια της μαγνητικής δύναμης.

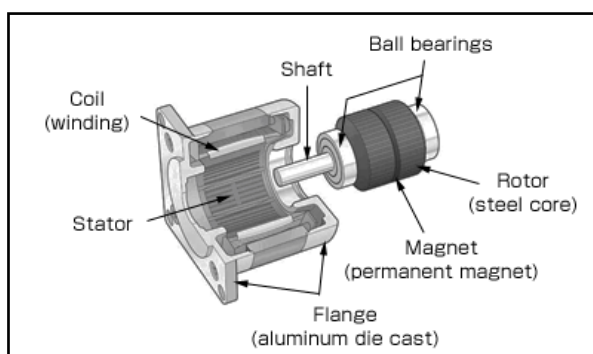
- Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη



Σχήμα 2.4, Διατομή βηματικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη.

Όπως υποδηλώνει και το όνομα, οι βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν στο εσωτερικό τους μόνιμους μαγνήτες και συγκεκριμένα στο δρομέα. Αντίθετα με τους κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη δεν έχουν οδοντωτό δρομέα. Ο δρομέας έχει κυλινδρικό σχήμα με πόλους που εναλλάσσονται περιμετρικά. Αυτή η εναλλαγή των πόλων, από βόριο σε νότιο και αντίστροφα, καθώς επίσης και η συμπυγμένη τοποθέτηση τους περιμετρικά του άξονα παρέχει αυξημένη ένταση μαγνητικής ροής με αποτέλεσμα να παρουσιάζει βέλτιστη ροπή σε σύγκριση με τον κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης.

- Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες



Σχήμα 2.5, Διατομή υβριδικού βηματικού κινητήρα.

Οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες συνδυάζουν τα θετικά χαρακτηριστικά των κινητήρων μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης και αυτών με μόνιμο μαγνήτη, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και το κόστος τους. Οι υβριδικοί κινητήρες παρέχουν καλύτερη απόδοση στην ανάλυση του βήματος, τη ροπή και την ταχύτητα. Ο δρομέας ενός υβριδικού βηματικού κινητήρα έχει αυλακώσεις, όπως και οι κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης με τη μόνη διαφορά ότι οι πόλοι εναλλάσσονται όχι μόνο περιμετρικά του άξονα, αλλά και κατά μήκος αυτού. Η κατασκευή μοιάζει με γρανάζια τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο οπου κάτω από την εγκοπή του ενός εμφανίζεται «δόντι» του άλλου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρέχεται μια ακόμα καλύτερη πορεία η οποία βοηθά την καθοδήγηση της μαγνητικής ροής σε προτιμώμενες τοποθεσίες στο μαγνητικό διάκενο.

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τύποι κινητήρων είναι οι υβριδικοί και μόνιμου μαγνήτη. Οι σχεδιαστές προτιμούν τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, εκτός εάν η εφαρμογή τους απαιτεί υβριδικούς κινητήρες, δεδομένου ότι το κόστος του μόνιμου μαγνήτη είναι μικρότερο από των υβριδικών.

2.5 Με βάση τη συνδεσμολογία

Οι βηματικοί κινητήρες διακρίνονται επίσης σε δύο κατηγορίες σύμφωνα με τον τρόπο πού είναι συνδεδεμένα τα τυλίγματα τους, σε μονοπολικούς και διπολικούς. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι διφασικοί βηματικοί κινητήρες έχουν δύο τυλίγματα στο στάτη τους που δημιουργούν ηλεκτρομαγνήτη και φορτίζονται εναλλάξ, έτσι ώστε να κινούν διαδοχικά το δρομέα του κινητήρα. Στα τυλίγματα αυτά μπορεί, ανάλογα το είδος του κινητήρα, να διακλαδίζεται ένα ή δύο καλώδια που χωρίζουν το κάθε τύλιγμα στη μέση, περίπου όπως μια μεσαία λήψη ενός μετασχηματιστή.

Μπορούμε σχετικά εύκολα να αναγνωρίσουμε σε ποια κατηγορία ανήκει κάθε κινητήρας παρατηρώντας την καλωδίωσή του. Βηματικοί κινητήρες τεσσάρων καλωδίων ανήκουν στην κατηγορία των διπολικών κινητήρων έχοντας ένα τύλιγμα ανά φάση. Κινητήρες έξι καλωδίων μπορούν να λειτουργήσουν ως διπολικοί αν η μεσαία λήψη δεν χρησιμοποιηθεί (συνδεσμολογία σειράς) ή ως μονοπολικοί με δύο τυλίγματα ανά φάση. Κινητήρες οκτώ καλωδίων επίσης μπορούν να λειτουργήσουν ως διπολικοί σε συνδεσμολογία σειράς ή παράλληλη συνδεσμολογία και ως μονοπολικοί.

Στους κινητήρες αυτούς που ανήκουν στην κατηγορία των μονοπολικών κινητήρων έξι και οκτώ καλωδίων, όταν φορτίζεται το μισό τους τύλιγμα δεν μας δίνουν μεγάλη ροπή στις χαμηλές στροφές, λόγω όμως της μικρής επαγωγικής αντίδρασης, η ροπή αυτή διατηρείται στις υψηλές στροφές. Οι διπολικοί κινητήρες τεσσάρων, έξι και οκτώ καλωδίων μας δίνουν μεγάλη ροπή στις χαμηλές στροφές επειδή όμως η επαγωγική αντίδραση των τυλιγμάτων είναι μεγάλη η ροπή μειώνεται δραματικά στις υψηλές στροφές.

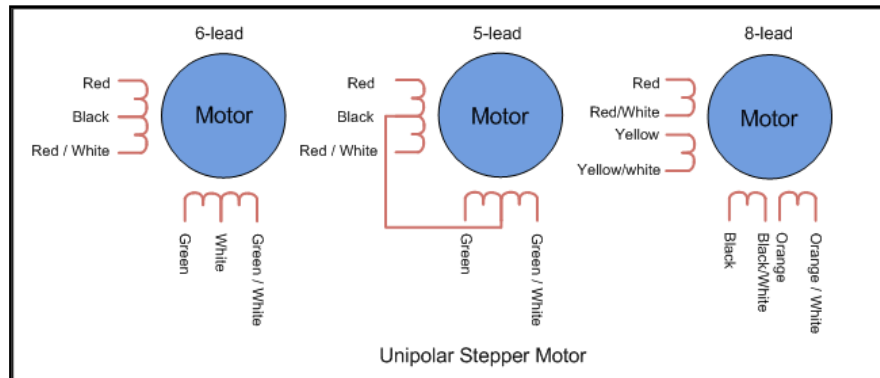
- Μονοπολικοί βηματικοί κινητήρες

Ένας μονοπολικός βηματικός κινητήρας έχει δύο περιελίξεις ανά φάση, μία για κάθε κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Επειδή σε αυτή τη διάταξη ένας μαγνητικός πόλος μπορεί να αντιστραφεί χωρίς την αλλαγή της πολικότητας του ρεύματος, το κύκλωμα ελέγχου μεταγωγής των φάσεων μπορεί να είναι πολύ απλό και να πραγματοποιηθεί ακόμη και με ένα μόνο τρανζίστορ για κάθε τύλιγμα. Συνήθως, σε μία φάση, το ένα άκρο του κάθε τυλίγματος είναι κοινό (μεσαία λήψη) με αποτέλεσμα να υπάρχουν τρία καλώδια ανά φάση και έξι καλώδια συνολικά σε ένα τυπικό κινητήρα δύο φάσεων. Συχνά, τα δύο κοινά καλώδια των δύο φάσεων ενώνονται εσωτερικά και έτσι ο κινητήρας έχει μόνο πέντε καλώδια.

Ο έλεγχος της κίνησης ενός μονοπολικού βηματικού κινητήρα μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός απλού μικροελεγκτή ο οποίος θα ενεργοποιεί τα τρανζίστορ ελέγχου μεταγωγής των φάσεων με τη σωστή σειρά. Ο εύκολος αυτός τρόπος ελέγχου καθιστά τους μονοπολικούς κινητήρες δημοφιλείς στους ερασιτέχνες κατασκευαστές και είναι ίσως ο φθηνότερος τρόπος για την επίτευξη περιστροφικής κίνησης με γωνιακή ακρίβεια .

Για να μπορέσουμε να αναγνωρίσουμε τα καλώδια ενός μονοπολικού βηματικού κινητήρα θα πρέπει να πραγματοποιήσουμε μερικές πειραματικές μετρήσεις. Επιλέγουμε τυχαία ένα ζεύγος καλωδίων και μετράμε την αντίσταση. Αν η αντίσταση είναι άπειρη τότε τα δύο καλώδια δεν ανήκουν στο ίδιο τύλιγμα και έτσι επιλέγουμε άλλο ζεύγος κρατώντας ένα από τα δύο καλώδια που ήδη δοκιμάσαμε. Εάν το πολύμετρο μας δείξει τιμή τότε θα πρέπει να καθορίσουμε αν υπάρχει τιμή μεγαλύτερης αντίστασης από αυτή που μετρήσαμε. Αν η τιμή που μετρήσαμε είναι η μέγιστη τότε τα δύο καλώδια αποτελούν τα άκρα μίας φάσης και ψάχνουμε τη μεσαία λήψη η οποία θα έχει τιμή αντίστασης μειωμένη κατά το μισό.

Ένας εύκολος τρόπος για να καθορίσουμε εάν ένας βηματικός κινητήρας λειτουργεί είναι να βραχυκυκλώσουμε τα ζεύγη των τυλιγμάτων και να περιστρέψουμε τον άξονα. Κάθε φορά που γίνεται αισθητή μια υψηλότερη από το κανονικό αντίσταση κατά την περιστροφή, υποδεικνύεται ότι η συγκεκριμένη περιέλιξη είναι κλειστή και ότι η φάση λειτουργεί.



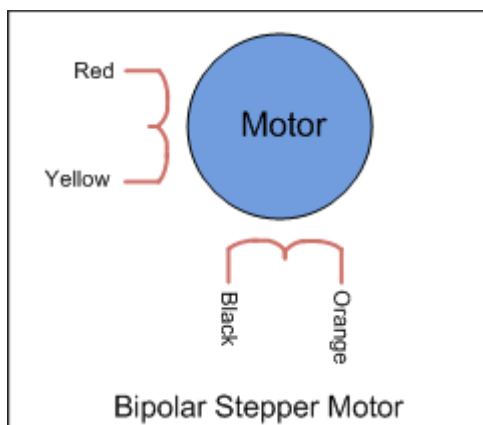
Σχήμα 2.6, Μονοπολικοί κινητήρες 6, 5 και 8 καλωδίων με δύο περιελίξεις ανά φάση.

- Διπολικοί βηματικοί κινητήρες

Οι διπολικοί κινητήρες έχουν ένα τύλιγμα ανά φάση. Το ρεύμα σε ένα τύλιγμα πρέπει να αλλάξει πολικότητα προκειμένου να αντιστραφεί ένας μαγνητικός πόλος, επομένως το κύκλωμα οδήγησης είναι πιο περίπλοκο. Συνήθως γίνεται χρήση μιας ηλεκτρονικής διάταξης που ονομάζεται «γέφυρα Η» και την οποία θα αναλύσουμε σε επόμενο κεφάλαιο. Η κάθε φάση έχει δύο καλώδια τα οποία αποτελούν τα άκρα του τυλίγματος της φάσης.

Επειδή τα τυλίγματα χρησιμοποιούνται ολόκληρα, ο διπολικός κινητήρας είναι πιο ισχυρός από ένα μονοπολικό κινητήρα του ίδιου βάρους. Αυτό οφείλεται στο φυσικό χώρο που καταλαμβάνουν οι περιελίξεις. Ένας μονοπολικός κινητήρας έχει διπλάσιο αριθμό τυλιγμάτων στον ίδιο χώρο, αλλά μόνο το μισό χρησιμοποιείται σε κάθε βήμα με αποτέλεσμα η απόδοσή του να φτάνει το 50% ή να είναι διαθέσιμο το 70% περίπου της παραγόμενης ροπής. Αν και ο έλεγχος ενός διπολικού κινητήρα

είναι πιο περίπλοκος, όσον αφορά την οδήγηση των παλμών, η πληθώρα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων οδήγησης εκμηδενίζουν το πρόβλημα αυτό.



Σχήμα 2.7, Βασική μορφή διπολικού κινητήρα 4 καλωδίων 2 φάσεων.

2.6 Θετικά και αρνητικά των βηματικών κινητήρων

Αν και οι βηματικοί κινητήρες είναι κινητήρες ακριβείας δεν μπορούμε να τους χρησιμοποιήσουμε σε κάθε εφαρμογή. Ως μηχανές παρουσιάζουν κάποια θετικά και κάποια αρνητικά χαρακτηριστικά, πέραν των επιμέρους χαρακτηριστικών τους που τους διακρίνουν στους διάφορους τύπους και κατηγορίες.

Θετικά

1. Η γωνία περιστροφής του κινητήρα είναι ανάλογη με τον παλμό εισόδου.
2. Αν οι περιελίξεις διαρρέονται από ρεύμα, ο κινητήρας έχει μέγιστη ροπή σε ακινησία.
3. Παρέχουν ακριβή θέση και επαναληψιμότητα της κίνησης, επειδή οι βηματικοί κινητήρες έχουν ακρίβεια 3-5% του βήματος και αυτό το σφάλμα δεν λειτουργεί αθροιστικά από το ένα βήμα στο επόμενο.

4. Έχουν άμεση απόκριση κατά την έναρξη, διακοπή και αναστροφή της κίνησής τους.
5. Η απουσία ψηκτρών (καρβουνάκια) στους κινητήρες τους κάνει πολύ αξιόπιστους. Η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται απλά από την διάρκεια ζωής του εδράνου (ρουλεμάν).
6. Η απόκριση των κινητήρων στους ψηφιακούς παλμούς παρέχει έλεγχο ανοικτού βρόχου, καθιστώντας τον έλεγχο του κινητήρα απλό και λιγότερο δαπανηρό.
7. Είναι δυνατόν να επιτευχθεί πολύ χαμηλή ταχύτητα συγχρονισμένης περιστροφής με ένα φορτίο που συνδέεται απευθείας με τον άξονα.
8. Η ταχύτητα περιστροφής μπορεί να ρυθμιστεί εύκολα καθώς ως η ταχύτητα είναι ανάλογη της συχνότητας των παλμών εισόδου.

Αρνητικά

1. Αν ο κινητήρας δεν ελέγχεται σωστά μπορεί να παρουσιάσει δονήσεις και να έχουμε φαινόμενα συντονισμού.
2. Δεν είναι εύκολος ο χειρισμός σε εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες.

2.7 Εφαρμογές Βηματικών Κινητήρων

Οι εφαρμογές που μπορεί να έχουν οι βηματικοί κινητήρες είναι πράγματι πολλές. Αυτό οφείλεται στο χαρακτηριστικό τους γνώρισμα της ακρίβειας της θέσης αλλά και στην ευκολία να ελέγξουμε την θέση αυτή. Η ποικιλία τους όμως σε μέγεθος, ισχύ και κόστος, λόγω και της απλής κατασκευής τους, τους κάνει ιδιαίτερα ανταγωνιστικούς σε σχέση με άλλα είδη κινητήρων.

