

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
Αριθμός 904**

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΔΙΠΟΛΙΚΗΣ  
ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΒΗΜΑΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ  
ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:  
ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ:  
ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2012**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Κινητήριων Συστημάτων του τμήματος Ηλεκτρολογίας της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του ΤΕΙ Πατρών. Αντικείμενο της είναι η κατασκευή διάταξης για την παλμοδότηση και τον έλεγχο διπολικών βηματικών κινητήρων χρησιμοποιώντας ψηφιακό μικροελεγκτή.

Τελικά κατασκευάστηκε ένας μετατροπέας αποτελούμενος από δύο πλήρεις γέφυρες, τα διακοπτικά στοιχεία των οποίων παλμοδοτούνται από τον ψηφιακό μικροελεγκτή PIC16F877 της εταιρίας Microchip.

Στο **1<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι βηματικοί κινητήρες. Μελετάται η δομή τους, η αρχή λειτουργίας τους καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους. Κλείνοντας το κεφάλαιο πραγματοποιείται ανάλυση στον τρόπο βηματισμού τους.

Στο **2<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζονται κυκλώματα μονοπολικής και διπολικής οδήγησης βηματικών κινητήρων, ενώ γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στις πλήρως ελεγχόμενες γέφυρες.

Στο **3<sup>ο</sup> κεφάλαιο** πραγματοποιείται μια γενική περιγραφή της δομής, των χαρακτηριστικών και του τρόπου λειτουργίας των μικροελεγκτών της οικογένειας PIC, ενώ αναλύεται ο 16F877 που χρησιμοποιήθηκε για την παλμοδότηση των διακοπτικών στοιχείων και τον έλεγχο του συστήματος.

Στο **4<sup>ο</sup> κεφάλαιο** γίνεται η παρουσίαση της διαδικασίας σχεδιασμού και υλοποίησης των στοιχείων που απαρτίζουν την διάταξη οδήγησης διπολικών βηματικών κινητήρων. Αναλύονται τα σχηματικά διαγράμματα των κυκλωμάτων καθώς και το διάγραμμα ροής του κώδικα προγραμματισμού του μικροελεγκτή.

Στο **5<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρατίθενται τα παλμογραφήματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις στην πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε και διατυπώνονται τα συμπεράσματα αυτής της κατασκευής.

Τέλος, καταγράφεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε και στο παράρτημα ενσωματώνονται ο κώδικας προγραμματισμού του μικροελεγκτή και τα εγχειρίδια κατασκευαστών των βηματικών κινητήρων.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά του καθηγητές εφαρμογών κ. Παπαφωτίου Νίκο, κ. Αντωνόπουλο Γεώργιο καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Καλαντζόπουλο Αθανάσιο για το συνεχές ενδιαφέρον, την πολύτιμη καθοδήγηση και την άψογη συνεργασία τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Εύχομαι να έχω την τύχη στη ζωή μου να συνεργάζομαι πάντα με τέτοιους ανθρώπους.

Τέλος θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για τη κατανόηση, την υπομονή και την υποστήριξη τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

**Η εργασία αυτή αφιερώνεται στην μνήμη  
του καθηγητή μου κ. Μαράντη Αθανασίου,  
ενός σπουδαίου ανθρώπου που με έκανε  
να κατανοήσω την έννοια του μηχανικού.**