Έτσι μπορούμε να συναντήσουμε βηματικούς κινητήρες που βρίσκουν εφαρμογή από τον οικιακό εξοπλισμό μέχρι την διαστημική τεχνολογία.

Σε κάθε σπίτι μπορεί να υπάρχει ένας εκτυπωτής ή σαρωτής που κάνουν χρήση ενός βηματικού κινητήρα για την κίνηση των κεφαλών εκτύπωσης ή την κίνηση του αισθητήρα σάρωσης, ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής περιέχει σκληρό δίσκο που για την περιστροφή του κάνει χρήση βηματικού κινητήρα, μία ψηφιακή φωτογραφική μηχανή για την αυτόματη εστίαση του φακού (focus) ή την μεγέθυνση και τη σμίκρυνση (zoom in/out) ή ένα κλιματιστικό για την κίνηση των περσίδων κατεύθυνσης του αέρα. Όλες αυτές οι οικιακές συσκευές περιέχουν ένα βηματικό κινητήρα που πραγματοποιεί μια διαφορετική λειτουργία για την κάθε μία.

Στα συστήματα ασφαλείας οι βηματικοί κινητήρες βρίσκουν εφαρμογή στον έλεγχο και την περιστροφή των καμερών.

Στη βιομηχανία οι βηματικοί κινητήρες έχουν τεράστια εφαρμογή σε προγραμματιζόμενα και αυτοματοποιημένα συστήματα κοπής, χάραξης και λείανσης όπως μηχανήματα κοπής με laser ή υδροκοπή, μηχανήματα CNC και τόνους. Η χρήση τους σε μηχανήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης και σε ρομποτικά συστήματα θεωρείται αναγκαία.

Στην ιατρική οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται για την κίνηση των ιατρικών σαρωτών όπως οι αξονικοί τομογράφοι, σε μηχανήματα δειγματοληψίας καθώς επίσης γίνεται χρήση τους στην ψηφιακή οδοντιατρική φωτογραφία, σε ιατρικές αντλίες, σε αναπνευστήρες και μηχανήματα ανάλυσης αίματος.

Η χρήση των βηματικών κινητήρων, διευκόλυνε και την αεροδιαστημική, με περιστροφικά εργαλεία που οι κινητήρες τους πρέπει να μην παράγουν σπινθήρες για λόγους ασφαλείας.

Τέλος οι βηματικοί κινητήρες βρίσκουν εφαρμογή και στην άμυνα, σε τηλεκατευθυνόμενα ρομποτικά συστήματα ώστε να αποφεύγεται η έκθεση του προσωπικού σε κίνδυνο.

2.8 Ο βηματικός κινητήρας της κατασκευής

Πρόκειται για ένα διπολικό, υβριδικό βηματικό κινητήρα τεσσάρων καλωδίων. Ο βηματισμός του κινητήρα είναι $0,9 \pm 5\%$ μοίρες δηλαδή σε ένα πλήρη κύκλο:

$$\frac{360^\circ}{0,9^\circ} = 400 \text{ βήματα}$$

Τα δύο τυλίγματα του κινητήρα έχουν ονομαστική ωμική αντίσταση $1,8 \pm 10\%$ Ohm/φάση και επαγωγική αντίδραση $2,8 \pm 20\%$ mH/φάση με ονομαστική ένταση ρεύματος 1,7A ενώ οι απολήξεις τους έχουν χρώματα μαύρο-πράσινο και κόκκινο-μπλε αντίστοιχα. Η ελάχιστη ροπή που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι 0,48 Nm ενώ η ροπή αυτοσυγκράτησης (τα τυλίγματα δεν διαρρέονται από ρεύμα) είναι 0,022 Nm. Ο κατασκευαστής δεν δίνει τον αριθμό των στροφών όμως μπορούμε να τον υπολογίσουμε ως εξής:

Το ρεύμα στο πηνίο είναι ανάλογο με το χρόνο που έχει εφαρμοστεί η τάση, και αντιστρόφως ανάλογο με την επαγωγή. Δηλαδή:

$$I = \left(V \cdot \frac{1}{L} \right) t$$

$$I = \frac{V \cdot t}{L}$$

Λύνοντας ως προς το χρόνο t έχουμε

$$t = \frac{I \cdot L}{V} \quad (1)$$

Για ένα βήμα το ρεύμα πρέπει να πάει από το 0 έως το I_{\max} και πίσω στο 0, επομένως

$$I = 2 \cdot I_{\max} \quad (2)$$

$$(1) \rightarrow (2) \quad t = \frac{2 \cdot I_{max} \cdot L}{V}$$

Όπου t ο χρόνος (σε second) σε ένα βήμα. Για να υπολογίσουμε τις μέγιστες στροφές ανά λεπτό διαιρούμε το αντίστροφο του χρόνου ανά βήμα προς τα βήματα ανά περιστροφή και πολλαπλασιάζουμε με 60.

$$r.p.m = 60 \cdot \frac{V}{2 \cdot I_{max} \cdot L} / \text{βήματα/περιστροφή}$$

Επομένως για τον βηματικό κινητήρα της κατασκευής έχουμε:

$$r.p.m = 60 \cdot \frac{3,06}{2 \cdot 1,7 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3}} / 400$$

$$r.p.m = 60 \cdot 321,43 / 400$$

$$r.p.m = 48,21$$

Αν και η ονομαστική τάση λειτουργίας του κινητήρα είναι 3,06 V η τάση τροφοδοσίας του στην κατασκευή θα είναι 12V. Αυτό συνηθίζεται στους βηματικούς κινητήρες όταν θέλουμε να πετύχουμε μεγαλύτερη ανάλυση βήματος. Αυτό που πρέπει να προσέξουμε είναι το ρεύμα τροφοδοσίας να μην ξεπερνά το ονομαστικό γιατί διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος να καταστρέψουμε τον κινητήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Έλεγχος Βηματικού Κινητήρα

Από τον τρόπο κατασκευής των βηματικών κινητήρων γίνεται κατανοητό ότι για κάθε είδος κινητήρα μπορεί να χρειάζεται διαφορετική μέθοδος για τον έλεγχό του. Όπως αναφέραμε οι βηματικοί κινητήρες τροφοδοτούνται με παλμούς όπου κάθε παλμός αντιστοιχεί σε ένα βήμα. Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα εξαρτάται από τη συχνότητα των παλμών. Ο τρόπος που οι παλμοί αυτοί θα φτάσουν στα τυλίγματα του κινητήρα εξαρτάται από το είδος του κινητήρα ενώ ο έλεγχος της διεύθυνσης περιστροφής εξαρτάται από τη διαδοχή των ενεργοποιημένων φάσεων.

3.1 Παλμοδότηση

Αρχικά το πρώτο πράγμα που θα πρέπει να σκεφτούμε είναι ο τρόπος που θα δημιουργήσουμε τους παλμούς οι οποίοι θα οδηγούν το κύκλωμα ελέγχου του βηματικού κινητήρα. Υπάρχουν μερικές δεκάδες τρόποι για να δημιουργήσουμε ηλεκτρικούς παλμούς μέσω διαφόρων ηλεκτρονικών στοιχείων. Για να μπορέσουμε να ξεκαθαρίσουμε ποιόν από όλους θα χρησιμοποιήσουμε θα πρέπει να θέσουμε κάποιες προδιαγραφές. Ο παλμός ως προς την τάση που θέλουμε να τροφοδοτήσουμε στο κύκλωμά μας θα πρέπει να είναι τετραγωνικής μορφής ώστε να συγκρατεί το δρομέα χωρίς να μειώνει τη ροπή του μέχρι τον επόμενο παλμό. Εναλλακτικά μπορεί ο παλμός ως προς το ρεύμα να είναι τριγωνικής μορφής ώστε να μπορούμε να ελέγξουμε την θέση του δρομέα ανάμεσα σε κάθε βήμα. Επίσης ως προς την τάση θα πρέπει να έχει το ίδιο πλάτος σε κάθε περίοδο του. Δηλαδή σε κάθε περίοδο T , η χρονική διάρκεια ενεργοποίησης του παλμού t_{on} να είναι ίδια σε κάθε περίοδο όπως

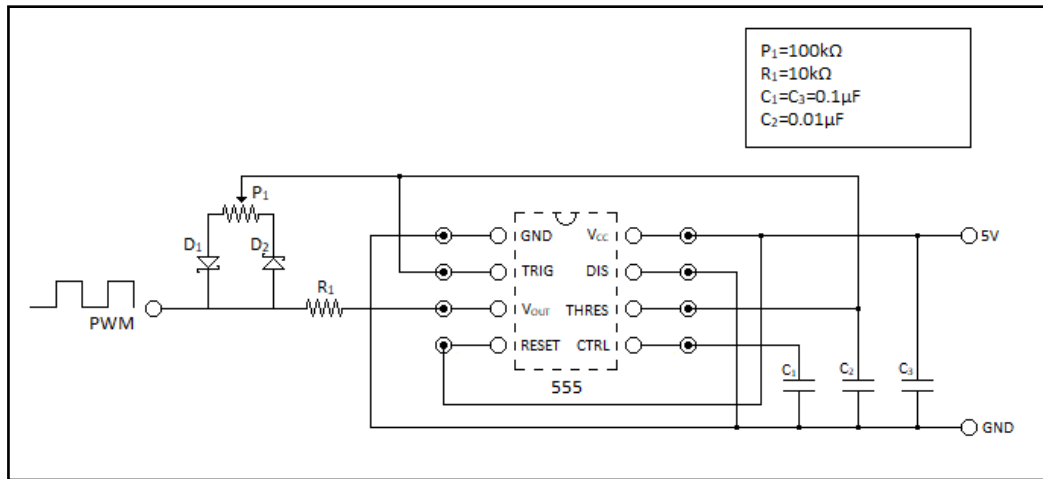
επίσης και η χρονική διάρκεια παύσης του παλμού t_{off} . Η διάρκειες των χρόνων t_{on} και t_{off} δεν είναι απαραίτητο να ταυτίζονται μεταξύ τους αλλά είναι απαραίτητο να είναι ίδιες σε κάθε περίοδο κατ' αντιστοιχία. Η συχνότητα των παλμών δεν είναι απαραίτητο να μεταβάλλεται όταν θέλουμε να έχουμε σταθερές στροφές στον κινητήρα, αντίθετα θα πρέπει να μπορούμε να ελέγχουμε τη συχνότητα όταν θέλουμε να ελέγχουμε και την ταχύτητα του κινητήρα.

Υπό αυτές τις προϋποθέσεις περιορίζουμε αρκετά τον μεγάλο αριθμό των κυκλωμάτων που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ώστε να παράγουμε παλμούς. Γενικά τα κυκλώματα που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ένα παλμό μεταβαλλόμενου εύρους (Pulse Width Modulator).

Οι παλμοί λοιπόν μπορεί να τροφοδοτούνται με κάποια παλμογεννήτρια του εμπορίου με την οποία μπορούμε εύκολα να ρυθμίζουμε και τη συχνότητα, με κάποιο απλό ηλεκτρονικό κύκλωμα που μπορούμε να κατασκευάσουμε και με το οποίο μπορούμε μηχανικά με κάποιο ποτενσιόμετρο να ελέγξουμε τη συχνότητα είτε με χρήση κάποιου μικροεπεξεργαστή που θα προγραμματίσουμε.

Ένα παράδειγμα απλού κυκλώματος που μπορούμε να κατασκευάσουμε φαίνεται παρακάτω, όπου κάνουμε χρήση ενός ολοκληρωμένου 555 timer.

Τη χρήση μικροεπεξεργαστή θα τη δούμε παρακάτω αφού μας δίνει περισσότερες δυνατότητες και γίνεται χρήση αυτής της μεθόδου στην κατασκευή.



Σχήμα 3.1, Απλό κύκλωμα παλμοδότησης με το ολοκληρωμένο 555.

3.2 Διαδοχή παλμών τροφοδοσίας

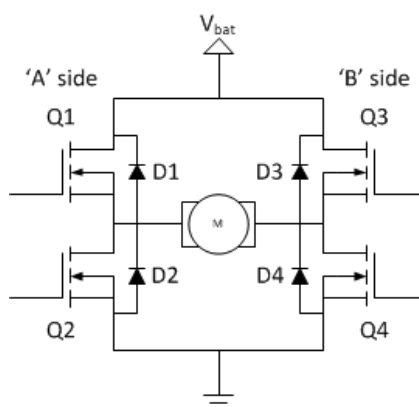
Η διαδοχή των παλμών στον κινητήρα είναι αυτή που καθορίζει την φορά περιστροφής του άξονα άλλα είναι και το χαρακτηριστικό στοιχείο το οποίο διαφέρει ανάλογα με το είδος του κινητήρα ως προς τα τυλίγματα.

Όπως ήδη αναφέραμε οι μονοπολικό βηματικοί κινητήρες είναι πιο εύκολο να ελεγχθούν καθώς τα τυλίγματά τους εναλλάσσονται μαγνητικά από πόλο σε πόλο. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε βήμα το ρεύμα είναι ίδιας πολικότητας. Εάν θεωρήσουμε ένα κύκλο τεσσάρων βημάτων τα τέσσερα αυτά βήματα θα τροφοδοτούνται διαδοχικά με ρεύμα ίδιας πολικότητας με την προηγούμενη.

Αντίθετα στους διπολικούς κινητήρες σε ένα κύκλο τεσσάρων βημάτων τα δύο πρώτα βήματα τροφοδοτούνται με ρεύμα ίδιας πολικότητας, ενώ τα δύο επόμενα τροφοδοτούνται με ρεύμα αντίθετης πολικότητας.

Για τον έλεγχο των παλμών και κατ' επέκταση της διεύθυνσης περιστροφής σε ένα βηματικό κινητήρα απαιτείται ένα επιπλέον ηλεκτρονικό στοιχείο, η γέφυρα "H". Η γέφυρα αυτή αποτελείται από τέσσερα διακοπτικά στοιχεία (τρανζίστορ, MOSFET) και τέσσερις διόδους που σε κάθε παλμό εναλλάσσουν την πολικότητα

του ρεύματος. Στο κέντρο είναι συνδεδεμένο το φορτίο σε μια διάταξη που θυμίζει το γράμμα “H”, εξ’ ου και το όνομα (Σχήμα 3.2). Μία γέφυρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε τύλιγμα επομένως χρειάζονται δύο γέφυρες για ένα διπολικό κινητήρα τεσσάρων καλωδίων.



Σχήμα 3.2, Γέφυρα “H”.

Η βασική λειτουργία της γέφυρας είναι σχετικά απλή. Αν τα στοιχεία Q_1 και Q_4 είναι ενεργοποιημένα η αριστερή πλευρά του φορτίου είναι συνδεδεμένη στην πηγή τροφοδοσίας ενώ η δεξιά πλευρά είναι συνδεδεμένη στη γείωση. Αν τα στοιχεία Q_2 και Q_3 είναι ενεργοποιημένα τότε η δεξιά πλευρά του φορτίου είναι συνδεδεμένη στην πηγή και η αριστερή πλευρά είναι συνδεδεμένη στη γείωση.

Εξαιρετική προσοχή απαιτείται κατά την ενεργοποίηση των στοιχείων και την μετάβαση στις καταστάσεις γιατί σε περίπτωση που ενεργοποιηθούν τα στοιχεία Q_1 και Q_2 ή τα στοιχεία Q_3 και Q_4 , ταυτόχρονα, προκαλείται βραχυκύκλωμα της πηγής που μπορεί να καταστρέψει τη γέφυρα ή κάποιο άλλο στοιχείο του κυκλώματος.

Στην πραγματικότητα τα διακοπτικά αυτά στοιχεία δεν μπορούν να ενεργοποιούνται άμεσα, κάποια ενεργοποιούνται νωρίτερα, κάποια αργότερα. Για να διασφαλίσουμε λοιπόν ότι μόνο τα επιτρεπτά ζεύγη ενεργοποιούνται ταυτόχρονα γίνεται χρήση των διόδων που εξασφαλίζουν την διέλευση του ρεύματος από τα σωστά σημεία.

3.3 Έλεγχος ταχύτητας βηματικού κινητήρα

Οι βηματικοί κινητήρες όπως αναφέραμε διαφέρουν από τους συμβατικούς κινητήρες DC. Ο έλεγχος της παλμοδότησης, ο έλεγχος της κατεύθυνσης γίνονται με ηλεκτρονικά μέσα και όχι απευθείας από κάποια πηγή. Επομένως φαίνεται πολύ λογικό ο έλεγχος της ταχύτητας του βηματικού κινητήρα να πραγματοποιείται με έλεγχο της συχνότητας των παλμών. Η συχνότητα αυτή θα πρέπει να υπολογίζεται και να μην ξεπερνάει την συχνότητα που προκύπτει από τον υπολογισμό της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Έχοντας ως παράδειγμα τον κινητήρα της κατασκευής:

Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα $\rightarrow 48,21 \text{ r. p. m}$

Μία περιστροφή πραγματοποιείται σε χρόνο $\rightarrow t_r = \frac{60}{48,21} = 1,24455 \text{ sec}$

Ένα βήμα πραγματοποιείται σε χρόνο $\rightarrow t_s = \frac{1,24455}{400} = 0,00311 \text{ sec}$

Επομένως η συχνότητα των παλμών δεν μπορεί να είναι μικρότερη από:

$$f_p = \frac{1}{0,00311} = 321,5434 \text{ Hz}$$

Ο τρόπος με τον οποίο θα ελέγξουμε τη συχνότητα και κατ' επέκταση την ταχύτητα του κινητήρα εξαρτάται από τον τρόπο παλμοδότησής του. Αν για παράδειγμα η παλμοδότηση γίνεται μέσω ενός ολοκληρωμένου 555 θα πρέπει να έχουμε κάποιον μηχανικό έλεγχο της συχνότητας (ποτενσιόμετρο) ενώ αν γίνεται χρήση κάποιου μικροεπεξεργαστή ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μηχανικά είτε προγραμματιστικά.

Σε κάθε περίπτωση ο χρόνος του παλμού και της παύσης του παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια και την ομαλή κίνηση του άξονα γι' αυτό σε πολλές περιπτώσεις γίνεται χρήση της μεθόδου διαμόρφωσης εύρους παλμού (P.W.M). Η μέθοδος αυτή

παράγει στην έξοδο ένα ψηφιακό σήμα, ένα παλμό ο οποίος επαναλαμβάνεται σε κάθε περίοδο. Ο χρόνος διάρκειας του παλμού (t_{on}) αλλά και ο χρόνος παύσης (t_{off}) μπορούν να ελεγχθούν από το χειριστή. Το αποτέλεσμα, πέρα από την μεταβολή του χρόνου διάρκειας και παύσης, είναι ότι μπορεί να ελεγχθεί και η τάση εξόδου και γι' αυτό η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται και για τον έλεγχο και άλλων κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

3.4 Οδηγοί ελέγχου

Μέχρι στιγμής ο έλεγχος ενός βηματικού κινητήρα φαίνεται ίσως περίπλοκος αν θέλουμε να ελέγχουμε την φορά περιστροφής του και την ταχύτητά του, όμως η αγορά προσφέρει και έτοιμες λύσεις όπως οι οδηγοί ελέγχου. Πρόκειται για ηλεκτρονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα που συνδυάζουν όλα τα παραπάνω ηλεκτρονικά εξαρτήματα που είναι απαραίτητα για τον έλεγχο ενός κινητήρα. Μπορεί να ξεκινούν από χαμηλά κόστη έχοντας την μορφή ενός απλού ολοκληρωμένου που περιέχει έως και τέσσερις γέφυρες “H” και όσο αυξάνεται η τιμή τους μπορεί να προσφέρουν έλεγχο ταχύτητας, υποστήριξη μεγαλύτερων ή και διαφορετικών κινητήρων, ακόμη και ανάδραση για τη σωστή λειτουργία του ολοκληρωμένου. Εκεί όμως που υπερισχύουν έναντι άλλων χειροποίητων κατασκευών είναι ότι προσφέρουν ακόμα μία τεχνική ελέγχου που προσδίδει ένα ακόμα στοιχείο στη ακρίβεια και τον τρόπο λειτουργίας του βηματικού κινητήρα.

3.5 Μικροβηματισμός (Microstepping)

Ο μικροβηματισμός ενός βηματικού κινητήρα είναι μία τεχνική κατά την οποία ο κινητήρας μπορεί να πραγματοποιήσει λιγότερο από ένα βήμα. Ένα ολόκληρο βήμα (full step) μπορεί να διαιρεθεί σε πολλά μικρότερα βήματα δίνοντας την δυνατότητα στον άξονα να κινηθεί σε μικρότερα διαστήματα. Για παράδειγμα ένας κινητήρας με βήμα $0,9^\circ$ μπορεί με την τεχνική του μικροβηματισμού να πραγματοποιήσει βήματα μεγαλύτερης ανάλυσης έως και $0,003^\circ$. Έτσι αν ο κινητήρας ολοκληρώνει ένα κύκλο πραγματοποιώντας 400 βήματα, στο μισό βήμα (half step) πραγματοποιεί 800 βήματα και για μικροβηματισμούς (microstepping) $1/4$, $1/8$, $1/16$, $1/32$ του βήματος, πραγματοποιεί 1600, 3200, 6400 και 12800 βήματα σε ένα κύκλο αντίστοιχα. Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνεται με χρήση συνδυασμού παλμών μικρότερων ρευμάτων από τον παλμό ρεύματος που χρησιμοποιείται σε ένα πλήρες βήμα. Έτσι εφαρμόζονται κάθε φορά δύο παλμοί, ένας σε κάθε τύλιγμα οι οποίοι έχουν διαφορετικά μεγέθη μεταξύ τους. Αρχικά ο ένας παλμός είναι πολύ κοντά στην τιμή του ρεύματος πλήρους βήματος ενώ ο άλλος πλησιάζει την τιμή μηδέν. Ο κάθε παλμός μεταβάλλεται ανάλογα με την ανάλυση του βήματος μέχρι να καλυφθεί απόσταση ίση με την απόσταση που θα κάλυπτε ο κινητήρας αν πραγματοποιούσε ένα πλήρες βήμα. Δηλαδή όσο ο ένας παλμός μειώνεται ο άλλος αυξάνεται σταδιακά μέχρι την ολοκλήρωση ενός βήματος (full step). Η χρήση ολοκληρωμένων στη μέθοδο αυτή είναι απαραίτητη καθώς η ένταση των ρευμάτων των παλμών υπολογίζεται από αλγόριθμους.

Η χρήση της τεχνικής μικροβηματισμού προσφέρει στις εφαρμογές μειωμένο μηχανικό θόρυβο, ομαλότερη κίνηση του άξονα περιστροφής μεταξύ των βημάτων και λιγότερες μηχανικές δονήσεις

Το αρνητικό στην περίπτωση χρήσης του μικροβηματισμού είναι ότι παρόλο που η ανάλυση του βήματος αυξάνεται στην πραγματικότητα η ακρίβεια της κίνησης του κινητήρα δεν αυξάνεται σημαντικά. Επίσης λόγω των διαφορετικών εντάσεων των παλμών που εφαρμόζονται στα άκρα κάθε τυλίγματος, όσο αυξάνεται η ανάλυση του μικροβηματισμού μειώνεται η σταδιακή ροπή του άξονα σε περίοδο ενός πλήρους βήματος.

Σε κάθε περίπτωση μπορούμε να υπολογίσουμε την ροπή του άξονα (χωρίς φορτίο) για ένα μικροβηματισμό από τον τύπο:

$$T_N = T_{HFS} \cdot \eta \mu[(90^\circ \cdot N) / \mu_{PFS}]$$

Η την συνολική ροπή για του κινητήρα από τον τύπο:

$$T_{INC} = T_{HFS} \cdot \eta \mu\left(\frac{90^\circ}{\mu_{PFS}}\right)$$

Όπου

- T_N → ροπή στον άξονα για N μικροβηματισμούς (Nm)
- T_{INC} → ροπή στον άξονα για ένα μικροβηματισμό (Nm)
- T_{HFS} → ροπή συγκράτησης πλήρους βήματος (Nm)
- N → αριθμός μικροβημάτων που έχουν πραγματοποιηθεί
- μ_{PFS} → σύνολο μικροβημάτων σε ένα πλήρες βήμα

3.6 Για την κατασκευή

Στην κατασκευή έγινε χρήση του ολοκληρωμένου DRV8825 το οποίο προσφέρει έλεγχο ενός διπολικού βηματικού κινητήρα τεσσάρων καλωδίων με άμεση διασύνδεση σε μικροεπεξεργαστή. Διαθέτει έντεκα εισόδους εκ των οποίων τρεις είναι για την ενεργοποίηση, επανεκκίνηση και παύση της συσκευής, δύο για την

παλμοδότηση των βημάτων και την διεύθυνση περιστροφής του άξονα, δύο για την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα και τη γείωση, μία για την γείωση του ολοκληρωμένου και τρείς ψηφιακές των οποίων η κατάσταση (λογικό μηδέν ή λογικό ένα) δίνουν την λειτουργία μικροβηματισμού στην οποία θα λειτουργήσει ο κινητήρας. Επίσης διαθέτει και πέντε εξόδους, τέσσερις για τα άκρα των τυλιγμάτων των φάσεων του κινητήρα και μία για ανάδραση σωστής λειτουργίας του ολοκληρωμένου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μικροεπεξεργαστές

Οι μικροεπεξεργαστές είναι ηλεκτρονικές συσκευές, προγραμματιζόμενες ή μη, που διαθέτουν ψηφιακές και αναλογικές εισόδους και εξόδους και αναλαμβάνουν να διεκπεραιώσουν μία ή περισσότερες εργασίες.

Η χρήση προγραμματιζόμενων μικροεπεξεργαστών αποτελεί σημαντικό στοιχείο στον έλεγχο των ηλεκτροκινητήρων και ιδιαίτερα των βηματικών. Η χρήση τους διευκολύνει το χειρισμό αλλά προσφέρει και μια πληθώρα άλλων λειτουργιών όπως είναι η ανάδραση με το χρήστη. Αυτό φυσικά προϋποθέτει τη χρήση οπτικών ή ακουστικών μέσων τα οποία θα είναι συνδεδεμένα στις εξόδους του μικροεπεξεργαστή. Ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών εξαρτάται κάθε φορά από τις εισόδους/εξόδους του επεξεργαστή αλλά και από το πρωτόκολλο επικοινωνίας της συσκευής με τον επεξεργαστή.

Οι προγραμματιζόμενοι μικροεπεξεργαστές διατίθενται σε μεγάλη ποικιλία στο εμπόριο και το κόστος είναι συνήθως ανάλογο του αριθμού εισόδων/εξόδων τους. Επίσης σε μεγάλη ποικιλία υπάρχουν και τα προγράμματα με τα οποία μπορούν να προγραμματιστούν καθώς καλύπτουν όλα γνωστικά επίπεδα, προγραμματισμός σε γλώσσα μηχανής (assembly) μέχρι γλώσσες τρίτου επιπέδου (C#, C++) με δυνατότητες εντοπισμού και διόρθωσης σφαλμάτων (debugging).

Η εξέλιξη των μικροεπεξεργαστών, των μεταγλωττιστών, όπως ονομάζονται τα λειτουργικά με τα οποία προγραμματίζεται ένας επεξεργαστής, αλλά και των γλωσσών προγραμματισμού ίσως αποτελέσει το μέλλον για τον έλεγχο των βηματικών κινητήρων αλλά και άλλων ηλεκτρικών μηχανών.

4.1 Άμεσος έλεγχος

Ο χειρισμός ενός βηματικού κινητήρα άμεσα με χρήση ενός επεξεργαστή προσφέρει ευκολίες, όμως θα πρέπει να αναφέρουμε κάποια χαρακτηριστικά τα οποία θα πρέπει να προσέξουμε τόσο στη σύνδεση όσο και στον έλεγχο του κινητήρα.

Η τάση τροφοδοσίας είναι ένα από τα πράγματα που αρχικά θα πρέπει να μας απασχολήσει καθώς η τάση λειτουργίας των περισσότερων μικροεπεξεργαστών είναι στα 5V. Επομένως οι κινητήρες οι οποίοι μπορούμε να ελέγχουμε είναι μικρής ισχύος, ωστόσο αυτό δεν σημαίνει ότι δεν μπορούμε να ελέγξουμε και μεγάλης ισχύος κινητήρες κάνοντας χρήση ενδιάμεσων στοιχείων.

Ο αριθμός των εισόδων/εξόδων θα πρέπει να είναι αντίστοιχος ή και μεγαλύτερος από τον αριθμό των καλωδίων του βηματικού κινητήρα που θέλουμε να ελέγξουμε.

Μεγαλύτερη προσοχή όμως θα πρέπει να δώσουμε αν θέλουμε να ελέγξουμε έναν βηματικό κινητήρα με την τεχνική του μικροβηματισμού. Επειδή οι μικροεπεξεργαστές είναι ψηφιακές συσκευές και αυτή η τεχνική απαιτεί αναλογικές εντάσεις, διαφορετικές κάθε φορά σε κάθε μικροβήμα θα πρέπει ο μικροεπεξεργαστής που θα επιλέξουμε να διαθέτει αρκετή μνήμη ώστε να μπορούμε να προγραμματίσουμε τους μεγάλους και πολύπλοκους αλγόριθμους που απαιτούνται για να προσομοιώσουν αυτό το αποτέλεσμα.

4.2 Σύνδεση με τον Οδηγό

Η σύνδεση ενός μικροεπεξεργαστή με τον οδηγό κίνησης ενός βηματικού κινητήρα είναι μια απλή διαδικασία αφού οι περισσότεροι οδηγοί προσφέρουν άμεση διεπαφή με ψηφιακά μέσα. Ο έλεγχος τους και κατ' επέκταση ο έλεγχος του κινητήρα μπορεί να πραγματοποιηθεί με ψηφιακά σήματα απευθείας από τον μικροεπεξεργαστή. Αυτό που πρέπει να προσέξουμε είναι τα σήματα αυτά να είναι «καθαρά», δηλαδή όποια σήματα προς ή από τον επεξεργαστή να «καθαρίζονται» με χρήση φίλτρων. Τη δουλειά αυτή αναλαμβάνουν να πραγματοποιήσουν οι πυκνωτές. Τυχόν παρεμβολές μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την ακούσια κίνηση του κινητήρα, ακόμα και στιγμιαία αλλαγή κατεύθυνσης.