Θεόδωρος Γ. Σωτηρόπουλος



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η κατασκευή μιας διάταξης για την παλμοδότηση και τον έλεγχο διπολικών βηματικών κινητήρων. Οι βηματικοί κινητήρες στη σύγχρονη τεχνολογία χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές λόγω της ακρίβειας κίνησης τους, τη μεγάλη ροπή εκκίνησης αλλά και τη ροπή συγκράτησης που διαθέτουν. Ορισμένες εφαρμογές του βρίσκονται σε εκτυπωτές, βαλβίδες ελέγχου, ρομποτικούς βραχίονες, CNC routers και X-Y plotters. Η διάταξη που κατασκευάστηκε οδηγεί διπολικούς βηματικούς κινητήρες μέσω δύο πλήρως ελεγχόμενων γεφυρών. Κάθε μια γέφυρα αποτελείται από τέσσερα ημιαγωγικά στοιχεία BJT τεχνολογίας, τα NPN BD241 και τα PNP BD242 με έξοδο 5 volts και μέγιστη τιμή ρεύματος τα 2,5 amperes. Για τον έλεγχο της διάταξης χρησιμοποιείται ο μικροελεγκτής PIC 16F877 της εταιρίας Microchip ο οποίος προγραμματίστηκε κατάλληλα έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης έλεγχος του βηματικού κινητήρα από τον χρήστη. Οι επιλογές που δίνονται μέσω της οθόνης υγρών κρυστάλλων είναι ανάμεσα σε: α) συνεχόμενης ή ανά βήμα κίνησης, β) δεξιόστροφης ή αριστερόστροφης περιστροφής, γ) τρόπου βηματισμού με ολόκληρο βήμα και διέγερση ενός τυλίγματος, με διέγερση δύο τυλιγμάτων ή μισού βήματος, και δ) επιλογή ταχύτητας περιστροφής. Τα επιμέρους τμήματα της διάταξης τοποθετήθηκαν μαζί με το τροφοδοτικό σε κουτί κατασκευών στο οποίο προσαρμόστηκε η οθόνη υγρών κρυστάλλων μαζί με τα πλήκτρα χειρισμού ώστε να γίνει αυτόνομη ως συσκευή. Αυτή θα δίνει την δυνατότητα σε προπτυχιακούς σπουδαστές του τμήματος να γνωρίσουν τις ιδιαιτερότητες του τρόπου λειτουργίας και ελέγχου των βηματικών κινητήρων.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	viii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.....	11
1.1 Εισαγωγή.....	12
1.2 Γενικά χαρακτηριστικά βηματικών κινητήρων .....	12
1.3 Αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα .....	13
1.3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης .....	16
1.4 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των βηματικών κινητήρων .....	16
1.4.1 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.....	17
1.4.2 Περιγραφή λειτουργίας βηματικών κινητήρων μόνιμου μαγνήτη.....	19
1.4.3 Βηματικοί κινητήρες μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης .....	19
1.4.4 Περιγραφή λειτουργίας βηματικών κινητήρων μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης.....	21
1.4.5 Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες .....	21
1.4.6 Περιγραφή λειτουργίας υβριδικών βηματικών κινητήρων .....	22
1.5 Τυλίγματα-φάσεις βηματικών κινητήρων.....	22
1.5.1 Μονοπολικό βηματικό κινητήρες .....	22
1.5.2 Διπολικό Βηματικό κινητήρες.....	24
1.5.3 Bifilar βηματικό κινητήρες.....	26
1.5.4 Πολυφασικοί βηματικοί κινητήρες .....	27
1.6 Μέθοδοι βηματισμού.....	30
1.6.1 Βήμα με διέγερση ενός τυλίγματος (Wave drive) .....	30
1.6.2 Βήμα με διέγερση δύο τυλιγμάτων (Full step drive) .....	32
1.6.3 Μισό βήμα (Half step) .....	33



1.6.4.Μικροβηματισμός (Microstepping drive) .....	35
1.7 Χαρακτηριστικά.....	36
1.7.1 Στατικά χαρακτηριστικά.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΒΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ .....	40
2.1 Εισαγωγή.....	41
2.2 Κύκλωμα οδήγησης μονοπολικού βηματικού κινητήρα μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης.....	41
2.3 Κύκλωμα οδήγησης μονοπολικού βηματικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη και υβριδικού .....	43
2.4. Πρακτικά κυκλώματα οδήγησης μονοπολικών βηματικών κινητήρων .....	45
2.5 Κύκλωμα οδήγησης διπολικού βηματικού κινητήρα.....	47
2.5.1 Ανάλυση λειτουργίας της γέφυρας .....	49
2.5.2 Πρακτικά κυκλώματα οδήγησης διπολικών βηματικών κινητήρων.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ .....	55
3.1 Εισαγωγή.....	56
3.2 Μικροελεγκτές και Μικροεπεξεργαστές .....	56
3.2 Αρχιτεκτονικές Harvard και Von-Neumann .....	57
3.3 Γενικά χαρακτηριστικά των μικροελεγκτών της οικογένειας PIC .....	58
3.4 Κατηγορίες Μικροελεγκτών PIC.....	59
3.4.1 Αρχιτεκτονική του PIC.....	60
3.4.2. Ο πυρήνας του PIC.....	61
3.4.3. Τα περιφερειακά του PIC.....	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	82
4.1 Εισαγωγή.....	83
4.2 Σχεδιαστικές προδιαγραφές και απαιτήσεις .....	83
4.3 Κύκλωμα ισχύος .....	84
4.3.1 Επιλογή ημιαγωγικών στοιχείων.....	85

4.3.2 Διασύνδεση ημιαγωγικών στοιχείων σε τοπολογία πλήρους ελεγχόμενης γέφυρας.....	87
4.3.3 Κύκλωμα χρονικής καθυστέρησης ανερχόμενου μετώπου παλμού.....	88
4.3.4 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος ισχύος.....	91
4.4 Κύκλωμα ελέγχου .....	93
4.4.1 Διάγραμμα ροής του πλήρους κώδικα .....	95
4.4.2 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου.....	99
4.5 Κύκλωμα απομόνωσης.....	99
4.5.1 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος απομόνωσης .....	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	101
5.1 Εισαγωγή.....	102
5.2 Πειραματική διάταξη συστήματος.....	102
5.3 Παλμογραφήματα του κυκλώματος ελέγχου .....	103
5.4 Παλμογραφήματα του κυκλώματος ισχύος .....	106
5.4.1 Παλμογραφήματα κινητήρα SST40C2010 .....	107
5.4.2 Παλμογραφήματα κινητήρα KM56KM2.....	112
5.5 Συμπεράσματα .....	115
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	117
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	118

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>**  
**ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ**

## 1.1 Εισαγωγή

Ο βηματικός κινητήρας είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που μετατρέπει ηλεκτρικούς παλμούς σε διακεκριμένη μηχανική κίνηση. Είναι σύγχρονοι ηλεκτρικοί κινητήρες και για την εκτέλεση μια πλήρους περιστροφής του άξονά τους απαιτείται ένα μεγάλο πλήθος από βήματα. Η κατασκευή του διακρίνεται από δύο κύρια τμήματα: Τον οπλισμό με τα τυλίγματα που ονομάζεται στάτης και τον δρομέα, κατασκευασμένο από μαγνήτη ή από μαλακό μαγνητικό υλικό, που περιστρέφεται ελεύθερα μέσα στον στάτη. Ο στάτης τροφοδοτείται με μια παλμοσειρά συνεχούς τάσης και δημιουργείται μηχανική περιστροφή του δρομέα. Λειτουργεί βάσει των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων έλξης που δημιουργούνται όταν εφαρμόζεται συνεχής τάση στα τυλίγματα του στάτη, περιστρέφοντας τον δρομέα κατά συγκεκριμένη γωνία που ονομάζεται βηματική. Για παράδειγμα ένας βηματικός κινητήρας με βηματική γωνία ίση με  $1.8^\circ$ , αν τροφοδοτηθούν τα τυλίγματά του με 100 παλμούς, θα κάνει 100 βήματα και θα περιστρέψει τον άξονά του κατά  $180^\circ$  ακριβώς. Με κατάλληλες μεθόδους παλμοδότησης είναι δυνατό να επιτύχουμε κίνηση του δρομέα σε κλάσματα της βηματικής γωνίας, όμως η κίνησή του γίνεται πάντα με βήματα και δεν είναι συνεχόμενη όπως αυτή του σύγχρονου κινητήρα. Ο προσδιορισμός της θέσης του δρομέα μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια, χωρίς την χρήση μηχανισμών ανατροφοδότησης και συστημάτων κλειστού βρόχου.

## 1.2 Γενικά χαρακτηριστικά βηματικών κινητήρων

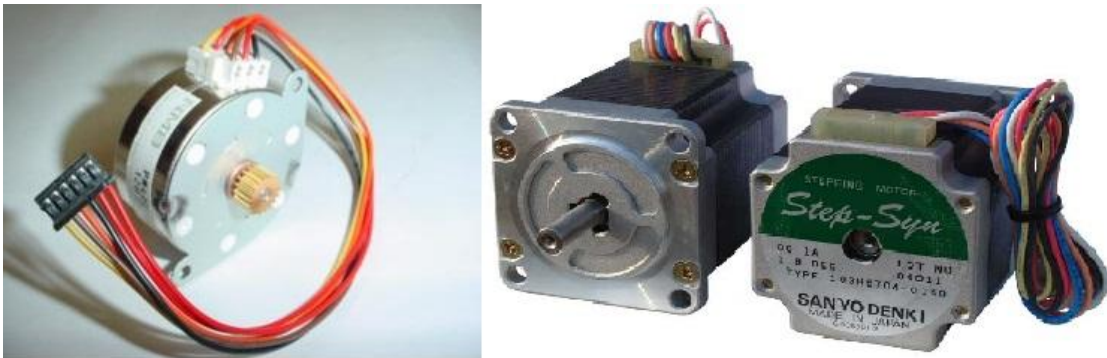
Οι βηματικοί κινητήρες (Σχήμα 1.1) αποτελούν σήμερα μια ιδιαίτερα διαδεδομένη κατηγορία μικρών ηλεκτρικών κινητήρων κυρίως σε συσκευές μέτρησης και ελέγχου, όπου βασική απαίτηση είναι ο ακριβής έλεγχος της θέσης του περιστρεφόμενου άξονα. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι:

- ∅ Εξαιρετική δυναμική απόκριση κατά την εκκίνηση, την πέδηση καθώς και την αλλαγή φοράς περιστροφής.
- ∅ Είναι πολύ αξιόπιστοι καθώς για τη λειτουργία τους, δεν απαιτούνται ολισθαίνουσες ηλεκτρικές επαφές όπως στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Συνεπώς το κόστος συντήρησης εξαρτάται μόνο από τη φθορά

των εδράνων περιστροφής. Επιπλέον λόγω απουσίας των ηλεκτρικών επαφών που ολισθαίνουν (ψήκτρες), οι βηματικοί κινητήρες δεν δημιουργούν σπινθηρισμούς, γεγονός που τους καθιστά απαραίτητους σε εφαρμογές διαχείρισης εύφλεκτων υλικών.

- ∅ Περιστρέφονται με συγκεκριμένη ταχύτητα ανεξάρτητα από το φορτίο, εφόσον αυτό δεν ξεπερνά τη ονομαστική ροπή.
- ∅ Με κατάλληλη παλμοδότηση επιτυγχάνεται ικανή ροπή συγκράτησης, γεγονός πολύ σημαντικό σε εφαρμογές όπως οι ρομποτικοί βραχίονες.
- ∅ Η γωνία περιστροφής του κινητήρα είναι ανάλογη των παλμών τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγάλο εύρος ρύθμισης στροφών, καθώς η ταχύτητα περιστροφής είναι ανάλογη της συχνότητας παλμοδότησης.
- ∅ Επιτυγχάνεται ακρίβεια στη θέση του δρομέα της τάξης 3 – 5% σε κάθε βήμα περιστροφής, χωρίς αυτό το σφάλμα να επενεργεί αθροιστικά από το ένα βήμα στο επόμενο.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά τους καθιστούν ιδανικούς σε εφαρμογές όπως εκτυπωτές, παντογράφους (CNC), ελεγχόμενες βαλβίδες, σκληρούς δίσκους Η/Υ, ρομποτικούς βραχίονες και ιατρικά εργαλεία.