Η μέθοδος του μικροβηματισμού επιτυγχάνεται με προεπιλεγμένες λογικές καταστάσεις. Ο οδηγός διαθέτει τρεις εισόδους γι' αυτό το σκοπό. Έτσι μπορούμε να προγραμματίσουμε τρεις εξόδους του επεξεργαστή που θα μας δίνουν κάθε δυνατό συνδυασμό. Για παράδειγμα σε έναν οδηγό το πλήρες βήμα μεταφράζεται σε τρεις λογικές καταστάσεις "0".

Κατάσταση M0	Κατάσταση M1	Κατάσταση M2	Μικροβηματισμός
Low	Low	Low	Full Step
High	Low	Low	Half Step
Low	High	Low	1/4 Step
High	High	Low	1/8 Step
Low	Low	High	1/16 Step
High	High	High	1/32 Step

Σχήμα 3.1, Καταστάσεις λειτουργίας ανάλυσης βήματος οδηγού βηματικού κινητήρα.

Η κίνηση του κινητήρα απαιτεί τη χρήση μιας εξόδου του μικροεπεξεργαστή η οποία θα μεταβαίνει από λογικό “0” σε λογικό “1”.

Η κατεύθυνση του κινητήρα απαιτεί επίσης μια έξοδο του μικροεπεξεργαστή της οποίας η κατάσταση θα καθορίζει την αριστερόστροφη ή δεξιόστροφη φορά του άξονα.

Τέλος κάποιοι οδηγοί διαθέτουν επιπλέον λειτουργίες όπως αυτή της ανάδρασης για την ενημέρωση του χρήστη. Συνήθως καταλαμβάνουν μία μόνο είσοδο στον επεξεργαστή και δίνουν δύο λογικές καταστάσεις μία για τη λειτουργία του οδηγού (συνήθως λογικό “1”) και μία σε περίπτωση σφάλματος του οδηγού (συνήθως λογικό “0”).

4.3 Προγραμματισμός μικροεπεξεργαστή

Ο προγραμματισμός του μικροεπεξεργαστή γίνεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Εκεί πρέπει να βρίσκεται εγκατεστημένο το πρόγραμμα διασύνδεσης που θα εντοπίσει τη συσκευή προγραμματισμού καθώς επίσης και το λειτουργικό στο οποίο θα προγραμματιστεί ο επεξεργαστής.

Παλαιότερα η διασύνδεση γίνονταν μέσω σειριακής θύρας. Πλέον η διασύνδεση των περισσότερων συσκευών γίνεται μέσω θύρας USB.

Τα προγράμματα που μπορούν να προγραμματίσουν τον επεξεργαστή είναι πολλά και είναι στο χέρι του κατασκευαστή για το ποιο θα επιλέξει. Ενδεικτικά αναφέρουμε μερικά όπως WinAVR, Arduino Sketch, SPE, Atmel Studio τα οποία χρησιμοποιούνται για πολλούς διαφορετικούς μικροεπεξεργαστές με δυνατότητες χρήσης πολλών διαφορετικών προγραμματιστικών γλωσσών.

Η κάθε γλώσσα προγραμματισμού έχει διαφορετικές εντολές και σύνταξη όμως με χρήση των παραπάνω προγραμμάτων υπάρχει η δυνατότητα να προγραμματίσουμε έναν μικροεπεξεργαστή σε διαφορετικές γλώσσες. Για το λόγο αυτό τα παραπάνω προγράμματα ονομάζονται και μεταγλωττιστές αφού στην πραγματικότητα αναλαμβάνουν να μεταφράσουν τον γραμμένο κώδικα σε γλώσσα μηχανής.

4.4 Για την κατασκευή

Για την κατασκευή χρησιμοποιήσαμε τον επεξεργαστή ATMega16 της ATMEL που μας παρέχει συνολικά 32 εισόδους/εξόδους και την πλακέτα προγραμματισμού της ίδιας εταιρίας STK-500 για τον προγραμματισμό του. Το λειτουργικό για τον προγραμματισμό είναι το CVAVR και το ATMEL Studio 7 ενώ η γλώσσα που χρησιμοποιήσαμε είναι C.

Ο στόχος της κατασκευής είναι η δημιουργία ενός συστήματος ελέγχου κινητήρα το οποίο ελέγχεται με έναν περιστροφικό κωδικοποιητή και περιλαμβάνει οπτικά μέσα για την ενημέρωση του χρήστη. Το σύστημα θα αξιοποιεί τις δυνατότητες ενός βηματικού κινητήρα που ελέγχεται με μικροεπεξεργαστή και οδηγό με τον καλύτερο δυνατό τρόπο παρουσιάζοντάς τις στο χρήστη υπό τη μορφή μενού στην οθόνη του συστήματος. Ο χρήστης θα μπορεί να επιλέξει ποια από αυτές τις δυνατότητες θέλει να πραγματοποιήσει και επιλέγοντας τη θα μπορεί να δει το αποτέλεσμα στον βηματικό κινητήρα της κατασκευής.

Το σύστημα έχει εκπαιδευτικό χαρακτήρα με σκοπό να επιδείξει τις δυνατότητες που έχει η χρήση βηματικών κινητήρων και ο έλεγχός τους από μικροεπεξεργαστές.

Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκαν προγραμματιστικά τρία προεπιλεγμένα μενού που διαχωρίζουν τρεις μεγάλες κατηγορίες χρήσης ενός βηματικού κινητήρα.

4.4.1 Προεπιλεγμένες λειτουργίες

1. Μενού αυτόματων λειτουργιών

Σε αυτό το μενού ο χρήστης μπορεί να επιλέξει απλές αυτοματοποιημένες κινήσεις του άξονα που περιλαμβάνουν αριστερόστροφη κίνηση, δεξιόστροφη κίνηση και έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής.

2. Μενού χειροκίνητης λειτουργίας

Σε αυτό το μενού ο χρήστης μπορεί να κινήσει τον άξονα του κινητήρα περιστρέφοντας απλώς τον περιστρεφόμενο κωδικοποιητή η κατεύθυνση του άξονα ακολουθεί εκείνη του κωδικοποιητή.

3. Μενού προγραμματιζόμενης λειτουργίας

Εδώ δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει πόσα βήματα θα πραγματοποιήσει ο κινητήρας και προς ποια κατεύθυνση. Ο μόνος περιορισμός είναι ότι σε κάθε αλλαγή κατεύθυνσης ο κινητήρας μπορεί να πραγματοποιήσει αριθμό βημάτων ίσο με τον αριθμό βημάτων μιας πλήρους περιστροφής στη μέγιστη ανάλυση. Δηλαδή στον κινητήρα 400 βημάτων όπου η μέγιστη ανάλυση του οδηγού φτάνει το 1/32 ο συνολικός αριθμός βημάτων που μπορούν να πραγματοποιηθούν είναι 12800 μικροβήματα ανεξάρτητα από την ανάλυση.

Σε όλες τις περιπτώσεις δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει ανάλυση βήματος.

Επιπρόσθετα χαρακτηριστικά του συστήματος αποτελούν η κατασκευή πλακέτας στην οποία θα εδρεύει ο μικροεπεξεργαστής και θα δίνεται η δυνατότητα περαιτέρω προγραμματισμού, διακόπτες λειτουργίας στο εμπρός και το πίσω μέρος της κατασκευής, κουμπί ασφαλείας και επαναφοράς του συστήματος, ρύθμιση φωτεινότητας και αντίθεσης χρωματισμού της οθόνης.

Παρακάτω δίνεται ολόκληρος ο κώδικας προγραμματισμού της κατασκευής.

4.4.2 Κώδικας

/******

This program was produced by the
CodeWizardAVR V2.05.0 Professional
Automatic Program Generator
© Copyright 1998-2010 Pavel Haiduc, HP InfoTech s.r.l.
<http://www.hpinfotech.com>

Project : STEPPER MOTOR CONTROLLER

Version : 1.3.52

Date : 2/3/2017

Author : Αριστείδης Μπαρτζής

Company :

Comments: Μελέτη μεθόδων ελέγχου κίνησης και προεπιλεγμένων λειτουργιών βηματικού κινητήρα με χρήση μικροεπεξεργαστή

Chip type : ATmega16

Program type : Application

AVR Core Clock frequency: 8,000000 MHz

Memory model : Small


```

External RAM size    : 0

Data Stack size     : 512

*****/

#include <mega16.h>

#include <stdlib.h>

#include <delay.h>

// Alphanumeric LCD Module functions

#include <alcd.h>

// Declare your global variables here

int COUNTER=0;

float COUNTER0;

// External Interrupt 0 service routine

interrupt [EXT_INT0] void ext_int0_isr(void)

{

// Place your code here

if (PIND.3==0)

{

COUNTER=COUNTER+1;      //TURNING CLOCKWISE AND MENU SCROLL DOWN

COUNTER0=COUNTER;

delay_us(600);

}

else

COUNTER=COUNTER-1;

COUNTER0=COUNTER;

if (COUNTER<2)

{

COUNTER=1;

```

```

    }

    delay_us(600);
}

// External Interrupt 1 service routine
interrupt [EXT_INT1] void ext_int1_isr(void)
{
// Place your code here

if (PIND.2==0)
    {
        COUNTER=COUNTER+1;      //TURNING CLOCKWISE AND MENU SCROLL DOWN
        COUNTER0=COUNTER;
        delay_us(600);
    }
else
    COUNTER=COUNTER-1;
    COUNTER0=COUNTER;

    if (COUNTER<2)
        {
            COUNTER=1;
        }

    delay_us(600);
}

void main(void)
{
// Declare your local variables here

int BACK=0, NEXT=0, SUBSELECT=0, AUTOSUBMENU=0;

int MOVES=0, STEPLOG=0, DIRECT=0, OUT=0, OUT1=0, OUT2=0, SETPROGMOVES=0,
SETPROGDIR=0, SETPROGSTEPS=0, STEPCOUNTER=0;

int mpos=0, STEPnum=1;

int I=1, X=0, Z=0, SCOUNT=0;

```

```

long int STEPARR[50];

float TICS=0, STEPS=0, MULTI=0, DEGREES=0;

char TIC[5], COUNT[5], COUNTARR[5], IARR[5], PRINTARR[5], DEGARR[5];

// Input/Output Ports initialization

// Port A initialization

// Func7=Out Func6=Out Func5=Out Func4=Out Func3=Out Func2=Out Func1=Out Func0=Out

// State7=0 State6=0 State5=0 State4=0 State3=0 State2=0 State1=0 State0=0

PORTA=0x00;

DDRA=0xFF;

// Port B initialization

// Func7=Out Func6=Out Func5=Out Func4=Out Func3=Out Func2=Out Func1=Out Func0=Out

// State7=0 State6=0 State5=0 State4=0 State3=0 State2=0 State1=0 State0=0

PORTB=0x00;

DDRB=0xFF;

// Port C initialization

// Func7=Out Func6=Out Func5=Out Func4=Out Func3=Out Func2=Out Func1=Out Func0=Out

// State7=0 State6=0 State5=0 State4=0 State3=0 State2=0 State1=0 State0=0

PORTC=0x00;

DDRC=0xFF;

// Port D initialization

// Func7=Out Func6=Out Func5=Out Func4=Out Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In

// State7=0 State6=0 State5=0 State4=0 State3=T State2=T State1=T State0=T

PORTD=0x00;

DDRD=0xF0;

// Timer/Counter 0 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer 0 Stopped

// Mode: Normal top=0xFF

// OC0 output: Disconnected

```

```
TCCR0=0x00;
TCNT0=0x00;
OCR0=0x00;
// Timer/Counter 1 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer1 Stopped
// Mode: Normal top=0xFFFF
// OC1A output: Discon.
// OC1B output: Discon.
// Noise Canceler: Off
// Input Capture on Falling Edge
// Timer1 Overflow Interrupt: Off
// Input Capture Interrupt: Off
// Compare A Match Interrupt: Off
// Compare B Match Interrupt: Off
TCCR1A=0x00;
TCCR1B=0x00;
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;
ICR1H=0x00;
ICR1L=0x00;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;
// Timer/Counter 2 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer2 Stopped
// Mode: Normal top=0xFF
```

```
// OC2 output: Disconnected

ASSR=0x00;

TCCR2=0x00;

TCNT2=0x00;

OCR2=0x00;

// External Interrupt(s) initialization

// INT0: On

// INT0 Mode: Rising Edge

// INT1: On

// INT1 Mode: Falling Edge

// INT2: Off

GICR|=0xC0;

MCUCR=0x0B;

MCUCSR=0x00;

GIFR=0xC0;

// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization

TIMSK=0x00;

// USART initialization

// USART disabled

UCSRB=0x00;

// Analog Comparator initialization

// Analog Comparator: Off

// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1: Off

ACSR=0x80;

SFIOR=0x00;
```

```

// ADC initialization

// ADC disabled

ADCSRA=0x00;

// SPI initialization

// SPI disabled

SPCR=0x00;

// TWI initialization

// TWI disabled

TWCR=0x00;

// Alphanumeric LCD initialization

// Connections specified in the

// Project|Configure|C Compiler|Libraries|Alphanumeric LCD menu:

// RS - PORTA Bit 0

// RD - PORTA Bit 1

// EN - PORTA Bit 2

// D4 - PORTA Bit 4

// D5 - PORTA Bit 5

// D6 - PORTA Bit 6

// D7 - PORTA Bit 7

// Characters/line: 20

lcd_init(20);

// Global enable interrupts

#asm("sei")

lcd_gotoxy(0,1);

lcd_putsf(" WELCOME TO STEPPER ");

lcd_gotoxy(0,2);