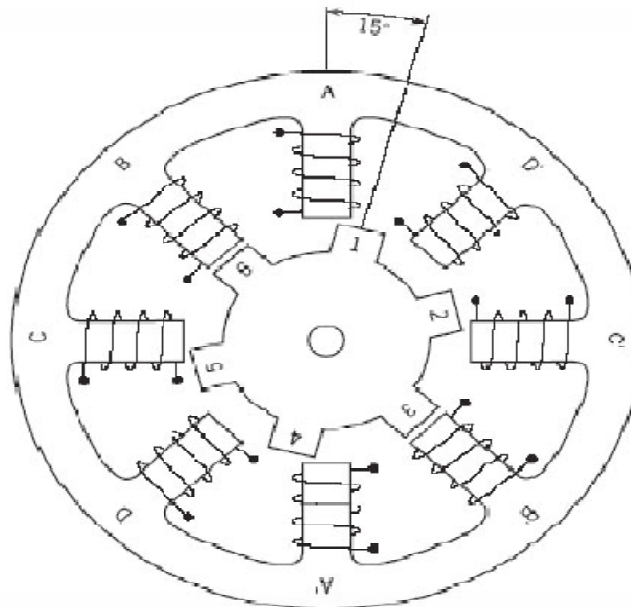
Σχήμα 1.1 Βηματικοί κινητήρες.

### 1.3 Αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα

Οι βηματικοί κινητήρες μετατρέπουν ηλεκτρικούς παλμούς σε μηχανική κίνηση καθορισμένων διακριτών βημάτων. Η διαδοχή των παλμών έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου μέσα στον στάτη, ενώ ο δρομέας που είναι κατασκευασμένος με μόνιμους μαγνήτες ή με πρόσκαιρους μαγνητικούς

πόλους, αναγκάζεται να στραφεί ανταποκρινόμενος στο βηματικά στρεφόμενο πεδίο. Η περιστροφή αυτή οφείλεται σε διακριτές γωνιακές μετατοπίσεις του δρομέα, με μεγάλη ακρίβεια, που καθορίζονται από την κατασκευή του. Η γωνιακή μετατόπιση που δημιουργείται στον άξονα του κινητήρα κάθε φορά που δέχεται ένα παλμό ορίζεται ως βηματική γωνία του κινητήρα.

Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται η τομή ενός βηματικού κινητήρα. Ο κινητήρας αυτός αποτελείται από το δρομέα μαλακού σιδήρου με οδοντωτές απολήξεις και τον στάτη με τέσσερα ζεύγη ηλεκτρομαγνητών: AA', BB', CC' & DD'. Για να κινηθεί ο δρομέας εφαρμόζεται διαδοχικά σε κάθε ένα από τα παραπάνω ζεύγη μια ηλεκτρική τάση. Όταν η ηλεκτρική τάση εφαρμόζεται από το ένα ζεύγος ηλεκτρομαγνητών στο διπλανό του, ο ρότορας μετατοπίζεται κατά  $15^\circ$  λόγω των μαγνητικών δυνάμεων που εφαρμόζονται σε αυτόν.

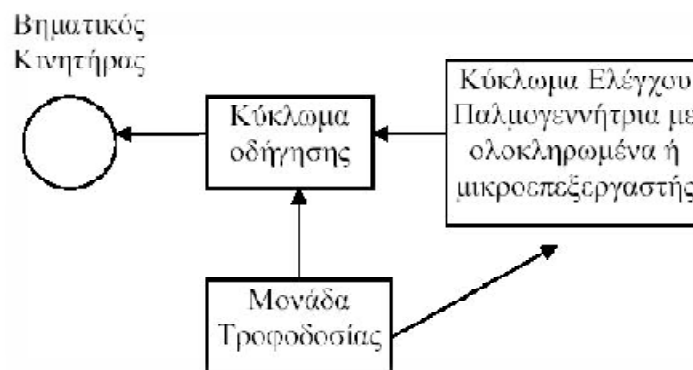


Σχήμα 1.2 Διατομή Βηματικού Κινητήρα.

Πιο αναλυτικά στο στιγμιότυπο της εικόνας παρατηρούμε τη θέση του κινητήρα όταν η ηλεκτρική τάση εφαρμόζεται στο ζεύγος B και B'. Οι οδοντωτές απολήξεις 6 και 3 ευθυγραμμίζονται λόγω της μαγνητικής έλξης, με τους ηλεκτρομαγνήτες BB'. Στην συνέχεια εάν πάψει η εφαρμογή της τάσης στο ζεύγος BB' και μεταφερθεί στο CC' τότε το αποτέλεσμα θα είναι η ευθυγράμμιση των οδοντώσεων 5 και 2 με τα CC' και έτσι ο δρομέας στρέφεται κατά  $15^\circ$  προς τη φορά των δεικτών του ρολογιού

(δεξιόστροφα). Εάν η ηλεκτρική τάση μεταφερθεί στο ζεύγος DD', τότε οι οδοντωτές απολήξεις 4 και 1 του δρομέα θα ευθυγραμμιστούν με τα πηνία DD', οπότε ο δρομέας θα περιστραφεί κατά 15° ακόμα. Για τη συνεχή κίνηση του δρομέα αρκεί η εναλλαγή της εφαρμοζόμενης τάσης στα διαδοχικά ζεύγη πηνίων. Όσο πιο γρήγορα γίνεται η εναλλαγή αυτή, τόσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Για να αντιστραφεί η φορά περιστροφής του κινητήρα αρκεί να αντιστραφεί η διαδοχή με την οποία εφαρμόζεται η ηλεκτρική τάση στα ζεύγη των ηλεκτρομαγνητών.

Η περιστροφή του βηματικού κινητήρα οφείλεται σε παλμούς συνεχούς τάσης, που εφαρμόζονται στα τυλίγματα των φάσεων του με κατάλληλο χρονισμό και με συγκεκριμένη διαδοχή. Η αναγκαία αυτή προϋπόθεση καθιστά υποχρεωτική τη χρήση κυκλώματος ελέγχου καθώς και κυκλώματος οδήγησης σε όλες τις εφαρμογές κίνησης με χρήση βηματικού κινητήρα. Ένα τυπικό σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόχου παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα ελέγχου ανοικτού βρόχου.

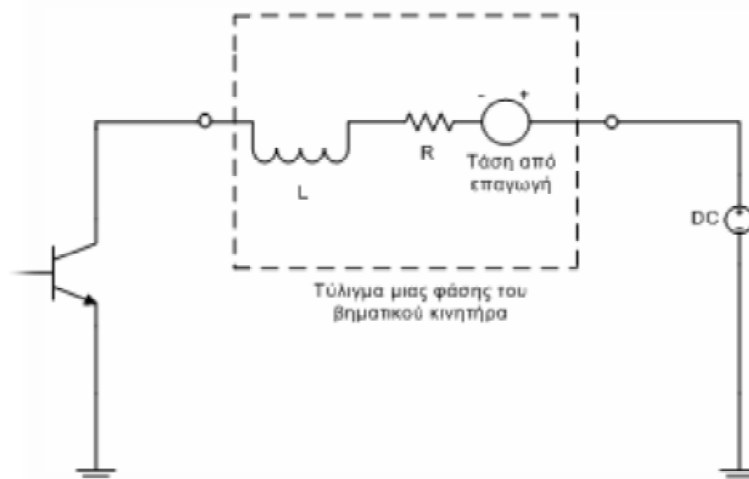
Αρχικά, η μονάδα τροφοδοσίας πρέπει να τροφοδοτεί το κύκλωμα ελέγχου με κατάλληλη τιμή τάσης, συνήθως ίση με 5 V λόγω ολοκληρωμένων ή μικροελεγκτή, καθώς και το κύκλωμα οδήγησης με τιμές τάσης και ρεύματος σύμφωνα με τις ονομαστικές τιμές του κινητήρα που οδηγεί.

Η παλμογεννήτρια του κυκλώματος ελέγχου, δημιουργεί την παλμοσειρά με τον κατάλληλο χρονισμό και την απαραίτητη διαδοχή, για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής, τον αριθμό των βημάτων και τη φορά περιστροφής του βηματικού κινητήρα.

Η λειτουργία του κυκλώματος οδήγησης εξασφαλίζει τον έλεγχο του μαγνητικού πεδίου μέσω της φοράς του ρεύματος που ρέει στις φάσεις του κινητήρα. Το κύκλωμα ελέγχου στέλνει τους παλμούς στο κύκλωμα οδήγησης, το οποίο καθορίζει πότε και με ποιόν τρόπο θα τροφοδοτήσει τα τυλίγματα.

### 1.3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης

Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης ενός βηματικού κινητήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4, δεν είναι τίποτε άλλο από ένα πηνίο σε σειρά με μία αντίσταση. Κατά την λειτουργία του κινητήρα εμφανίζεται και η τάση από επαγωγή στο τύλιγμα που παράγεται λόγω της περιστροφής του δρομέα.



Σχήμα 1.4 Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης του Βηματικού Κινητήρα.

## 1.4 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των βηματικών κινητήρων

Με την πρώτη ματιά οι βηματικοί κινητήρες ξεχωρίζουν από τους συνηθισμένους κινητήρες στο μέγεθος, στο βάρος αλλά και στο πλήθος των ακροδεκτών τους. Στην πραγματικότητα οι ουσιαστικές διαφορές τους βρίσκονται στο εσωτερικό τους. Για την κατανόηση της λειτουργίας τους και την αξιολόγησή τους, ακολουθεί αναφορά στους διάφορους τύπους βηματικών κινητήρων.