```

```
lcd_putsf(" MOTOR CONTROL ");  
delay_ms(1500);
```

```
lcd_gotoxy(0,1);  
lcd_putsf(" INITIALIZING ");  
lcd_gotoxy(0,2);  
PORTD.5=0;  
PORTD.6=1;  
PORTD.7=1;
```

```
delay_ms(50);  
lcd_putsf("* ");  
lcd_gotoxy(0,1);  
lcd_putsf(" INITIALIZING ");  
lcd_gotoxy(0,2);  
lcd_putsf("** ");
```

```
delay_ms(50);  
lcd_gotoxy(0,1);  
lcd_putsf(" INITIALIZING ");  
lcd_gotoxy(0,2);  
lcd_putsf("*** ");
```

```
delay_ms(50);  
lcd_gotoxy(0,1);  
lcd_putsf(" INITIALIZING ");  
lcd_gotoxy(0,2);  
lcd_putsf("**** ");  
PORTD.5=1;  
PORTD.6=0;
```

```
PORTD.7=1;

delay_ms(50);
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf("  INITIALIZING  ");
lcd_gotoxy(0,2);
lcd_putsf("*****  ");

delay_ms(50);
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf("  INITIALIZING  ");
lcd_gotoxy(0,2);
lcd_putsf("*****  ");

delay_ms(50);
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf("  INITIALIZING  ");
lcd_gotoxy(0,2);
lcd_putsf("*****  ");

PORTD.5=1;
PORTD.6=1;
PORTD.7=0;

delay_ms(50);
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf("  INITIALIZING  ");
lcd_gotoxy(0,2);
lcd_putsf("*****  ");

delay_ms(50);
```



```
lcd_gotoxy(0,1);  
lcd_putsf("  INITIALIZING  ");  
lcd_gotoxy(0,2);  
lcd_putsf("*****  
");
```

```
delay_ms(50);  
lcd_gotoxy(0,1);  
lcd_putsf("  INITIALIZING  ");  
lcd_gotoxy(0,2);  
lcd_putsf("*****  
");  
PORTD.5=0;  
PORTD.6=0;  
PORTD.7=0;
```

```
delay_ms(50);  
lcd_gotoxy(0,1);  
lcd_putsf("  INITIALIZING  ");  
lcd_gotoxy(0,2);  
lcd_putsf("*****  
");
```

```
delay_ms(50);  
lcd_gotoxy(0,1);  
lcd_putsf("  INITIALIZING  ");  
lcd_gotoxy(0,2);  
lcd_putsf("*****  
");
```

```
delay_ms(50);  
lcd_gotoxy(0,1);  
lcd_putsf("  INITIALIZING  ");  
lcd_gotoxy(0,2);
```

```
lcd_putsf("*****");
```

```
PORTD.5=0;
```

```
PORTD.6=1;
```

```
PORTD.7=1;
```

```
delay_ms(50);
```

```
lcd_gotoxy(0,1);
```

```
lcd_putsf(" INITIALIZING ");
```

```
lcd_gotoxy(0,2);
```

```
lcd_putsf("*****");
```

```
delay_ms(50);
```

```
lcd_gotoxy(0,1);
```

```
lcd_putsf(" INITIALIZING ");
```

```
lcd_gotoxy(0,2);
```

```
lcd_putsf("*****");
```

```
delay_ms(50);
```

```
lcd_gotoxy(0,1);
```

```
lcd_putsf(" INITIALIZING ");
```

```
lcd_gotoxy(0,2);
```

```
lcd_putsf("*****");
```

```
PORTD.5=1;
```

```
PORTD.6=0;
```

```
PORTD.7=1;
```

```
delay_ms(50);
```

```
lcd_gotoxy(0,1);
```

```
lcd_putsf(" INITIALIZING ");
```

```
lcd_gotoxy(0,2);
```

```
lcd_putsf("***** ");
```

```
delay_ms(50);
```

```
lcd_gotoxy(0,1);
```

```
lcd_putsf("  INITIALIZING  ");
```

```
lcd_gotoxy(0,2);
```

```
lcd_putsf("***** ");
```

```
delay_ms(50);
```

```
lcd_gotoxy(0,1);
```

```
lcd_putsf("  INITIALIZING  ");
```

```
lcd_gotoxy(0,2);
```

```
lcd_putsf("***** ");
```

```
    PORTD.5=1;
```

```
    PORTD.6=1;
```

```
    PORTD.7=0;
```

```
delay_ms(50);
```

```
lcd_gotoxy(0,1);
```

```
lcd_putsf("  INITIALIZING  ");
```

```
lcd_gotoxy(0,2);
```

```
lcd_putsf("*****");
```

```
    PORTD.5=1;
```

```
    PORTD.6=1;
```

```
    PORTD.7=1;
```

```
    PORTC.2=0;
```

```
    PORTC.3=0;
```

```
    PORTC.7=1; // DRIVER CHIP DISABLED
```

```

delay_ms(150);

while(1)
{
//Αρχή Επιλογής Βασικού Μενου 1.Auto/2.Manual/3.Program

MAINMENU: while (PIND.4==0)
{
if (COUNTER < 1) //Έλεγχος για κατώτερες τιμές
{
COUNTER=1;
}

if (COUNTER == 1) //Έλεγχος Επιλογής Βασικού Μενού,
Υπομενού 1.Auto (Preset)
{
lcd_gotoxy(0,0);
lcd_putsf("-----MENU-----");
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf("> Auto (Preset) ");
lcd_gotoxy(0,2);
lcd_putsf(" Manual ");
lcd_gotoxy(0,3);
lcd_putsf(" Program ");
if (PIND.4 == 1)
{
SUBSELECT=COUNTER;
COUNTER=1;
}
}
}

```

```

    }
    if (COUNTER == 2) //Ελεγχος Επιλογής Βασικού Μενού,
Υπομενού 2.Manual
    {
        lcd_gotoxy(0,0);
        lcd_putsf("-----MENU-----");
        lcd_gotoxy(0,1);
        lcd_putsf(" Auto (Preset) ");
        lcd_gotoxy(0,2);
        lcd_putsf("> Manual ");
        lcd_gotoxy(0,3);
        lcd_putsf(" Program ");
        if (PIND.4 ==1)
            {
                SUBSELECT=COUNTER;
                COUNTER=1;
            }
    }
    if (COUNTER == 3) //Ελεγχος Επιλογής Βασικού Μενού,
Υπομενού 3.Program
    {
        lcd_gotoxy(0,0);
        lcd_putsf("-----MENU-----");
        lcd_gotoxy(0,1);
        lcd_putsf(" Auto (Preset) ");
        lcd_gotoxy(0,2);
        lcd_putsf(" Manual ");
        lcd_gotoxy(0,3);
        lcd_putsf("> Program ");
        if (PIND.4 ==1)
            {

```



```

    }

    if (SUBSELECT==3) //Ελεγχος Επιλογής Κεφαλίδας PROGRAM MODE
    {
        lcd_gotoxy(0,0);
        lcd_putsf("----PROGRAM MODE----");
    }

    //Τέλος Επιλογής Κεφαλίδας

    //////////////////////////////////////

    //Αρχή Επιλογής Βήματος/Επιστροφής

    if (COUNTER<0) //Ελεγχος για κατώτερες τιμές
    {
        COUNTER=1;
    }

    if (COUNTER==1) //Ελεγχος για Υπομενού FULL STEP
    {
        lcd_gotoxy(0,1);
        lcd_putsf("SET STEP MODE:  ");
        lcd_gotoxy(0,2);
        lcd_putsf("> Full Step  ");
        lcd_gotoxy(0,3);
        lcd_putsf(" Half Step  ");
        if (PIND.4==1)
        {
            STEPS=400;
            SCOUNT=2;
            MULTI=0.9;
            PORTC.6=0;
            PORTC.5=0;
        }
    }

```

```

    PORTC.4=0;

    NEXT=1;

    }

    }

if (COUNTER==2)                                     //Έλεγχος για Υπομενού HALF STEP
{
    lcd_gotoxy(0,1);
    lcd_putsf("SET STEP MODE:  ");
    lcd_gotoxy(0,2);
    lcd_putsf(" Full Step  ");
    lcd_gotoxy(0,3);
    lcd_putsf("> Half Step  ");
    if (PIND.4==1)
    {
        STEPS=800;
        SCOUNT=3;
        MULTI=0.45;
        PORTC.6=1;
        PORTC.5=0;
        PORTC.4=0;
        NEXT=1;
    }
}

if (COUNTER==3)                                     //Έλεγχος για Υπομενού 1/4 STEP
{
    lcd_gotoxy(0,1);
    lcd_putsf("SET STEP MODE:  ");
    lcd_gotoxy(0,2);
    lcd_putsf(" Half Step  ");
    lcd_gotoxy(0,3);

```



```

lcd_putsf("> 1/4 Step    ");
if (PIND.4==1)
{
    STEPS=1600;
    SCOUNT=5;
    MULTI=0.225;
    PORTC.6=0;
    PORTC.5=1;
    PORTC.4=0;
    NEXT=1;
}
}

if (COUNTER==4) //Ελεγχος για Υπομενού 1/8 STEP
{
    lcd_gotoxy(0,1);
    lcd_putsf("SET STEP MODE:    ");
    lcd_gotoxy(0,2);
    lcd_putsf(" 1/4 Step    ");
    lcd_gotoxy(0,3);
    lcd_putsf("> 1/8 Step    ");
    if (PIND.4==1)
    {
        STEPS=3200;
        SCOUNT=9;
        MULTI=0.1125;
        PORTC.6=1;
        PORTC.5=1;
        PORTC.4=0;
        NEXT=1;
    }
}

```

```

}
if (COUNTER==5) //Ελεγχος για Υπομενού 1/16 STEP
{
  lcd_gotoxy(0,1);
  lcd_putsf("SET STEP MODE: ");
  lcd_gotoxy(0,2);
  lcd_putsf(" 1/8 Step ");
  lcd_gotoxy(0,3);
  lcd_putsf("> 1/16 Step ");
  if (PIND.4==1)
  {
    STEPS=6400;
    SCOUNT=17;
    MULTI=0.05625;
    PORTC.6=0;
    PORTC.5=0;
    PORTC.4=1;
    NEXT=1;
  }
}
if (COUNTER==6) //Ελεγχος για Υπομενού 1/32 STEP
{
  lcd_gotoxy(0,1);
  lcd_putsf("SET STEP MODE: ");
  lcd_gotoxy(0,2);
  lcd_putsf(" 1/16 Step ");
  lcd_gotoxy(0,3);
  lcd_putsf("> 1/32 Step ");
  if (PIND.4==1)
  {

```

```

    STEPS=12800;

    SCOUNT=33;

    MULTI=0.028125;

    PORTC.6=1;

    PORTC.5=1;

    PORTC.4=1;

    NEXT=1;

    }

}

if (COUNTER==7)                                     //Ελεγχος για Υπομενού BACK
{
    lcd_gotoxy(0,1);
    lcd_putsf("SET STEP MODE:  ");
    lcd_gotoxy(0,2);
    lcd_putsf(" 1/32 Step  ");
    lcd_gotoxy(0,3);
    lcd_putsf("> BACK  ");
    if (PIND.4 == 1)
    {
        BACK=1;
    }
}

if (COUNTER > 7)                                     //Ελεγχος για ανώτερες τιμές
{
    COUNTER=7;
}
}

//Τέλος Επιλογής Βήματος/Επιστροφής

if (BACK==1)                                         //Ελεγχος για επιστροφή στο αρχικό μενού

```

```

{
SUBSELECT=0;

COUNTER=1;

NEXT=0;

BACK=0;

goto MAINMENU;

}

```

```

//Τέλος Μενού Επιλογής STEP/BACK με Κεφαλίδα 1.AUTO MODE/2.MANUAL
MODE/3.PROGRAM MODE

```

```

////////////////////////////////////

```

```

//Αρχή Μενού Επιλογής AUTO MODE 1.Speed Control/2.Clockwise/3.Anticlockwise/4.BACK

```

```

if (NEXT==1 && SUBSELECT==1)
{
AUTOMENULABEL: NEXT=0;

while (SUBSELECT==1 && BACK==0 && NEXT==0)
{
COUNTER=1;

while(PIND.4==0)
{
if (COUNTER<0) //Έλεγχος για κατώτερες τιμές
{
COUNTER=1;
}

if (COUNTER==1) //Έλεγχος για Υπομενού Clock
{
lcd_gotoxy(0,1);

lcd_putsf("SET FUNCTION MODE: ");

lcd_gotoxy(0,2);

```

```

lcd_putsf("> Speed Control  ");
lcd_gotoxy(0,3);
lcd_putsf(" Clockwise  ");
if (PIND.4==1)
{
AUTOSUBMENU=COUNTER;
NEXT=1;
}
}

if (COUNTER==2) //Ελεγχος για Υπομενού Clockwise
{
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf("SET FUNCTION MODE: ");
lcd_gotoxy(0,2);
lcd_putsf(" Speed Control  ");
lcd_gotoxy(0,3);
lcd_putsf("> Clockwise  ");
if (PIND.4==1)
{
AUTOSUBMENU=COUNTER;
NEXT=1;
}
}

if (COUNTER==3) //Ελεγχος για Υπομενού Anticlockwise
{
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf("SET FUNCTION MODE: ");
lcd_gotoxy(0,2);
lcd_putsf(" Clockwise  ");
lcd_gotoxy(0,3);

```

```

lcd_putsf("> Anticlockwise  ");
if (PIND.4==1)
{
AUTOSUBMENU=COUNTER;
NEXT=1;
}
}
if (COUNTER==4) //Ελεγχος για Υπομενού BACK
{
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf("SET FUNCTION MODE: ");
lcd_gotoxy(0,2);
lcd_putsf(" Anticlockwise  ");
lcd_gotoxy(0,3);
lcd_putsf("> BACK      ");
if (PIND.4 == 1)
{
BACK=1;
}
}
if (COUNTER > 4) //Ελεγχος για ανώτερες τιμές
{
COUNTER=4;
}
if (BACK==1) //Ελεγχος για επιστροφή στο αρχικό μενού
(STEP/BACK)
{
BACK=0;
goto STEPSELECTOR;
}

```

```

//Τέλος Μενού Επιλογής AUTO MODE 1.Speed Control/2.Clockwise/3.Anticlockwise/4.BACK
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//Αρχή Υπομενού AUTO MODE
//Αρχή Μενού Λειτουργίας Clock
    if (NEXT==1)
    {
        PORTC.0=1; // CHECK FOR CLOCKWISE
        PORTC.7=0;
        COUNTER0=1;
        while(AUTOSUBMENU==1 && BACK==0)
        {
            lcd_gotoxy(0,0);
            lcd_putsf("---SPEED CONTROL----");
            lcd_gotoxy(0,1);
            lcd_putsf("  DELAY:      ");
            lcd_gotoxy(0,2);
            lcd_putsf("  DEG: 000.0000");
            lcd_gotoxy(0,3);
            lcd_putsf("Press to go BACK  ");
            TICS=0;
            while (PIND.4==0)
            {
                /*Αρχή Προγραμματισμού Clock*/
                ftoa(COUNTER0, 3, COUNTARR);
                lcd_gotoxy(15,1);
                lcd_puts(COUNTARR);
                itoa(TICS, TIC);
                lcd_gotoxy(0,2);
                lcd_puts(TIC);
                if (COUNTER0<2)

```

```

    {
        COUNTER0=1;
    }
if (COUNTER0>100)
    {
        COUNTER0=99;
    }
PORTC.1=0;
delay_ms(COUNTER0);           //Can be calibrated
PORTC.1=1;
delay_ms(COUNTER0);           //Can be calibrated
TICS=TICS+1;
DEGREES=TICS*MULTI;
ftoa(DEGREES, 4, DEGARR);
lcd_gotoxy(12,2);
lcd_puts(DEGARR);
if (DEGREES>360)
    {
        TICS=0;
        DEGREES=0;
        lcd_gotoxy(0,2);
        lcd_putsf(" ");
    }

/*Τέλος Προγραμματισμού Speed Control*/
if (PIND.4==1)
    {
        PORTC.7=1;
        BACK=1;
    }

```



```

    {
    PORTC.1=0;

    delay_ms(1);

    PORTC.1=1;

    delay_ms(1);

    if (PIND.4==1)

        {

        BACK=1;

        }

    }

(AUTO MODE) if (BACK==1) //Έλεγχος για επιστροφή στο προηγούμενο μενού

    {

    PORTC.7=1;

    lcd_gotoxy(0,0);

    lcd_putsf("-----AUTO MODE-----");

    COUNTER=1;

    NEXT=0;

    BACK=0;

    AUTOSUBMENU=0;

    goto AUTOMENULABEL;

    }

}

//Τέλος Μενού Λειτουργίας Clockwise

////////////////////////////////////

//Αρχή Μενού Λειτουργίας Anticlockwise

while(AUTOSUBMENU==3 && BACK==0)

    {

    lcd_gotoxy(0,0);

    lcd_putsf("-TURN ANTICLOCKWISE-");

```

```

lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf("      ");
lcd_gotoxy(0,2);
lcd_putsf("      ");
lcd_gotoxy(0,3);
lcd_putsf("Press to go BACK  ");
PORTC.0=0;
PORTC.7=0;
while (PIND.4==0)
{
PORTC.1=0;
delay_ms(1);
PORTC.1=1;
delay_ms(1);
if (PIND.4==1)
{
BACK=1;
}
}
if (BACK==1) //Έλεγχος για επιστροφή στο προηγούμενο μενού
(AUTO MODE)
{
PORTC.7=1;
lcd_gotoxy(0,0);
lcd_putsf("----AUTO MODE----");
COUNTER=1;
NEXT=0;
BACK=0;
AUTOSUBMENU=0;
goto AUTOMENULABEL;

```

```

        }
    }
}

}

}

//Τέλος Μενού Λειτουργίας Anticlockwise

//Τέλος Υπομενού AUTO MODE

////////////////////////////////////

//Αρχή Υπομενού MANUAL MODE

    if (NEXT==1 && SUBSELECT==2)

        {

            NEXT=0;

            while (SUBSELECT==2 && BACK==0)

                {

                    PORTC.7=0;

                    COUNTER=0;

                    while (PIND.4==0)

                        {

                            if (COUNTER<2)

                                {

                                    PORTC.0=0;

                                    for (Z=1; Z<SCOUNT; Z=Z+1)

                                        {

                                            delay_ms(10);

                                            PORTC.1=1;

                                            delay_ms(10);

                                            PORTC.1=0;

                                            delay_ms(10);

                                            COUNTER=2;

```

```

    }
}
if (COUNTER>2)
{
    PORTC.0=1;
    for (Z=1; Z<SCOUNT; Z=Z+1)
    {
        delay_ms(10);
        PORTC.1=1;
        delay_ms(10);
        PORTC.1=0;
        delay_ms(10);
        COUNTER=2;
    }
}
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf("TURN KNOB TO CONTROL");
lcd_gotoxy(0,2);
lcd_putsf(" ");
lcd_gotoxy(0,3);
lcd_putsf("PRESS FOR BACK ");

if (PIND.4==1)
{
    BACK=1;
    PORTC.7=1;
    COUNTER=1;
}
}
}

```

```

if (BACK==1)             //Έλεγχος για επιστροφή στο αρχικό μενού
{
    BACK=0;
    goto STEPSELECTOR;
}
}

//Τέλος Υπομενού MANUAL MODE

////////////////////////////////////

//Αρχή Υπομενού PROGRAM MODE

STEPSET:  if (NEXT==1 && SUBSELECT==3)
{
    OUT=0;
    NEXT=0;
    BACK=0;
    while (SUBSELECT==3 && BACK==0 && NEXT==0)
    {
        COUNTER=1;
        while(MOVES==0 && STEPLOG==0 || DIRECT==0)
        {
MOVESELECTOR:      while (SETPROGMOVES==0 && SETPROGDIR==0 &&
SETPROGSTEPS==0)
        {
            while (PIND.4==0)             //Αρχή μενού επιλογής Κινήσεων
            {
                if (COUNTER<0)
                {
                    COUNTER=1;
                }
            }
            if (COUNTER==1)

```

```

{
    lcd_gotoxy(0,1);

    lcd_putsf(">Set Number of MOVES");

    lcd_gotoxy(0,2);

    lcd_putsf("          ");

    lcd_gotoxy(0,3);

    lcd_putsf(" BACK          ");

    if (PIND.4==1)
        {
            OUT=COUNTER;
        }
}

if (COUNTER==2)
{
    lcd_gotoxy(0,1);

    lcd_putsf(" Set Number of MOVES");

    lcd_gotoxy(0,2);

    lcd_putsf("          ");

    lcd_gotoxy(0,3);

    lcd_putsf(">BACK          ");

    if (PIND.4==1)
        {
            goto STEPSELECTOR;
        }
}

if (COUNTER>2)
{
    COUNTER=2;
}
}

```

```

while (OUT==1 && SETPROGMOVES==0)
{
if (MOVES==0) //Αρχή Καθορισμού Αριθμού Κινήσεων
{
COUNTER=1;
while (PIND.4==0) //οταν βαζω MOVES {
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf(" Set Number of MOVES");
lcd_gotoxy(0,2);
lcd_putsf("> ");
lcd_gotoxy(5,2);
lcd_putsf(" ");
lcd_gotoxy(0,3);
lcd_putsf(" BACK ");
if (COUNTER<1)
{
COUNTER=1;
}
if (COUNTER>10)
{
COUNTER=10;
}
if (COUNTER>9)
{
mpos=2;
}
else
{
mpos=3;
lcd_gotoxy(2,2);
}
}
}

```



```

        lcd_putsf("0");
    }

    itoa(COUNTER, COUNT);

    lcd_gotoxy(mpos,2);

    lcd_puts(COUNT);

    if (PIND.4==1)
    {
        lcd_gotoxy(16,2);

        lcd_putsf("OK!");

        MOVES=COUNTER;

        SETPROGMOVES=1;

        COUNTER=1;
    }
}
}
}
}
}
}

```

//

DIRSELECTOR:

```

while (SETPROGMOVES==1 && SETPROGDIR==0 && SETPROGSTEPS==0)
{
    while (PIND.4==0 && SETPROGMOVES==1)    //Αρχή μενού επιλογής Κινήσεων
    {
        if (COUNTER<0)
        {
            COUNTER=1;
        }

        if (COUNTER==1)
        {
            lcd_gotoxy(0,1);

```

```

lcd_putsf(">Set First DIRECTION");

lcd_gotoxy(0,2);

lcd_putsf("          ");

lcd_gotoxy(0,3);

lcd_putsf(" BACK          ");

if (PIND.4==1)
    {
        OUT1=COUNTER;
    }
}

if (COUNTER==2)
    {
        lcd_gotoxy(0,1);

        lcd_putsf(" Set First DIRECTION");

        lcd_gotoxy(0,2);

        lcd_putsf("          ");

        lcd_gotoxy(0,3);

        lcd_putsf(">BACK          ");

        if (PIND.4==1)
            {
                OUT=0;

                MOVES=0;

                SETPROGMOVES=0;

                goto MOVESELECTOR;
            }
    }

if (COUNTER>2)
    {
        COUNTER=2;
    }
}

```

```

}
while (OUT1==1 && SETPROGDIR==0)
{
if (DIRECT==0)           //Αρχή Καθορισμού Αριθμού Κινήσεων
{
COUNTER=1;
while (PIND.4==0)
{
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf(" Set First DIRECTION");
lcd_gotoxy(0,2);
lcd_putsf("> ");
lcd_gotoxy(0,3);
lcd_putsf(" BACK      ");
if (COUNTER<1)
{
COUNTER=1;
}
if (COUNTER==1)
{
lcd_gotoxy(2,2);
lcd_putsf("Clockwise  ");
}
if (COUNTER==2)
{
lcd_gotoxy(2,2);
lcd_putsf("Anticlockwise ");
}
if (COUNTER>2)
{

```

```

    COUNTER=2;

}

if (PIND.4==1)

{

    lcd_gotoxy(17,2);

    lcd_putsf("OK!");

    if (COUNTER==1)

        {

            DIRECT=1;      //CHECK CLOCKWISE

        }

    if (COUNTER==2)

        {

            DIRECT=0;      //CHECK ANTICLOCKWISE

        }

    SETPROGDIR=1;

    COUNTER=1;

    }

}

}

}

}

}

}

//////////////////////////////////////////////////////////////////

while (SETPROGMOVES==1 && SETPROGDIR==1 && SETPROGSTEPS==0)

{

    while (PIND.4==0 && SETPROGDIR==1)           //Αρχή μενού STEP SET

        {

            if (COUNTER<0)

                {

                    COUNTER=1;

                }

        }

```

```

if (COUNTER==1)
{
  lcd_gotoxy(0,1);
  lcd_putsf(">Set STEPS of moves ");
  lcd_gotoxy(0,2);
  lcd_putsf("          ");
  lcd_gotoxy(0,3);
  lcd_putsf(" BACK          ");
  if (PIND.4==1)
  {
    OUT2=COUNTER;
    lcd_gotoxy(0,1);
    lcd_putsf("          ");
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putsf("00000");
  }
}

if (COUNTER==2)
{
  lcd_gotoxy(0,1);
  lcd_putsf(" Set STEPS of moves ");
  lcd_gotoxy(0,2);
  lcd_putsf("          ");
  lcd_gotoxy(0,3);
  lcd_putsf(">BACK          ");
  if (PIND.4==1)
  {
    OUT1=0;
    DIRECT=0;
    SETPROGDIR=0;
  }
}

```

```

        goto DIRSELECTOR;
    }
}

if (COUNTER>2)
{
    COUNTER=2;
}
}

////////////////////////////////////

while (OUT2==1 && SETPROGSTEPS==0)
{
    //arrays and value entering HERE!!!

    lcd_gotoxy(0,1);
    lcd_putsf(" Set Move #");
    lcd_gotoxy(14,1);
    lcd_putsf("STEPS");
    lcd_gotoxy(0,2);
    lcd_putsf(">");
    lcd_gotoxy(0,3);
    lcd_putsf(" BACK");
    COUNTER=0;

    while(PIND.4==0 && I<=MOVES)
    {
        itoa(I, IARR);
        lcd_gotoxy(11,1);
        lcd_puts(IARR);
        lcd_gotoxy(17,2);
        lcd_putsf(" ");
        while (PIND.4==0)

```

```

{
if (STEPnum<6)
{
lcd_puts(" ");
delay_ms(20);
if (COUNTER<0)
{
COUNTER=0;
}
if (COUNTER>9)
{
COUNTER=9;
}
itoa(COUNTER, COUNT);
lcd_gotoxy(STEPnum,2);
lcd_puts(COUNT);
delay_ms(80);
lcd_gotoxy(STEPnum,2);
}
if (PIND.4==1)
{
if (STEPnum==1)
{
STEPROG=STEPROG+(10000*COUNTER);
}
if (STEPnum==2)
{
STEPROG=STEPROG+(1000*COUNTER);
}
if (STEPnum==3)

```

```

    {
        STEPLOG=STEPLOG+(100*COUNTER);
    }

if (STEPnum==4)
    {
        STEPLOG=STEPLOG+(10*COUNTER);
    }

if (STEPnum==5)
    {
        STEPLOG=STEPLOG+(1*COUNTER);
    }

STEPnum=STEPnum+1;
}

if (STEPnum==6 && STEPLOG>12800 || STEPLOG<0)
    {
        lcd_gotoxy(8,2);
        lcd_putsf("Set smaller ");
        lcd_gotoxy(8,3);
        lcd_putsf("STEPS Number");
        lcd_gotoxy(0,2);
        lcd_putsf(" ");
        lcd_gotoxy(7,3);
        lcd_putsf(" ");
        lcd_gotoxy(0,3);
        lcd_putsf(">");
        STEPLOG=0;
        STEPnum=1;
    }
}

```



```

if (STEPnum==6 && STEPProg<=12800 && STEPProg>=0)
{
  lcd_gotoxy(8,2);
  lcd_putsf(" ");
  lcd_gotoxy(8,3);
  lcd_putsf(" ");
  while(PIND.4==0)
  {
    lcd_gotoxy(8,3);
    lcd_putsf("OK?");
    if (COUNTER<1)
    {
      COUNTER=1;
    }
    if (COUNTER==1)
    {
      lcd_gotoxy(0,2);
      lcd_putsf(" ");
      lcd_gotoxy(7,3);
      lcd_putsf(" ");
      lcd_gotoxy(0,3);
      lcd_putsf(">");
      if (PIND.4==1)
      {
        //BACK
        STEPnum=1;
        STEPProg=0;
        lcd_gotoxy(0,2);
        lcd_putsf(">");
        lcd_gotoxy(7,2);
        lcd_putsf(" ");
      }
    }
  }
}

```

```

        lcd_gotoxy(5,3);
        lcd_putsf(" ");
    }
}

if(COUNTER==2)
{
    //OK
    lcd_gotoxy(0,2);
    lcd_putsf(" ");
    lcd_gotoxy(7,3);
    lcd_putsf(">");
    lcd_gotoxy(0,3);
    lcd_putsf(" ");
    if (PIND.4==1)
    {
        if (STEPROG<=12800)
        {
            lcd_gotoxy(10,2);
            lcd_putsf(" ");
            STEPARR[I]=STEPROG;
            X=STEPARR[I];
            itoa(X, PRINTARR);
            lcd_gotoxy(10,2);
            lcd_puts(PRINTARR);
            lcd_gotoxy(17,2);
            lcd_putsf("OK!");
            lcd_gotoxy(0,2);
            lcd_putsf(">00000");
            lcd_gotoxy(7,3);
            lcd_putsf(" ");
            I=I+1;
        }
    }
}

```



```

    COUNTER=1;

}

if (COUNTER==1)

{

    lcd_gotoxy(0,2);

    lcd_putsf(">START      ");

    lcd_gotoxy(0,3);

    lcd_putsf(" BACK      ");

    if (PIND.4==1)

        {

            PORTC.7=0;

            PORTC.0=DIRECT;

            for (I=1; I<=MOVES; I=I+1)

                {

                    COUNTER0=10;

                    while(STEPCOUNTER<STEPARR[I])

                        {

                            PORTC.1=0;

                            delay_us(500);

                            PORTC.1=1;

                            delay_us(500);

                            STEPCOUNTER=STEPCOUNTER+1;

                            itoa(STEPCOUNTER, PRINTARR);

                            lcd_gotoxy(8,2);

                            lcd_puts(PRINTARR);

                            itoa(I, IARR);

                            lcd_gotoxy(8,3);

                            lcd_puts(IARR);

                        }

                    if (PINC.0==0)

```

```

        {
            PORTC.0=1;
        }
else if (PINC.0==1)
    {
        PORTC.0=0;
    }
delay_ms(50);
lcd_gotoxy(8,2);
lcd_puts("  ");
STEPCOUNTER=0;
}
//END OF FOR
PORTC.7=1;
}
}
if (COUNTER==2)
    {
        lcd_gotoxy(0,2);
        lcd_putsf(" START      ");
        lcd_gotoxy(0,3);
        lcd_putsf(">BACK      ");
        if (PIND.4==1)
            {
                COUNTER=1;
                SETPROGMOVES=0;
                SETPROGDIR=0;
                SETPROGSTEPS=0;
                MOVES=0;
                DIRECT=0;
            }
    }