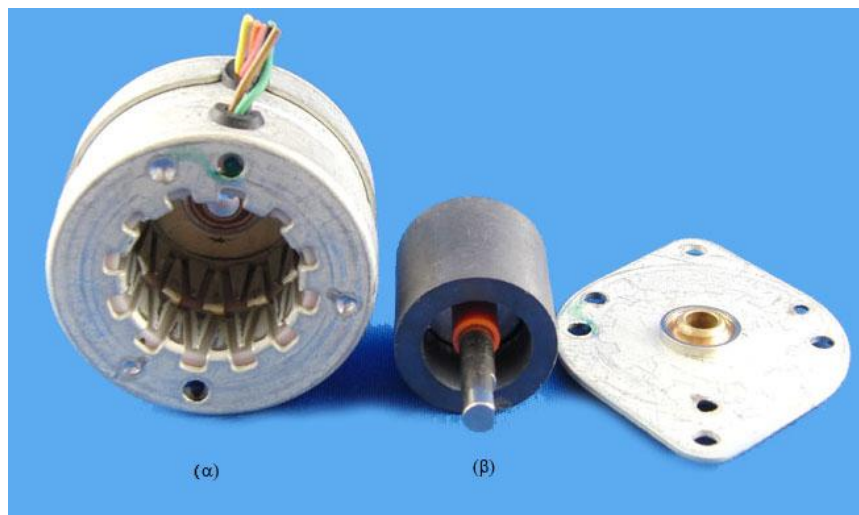


Όσον αφορά την κατασκευή τους, μπορούμε να διακρίνουμε τους βηματικούς κινητήρες σε τρεις κατηγορίες.

- Ø Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.
- Ø Βηματικοί κινητήρες μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης.
- Ø Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες.

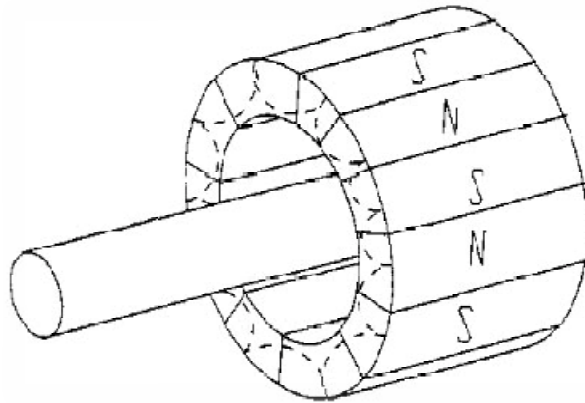
#### 1.4.1 Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη

Η κατηγορία αυτή αναφέρεται σε βηματικούς κινητήρες που χρησιμοποιούν μόνιμο μαγνήτη στη κατασκευή του δρομέα (Σχήμα 1.5.β). Έχουν απλή κατασκευή με μικρό κόστος, όμως παρουσιάζουν μικρή ροπή και χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, συγκρινόμενοι με τους άλλους τύπους βηματικών κινητήρων.



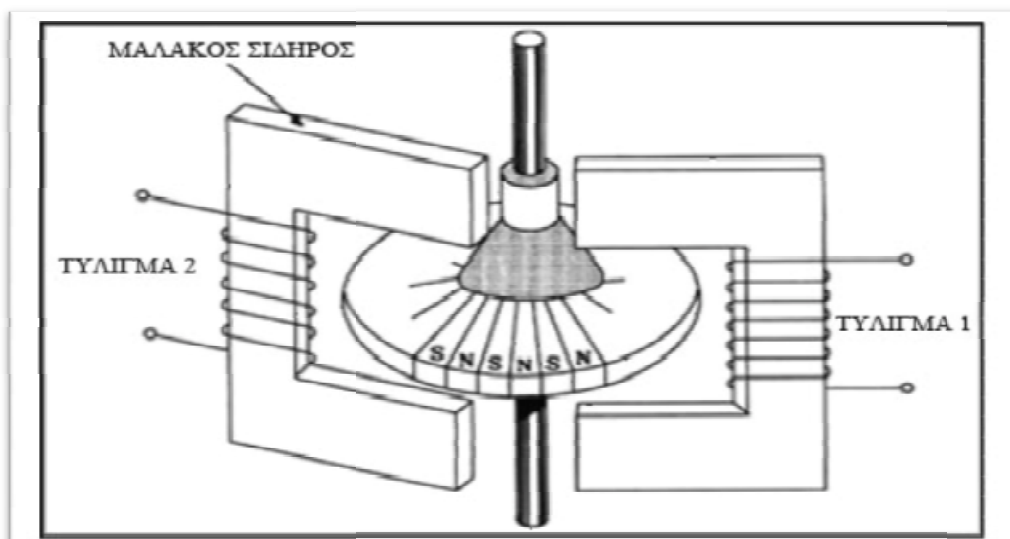
Σχήμα 1.5 Βηματικός Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη: (α) Στάτης, (β) Δρομέας.

Εγκάρσιες τομές μόνιμου μαγνητικού υλικού προσαρμόζονται κατάλληλα δημιουργώντας τους μαγνητικούς πόλους που εναλλάσσονται περιμετρικά του δρομέα (Σχήμα 1.6). Ο στάτης αποτελείται από δύο χαλύβδινα τμήματα που σχηματίζουν εσωτερικά διαγώνιες εγκοπές (Σχήμα 1.5.α).

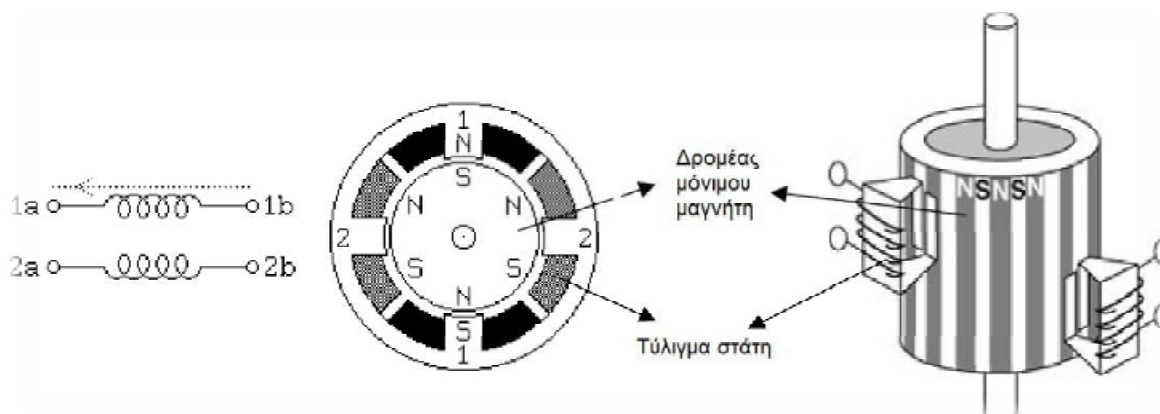


Σχήμα 1.6 Εναλλαγή μαγνητικών πόλων σε δρομέα Μόνιμου Μαγνήτη.

Η πιο πρόσφατη εξέλιξη στους βηματικούς κινητήρες μόνιμου μαγνήτη είναι αυτή του δρομέα λεπτού δίσκου (Σχήμα 1.7). Αυτή η ιδιομορφία στη κατασκευή του δρομέα παρουσιάζει μικρότερες απώλειες θερμότητας και συνεπώς καλύτερη απόδοση. Ο δίσκος του δρομέα είναι κατασκευασμένος από κράμα κοβαλτίου με χάλυβα.



Σχήμα 1.7 Βηματικός Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη – Δρομέας Λεπτού Δίσκου.



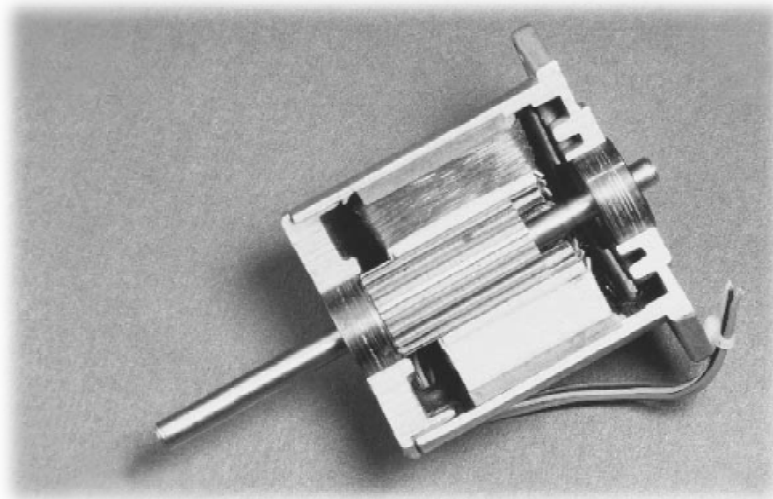
Σχήμα 1.8 Σχηματική αναπαράσταση βηματικού κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη.

#### 1.4.2 Περιγραφή λειτουργίας βηματικών κινητήρων μόνιμου μαγνήτη

Όταν σε ένα από τα τυλίγματα του στάτη εφαρμοστεί συνεχής τάση, ο δρομέας θα κινηθεί κατάλληλα ώστε να ευθυγραμμιστούν οι μαγνητικοί του πόλοι με το πεδίο του στάτη. Το επόμενο βήμα θα πραγματοποιηθεί όταν σταματήσει η εφαρμοζόμενη τάση στο τύλιγμα και εφαρμοστεί στο αμέσως επόμενο. Στα τυλίγματα του στάτη που δεν τροφοδοτούνται με τάση, μια μικρή μαγνητική δύναμη αναπτύσσεται ανάμεσα στον μόνιμο μαγνήτη του δρομέα με τον στάτη, που ονομάζεται παραμένουσα ή ανασταλτική ροπή (Residual ή Detent torque). Η ροπή αυτή μπορεί να παρατηρηθεί όταν στραφεί ο βηματικός κινητήρας με το χέρι και ποσοτικά είναι περίπου ίση με το 1/10 της ροπής συγκράτησης. Οι τυπικές βηματικές γωνίες σε αυτού του είδους κινητήρες κυμαίνονται από  $7.5^\circ$  μέχρι  $15^\circ$ .