```

```
    STEPROG=0;

    STEPCOUNTER=0;

    I=1;

    DIRECT=0;

    OUT=0;

    OUT1=0;

    OUT2=0;

    goto STEPSET;

}

}

if (COUNTER>2)
{
    COUNTER=2;
}
}

}

}

}

}

}

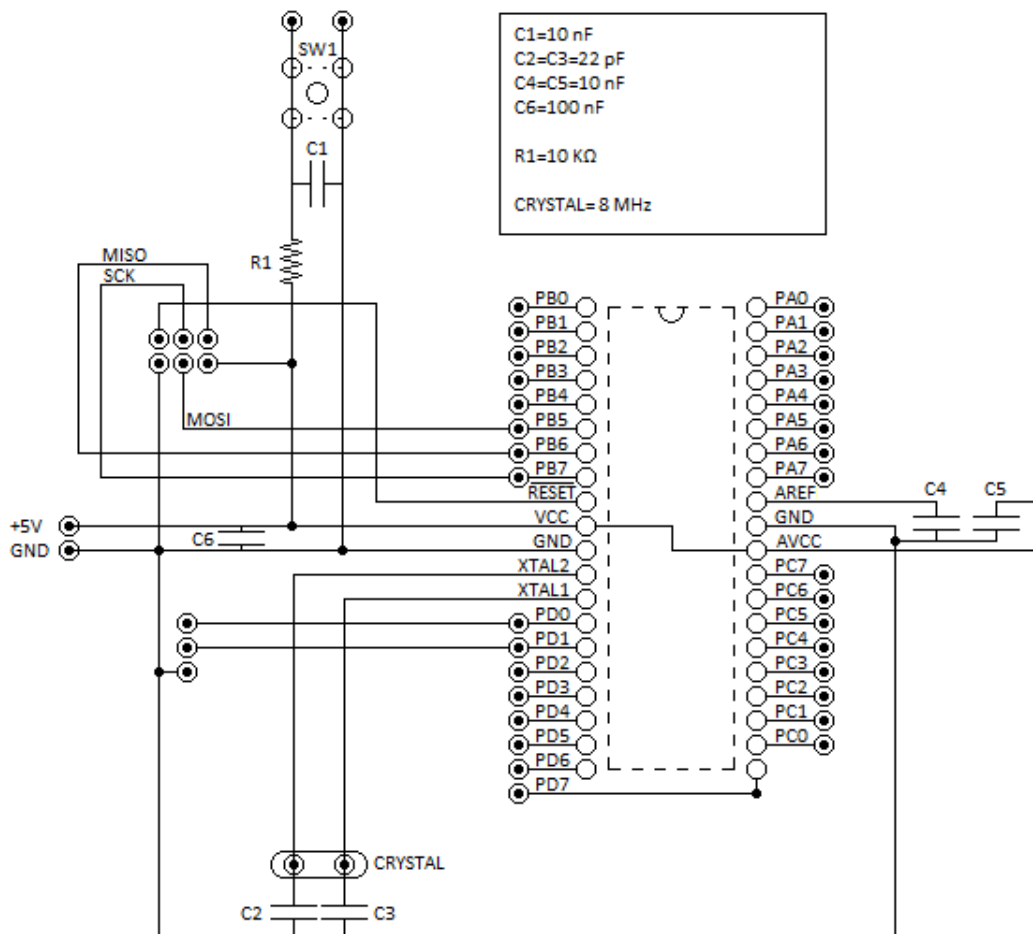
}

//END OF MAIN
```

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανάλυση κατασκευής

5.1 Κυκλώματα και Μετρήσεις

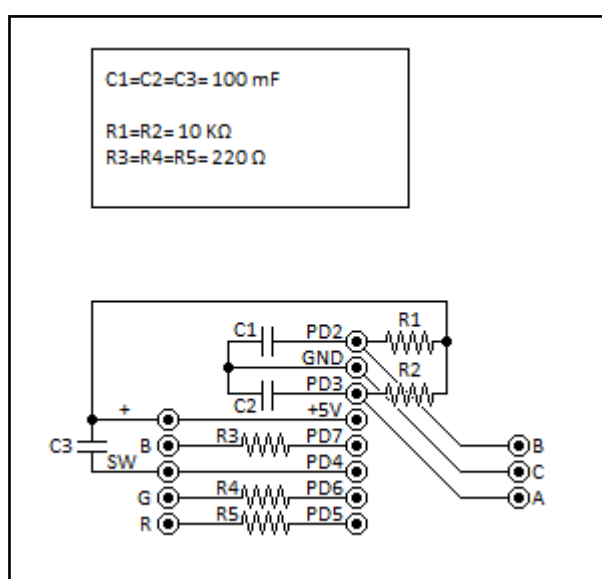
Η κατασκευή αποτελείται από τρία βασικά μέρη. Τον μικροεπεξεργαστή, τον οδηγό ελέγχου και τον βηματικό κινητήρα. Για τη λειτουργία του μικροεπεξεργαστή κατασκευάστηκε κύκλωμα που μπορεί να υποστηρίξει και μερικά άλλα μοντέλα επεξεργαστών το οποίο φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1, Κύκλωμα λειτουργίας επεξεργαστή.

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 9, ο επεξεργαστής αποτελείται από τέσσερις εισόδους/εξόδους A,B,C και D των οκτώ bit (συνολικά 32 είσοδοι/έξοδοι). Σε κάθε μία από αυτές (PORTS) συνδέθηκαν τρεις περιφερειακές συσκευές. Ένας περιστροφικός κωδικοποιητής (rotary encoder), μία οθόνη LCD 20x4 και ο οδηγός ελέγχου του βηματικού κινητήρα.

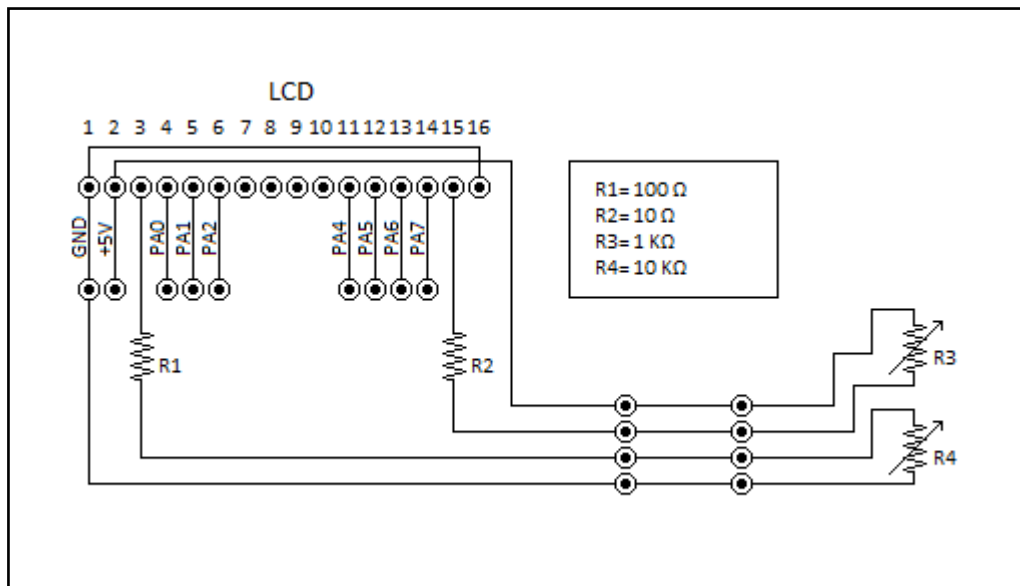
Ο έλεγχος του συστήματος γίνεται μέσω του περιστροφικού κωδικοποιητή για τον οποίο κατασκευάστηκε κύκλωμα για να “φιλτράρει” τα σήματα που στέλνονται στον μικροεπεξεργαστή και να μην προκαλούνται παρεμβολές. Το κύκλωμα καθώς και ο τρόπος σύνδεσής του στον επεξεργαστή φαίνεται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2, Φίλτρο περιστροφικού κωδικοποιητή.

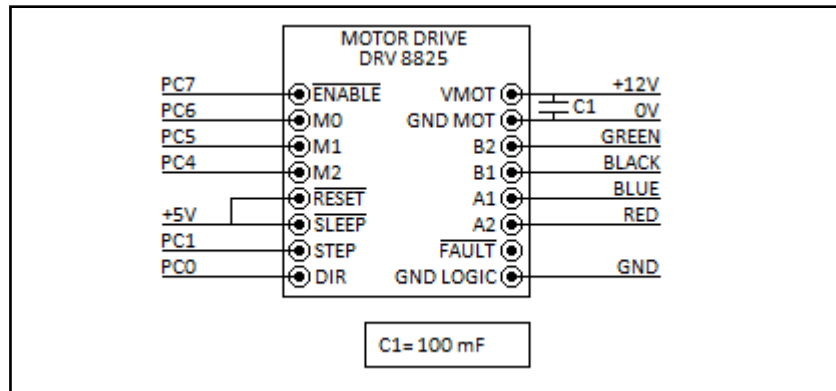
Για την ανάδραση με το χρήστη, την προβολή και την επιλογή των μενού χρησιμοποιήθηκε οθόνη για την οποία σχεδιάστηκαν δύο κυκλώματα ένα για την επικοινωνία της με τον επεξεργαστή και ένα για τον έλεγχο της έντασης του φωτισμού και την αντίθεση των χρωμάτων της. Και τα δύο κυκλώματα εκτός από την παραπάνω λειτουργία εξυπηρετούν και στην εύκολη αντικατάσταση της οθόνης σε

περίπτωση βλάβης. Παρακάτω δίνεται η συνδεσμολογία των δύο κυκλωμάτων (σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3, Κύκλωμα ελέγχου και επικοινωνίας οθόνης LCD.

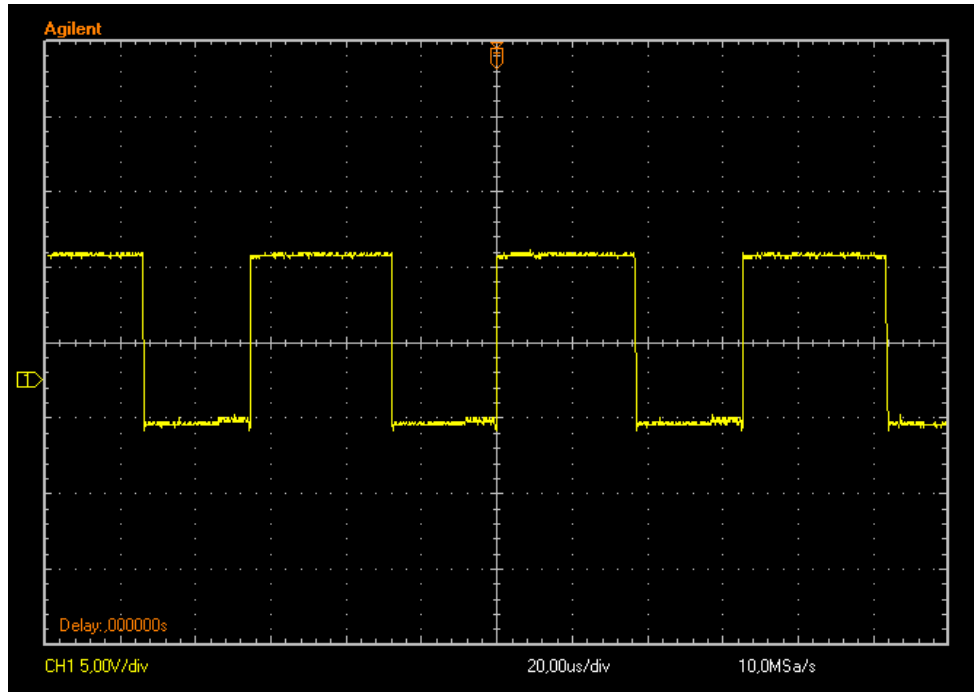
Τέλος ο οδηγός ελέγχου αποτελεί το μέσο για τον έλεγχο του βηματικού κινητήρα. Ο οδηγός όπως έχουμε αναφέρει μπορεί άμεσα να συνδεθεί στον μικροεπεξεργαστή. Το μόνο που χρειάζεται είναι να συνδέσουμε έναν πυκνωτή κοντά στον οδηγό, στο σημείο όπου δίνεται η τάση τροφοδοσίας του βηματικού κινητήρα. Αυτό έχει ως σκοπό να προστατέψει τον οδηγό από τυχόν “καρφιά” (spikes) από υπερτάσεις ή παρεμβολές. Παρακάτω δίνεται η συνδεσμολογία (σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.4, Συνδεσμολογία οδηγού ελέγχου με τον μικροεπεξεργαστή και τον βηματικό κινητήρα.

Για την τροφοδοσία των 5V και 12V χρησιμοποιήθηκε τροφοδοτικό υπολογιστή 300W το οποίο είναι υπεραρκετό για την τροφοδοσία του συστήματος. Ολόκληρο το σύστημα στεγάστηκε σε ιδιοκατασκευή από ακρυλικό (πλεξιγκλάς). Στη συνέχεια ελέγχθηκε η ομαλή λειτουργία του συστήματος και έγινε λήψη μετρήσεων για επιβεβαίωση.

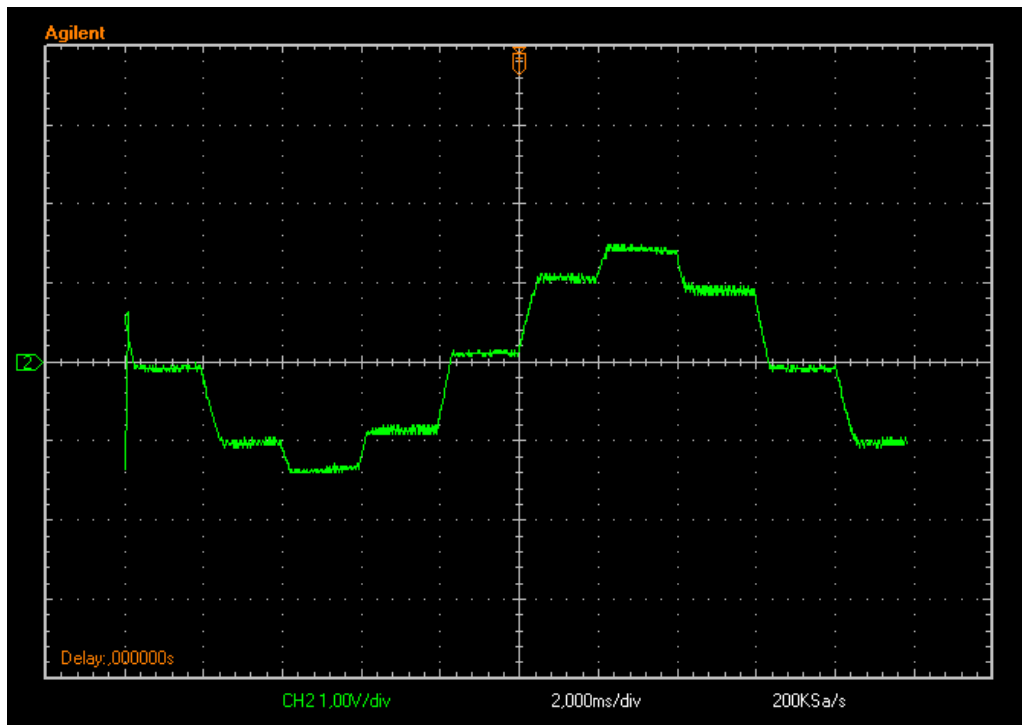
Αρχικά πραγματοποιήθηκε μέτρηση της τάσης τροφοδοσίας μίας φάσης στον παλμογράφο όπου η κυματομορφή φαίνεται στο σχήμα 5.5.1.



Σχήμα 5.5.1, Κυματομορφή τάσης τροφοδοσίας

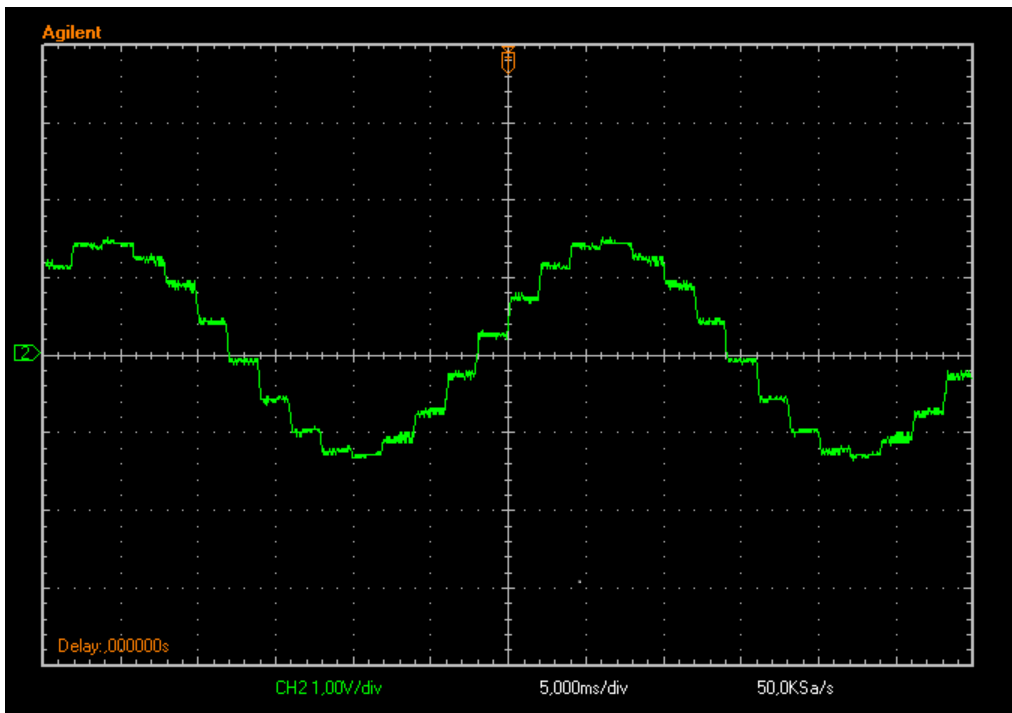
Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι η τάση τροφοδοσίας είναι $12V_{p-p}$, η τάση φτάνει στη μέγιστη τιμή και διατηρείται για περίπου $3,6\mu s$, έπειτα μηδενίζεται για $3,2\mu s$. Συνολικά μία περίοδος διαρκεί $6,8\mu s$ ή μπορούμε να πούμε ότι η συχνότητα είναι $263kHz$ περίπου. Η συχνότητα αυτή καλύπτει το κριτήριο της ελάχιστης συχνότητας παλμών που υπολογίσαμε στο κεφάλαιο 3.

Στη συνέχεια πήραμε μετρήσεις ρεύματος μίας φάσης για πέντε διαφορετικές καταστάσεις μικροβηματισμού. Η κυματομορφή πλήρους βήματος δεν αποτυπώθηκε αφού αποτελεί παλμό που ακολουθεί αυτόν της τάσης.

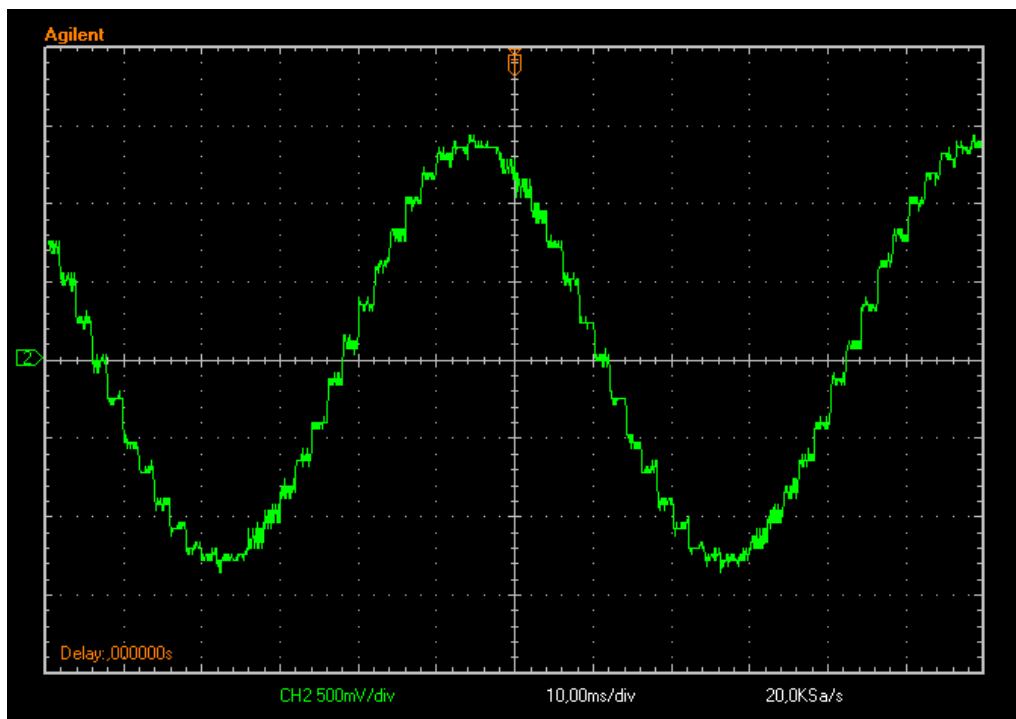


Σχήμα 5.5.2, Κυματομορφή ρεύματος με ανάλυση μισού βήματος.

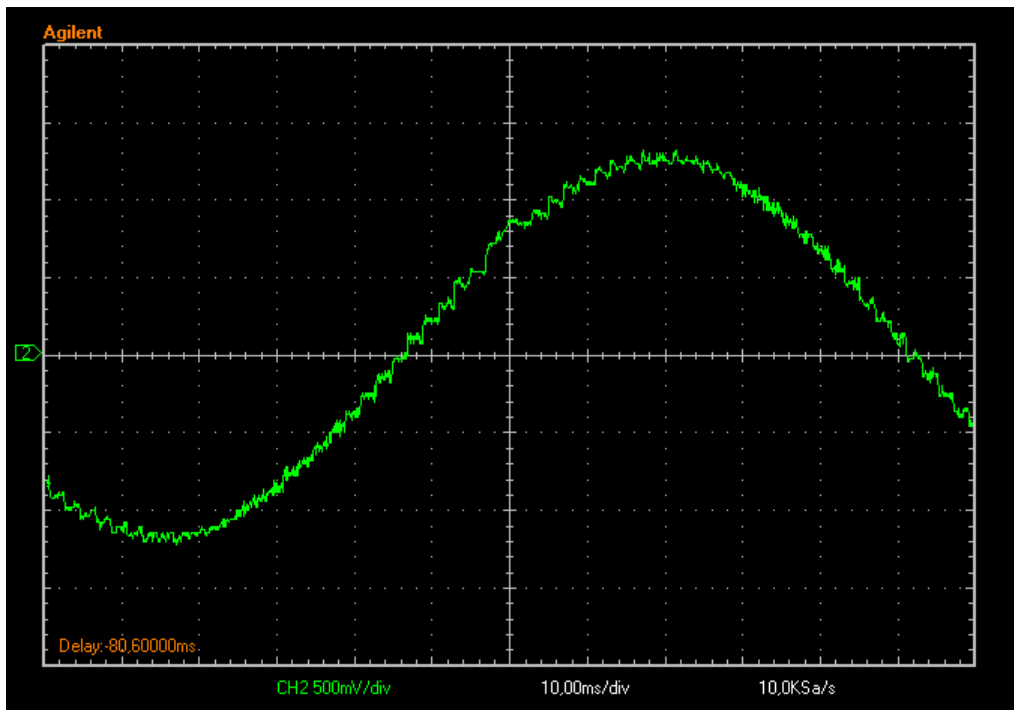
Εδώ παρατηρούμε ότι το ρεύμα αρχίζει να αποκτά ημιτονοειδή μορφή με περίοδο 16ms. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος φτάνει τα 1,3A. Η μεταβολή αυτή της κυματομορφής του ρεύματος από παλμό σε ημίτονο οφείλεται στη μέθοδο του μικροβηματισμού. Επειδή η μέτρηση γίνεται σε μία φάση και το συνολικό ρεύμα πρέπει να παραμένει σταθερό σε κάθε βήμα ώστε να διατηρείται η ροπή του κινητήρα γίνεται κατανοητό ότι η κυματομορφή στο δεύτερο τύλιγμα έχει διαφορά φάσης 90° .



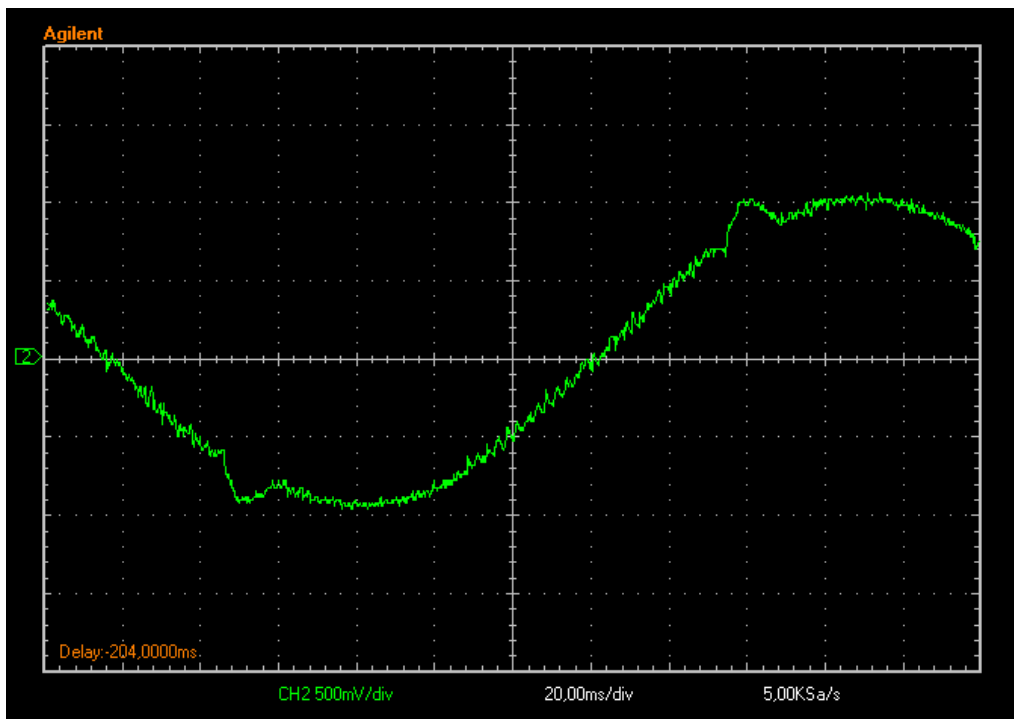
Σχήμα 5.5.3, Κυματομορφή ρεύματος με ανάλυση 1/4 του βήματος.



Σχήμα 5.5.4, Κυματομορφή ρεύματος με ανάλυση 1/8 του βήματος.



Σχήμα 5.5.5, Κυματομορφή ρεύματος με ανάλυση 1/16 του βήματος.



Σχήμα 5.5.5, Κυματομορφή ρεύματος με ανάλυση 1/32 του βήματος.

5.2 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις παραπάνω μετρήσεις και από τις κυματομορφές είναι ότι όσο μεγαλύτερη η ανάλυση του βήματος τόσο το ρεύμα τείνει να γίνει ημιτονοειδές, αυξάνοντας παράλληλα το χρόνο μίας περιόδου. Αντίστοιχα μπορούμε να πούμε ότι αφού αυξάνεται ο χρόνος μίας περιόδου μειώνεται και η συχνότητα του σήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται και η ταχύτητα του κινητήρα.

Στην μέγιστη ανάλυση του οδηγού παρατηρείται μία ανομοιομορφία ανά 130ms. Η ανομοιομορφία αυτή οφείλεται στη συχνότητα τροφοδοσίας των παλμών από τον μικροεπεξεργαστή.

Η οδήγηση ενός βηματικού κινητήρα μπορεί να πραγματοποιηθεί με τετραγωνικούς παλμούς τάσης και με αναλογικό ημιτονοειδές ρεύμα μόνο στην περίπτωση συνεχούς κίνησης σταθερής ταχύτητας χωρίς να χρησιμοποιείται η βηματική ιδιότητα του κινητήρα.

Ο κινητήρας σε καταστάσεις μικροβηματισμού μεγάλης ανάλυσης γίνεται πιο αργός αλλά αθόρυβος με μικρότερης έντασης δονήσεις στη κατασκευή.

Η ακρίβεια της θέσης του άξονα του κινητήρα καθώς και η ροπή είναι λιγότερο σημαντικά μεγέθη όσο αυξάνεται η ανάλυση του βήματος με τη μέθοδο του μικροβηματισμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αλεβίζος Θ. , *Προγραμματισμός με τη γλώσσα C++*, Έκδοση Α', Μονάδα Εκδόσεων του ΤΕΙ Καβάλας, 1999-2000
- [2] ATMEΛ, *ATmega16/16L, 8-bit Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash*, User's manual, 2010 , Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.atmel.com/images/doc2466.pdf>
- [3] Donald Labriola, *Precision motion evolution: Early history of precision motors 1960-1980*, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.machinedesign.com>
- [4] Douglas W. Jones, *Stepping Motor Types*, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://homepage.divms.uiowa.edu/~jones/step/types.html>
- [5] Edvard Csanyi, *4 Types of DC Motors and Their Characteristics*, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://electrical-engineering-portal.com>
- [6] Martin Doppelbauer, *The invention of the electric motor 1800-1854*, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.eti.kit.edu/english/1376.php>
- [7] Martin Doppelbauer, *The invention of the electric motor 1856-1893*, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.eti.kit.edu/english/1390.php>
- [8] Pololu, *DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier, High Current*, Catalog, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.pololu.com/product/2133>
- [9] Sriram Balu, *Classification of Electrical Motors*, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.brighthubengineering.com>
- [10] Thomas E. Kissell, *Industrial Electronics*, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.ni.com/white-paper/14891/en/>