#### 1.4.3 Βηματικοί κινητήρες μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης

Οι βηματικοί κινητήρες μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης (Σχήμα 1.9) παρουσιάζουν διαφορές τόσο στη κατασκευή τους όσο και στα χρησιμοποιούμενα υλικά, σε σύγκριση με τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Ο στάτης αποτελείται από σπείρες χάλκινου σύρματος, τυλιγμένες σε μονωμένα ελάσματα χάλυβα, τα οποία είναι τοποθετημένα περιμετρικά του κύριου πλαισίου και δημιουργούν αντιδιαμετρικούς πόλους.



*Σχήμα 1.9 Τομή Βηματικού Κινητήρα Μεταβαλλόμενης Μαγνητικής Αντίστασης.*

Ο δρομέας σε αυτή τη περίπτωση είναι κατασκευασμένος από μαλακό σίδηρο, ώστε να έχει υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και σχηματίζει εγκοπές και οδοντωτές απολήξεις (δόντια) περιμετρικά. Το πλήθος των απολήξεων του δρομέα και του στάτη είναι αυτό που καθορίζει τη βηματική γωνία όπως εκφράζεται και από την παρακάτω εξίσωση.

\_\_\_\_\_

Όπου :  $\Psi$       Βηματική γωνία σε μοίρες,  
                 Πλήθος οδοντωτών απολήξεων του στάτη,  
                 Πλήθος οδοντωτών απολήξεων του δρομέα.

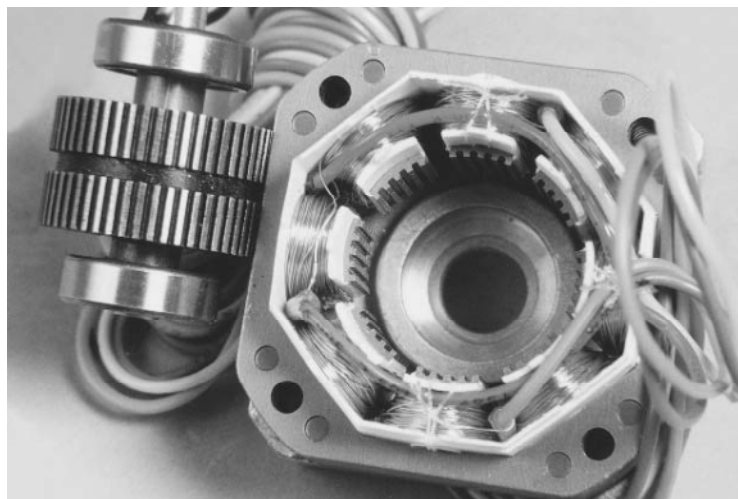
Όπως παρατηρείται από την εξίσωση, ο αριθμός των οδοντωτών απολήξεων του στάτη είναι πάντα μεγαλύτερος από αυτών του δρομέα, επομένως σε κάθε βήμα του κινητήρα υπάρχουν απολήξεις που δεν είναι ευθυγραμμισμένες με αυτές του στάτη.

#### 1.4.4 Περιγραφή λειτουργίας βηματικών κινητήρων μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης

Όταν σε μια φάση του στάτη εφαρμοστεί τάση, δημιουργείται ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο έλκει τον δρομέα. Οι οδοντωτές απολήξεις του δρομέα που βρίσκονται πλησίον των πόλων του πεδίου, τείνουν να ευθυγραμμιστούν με αυτούς. Όταν επέλθει η κίνηση προς τους πόλους του στάτη και οι απολήξεις του δρομέα έχουν ευθυγραμμιστεί, η τιμή της μαγνητικής αντίστασης που προβάλλει ο δρομέας στη μαγνητική ροή ελαχιστοποιείται. Ένα βήμα επιτυγχάνεται όταν διακοπεί η τροφοδοσία στη φάση και τροφοδοτηθεί η αμέσως επόμενη δημιουργώντας εκ νέου μια θέση ελάχιστης μαγνητικής αντίστασης.

#### 1.4.5 Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες

Ο όρος “υβριδικός” οφείλεται στο γεγονός ότι ο κινητήρας λειτουργεί συνδυάζοντας τις αρχές των βηματικών κινητήρων μόνιμου μαγνήτη και μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης. Οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες είναι γενικά κατασκευασμένοι όπως στο Σχήμα 1.10. Έχουν στάτη και δρομέα παρόμοιο με τους βηματικούς κινητήρες μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης, με εμφανείς πόλους και πολλαπλές απολήξεις ανά πόλο.



Σχήμα 1.10 Υβριδικός Βηματικός Κινητήρας.

Η διαφορά τους συνίσταται στην ενσωμάτωση μόνιμου μαγνήτη στο δρομέα, η οποία μάλιστα εξασφαλίζει στον κινητήρα καλύτερα χαρακτηριστικά απόσβεσης και μεγαλύτερη ροπή. Άλλο ένα χαρακτηριστικό των υβριδικών κινητήρων είναι η παρουσία δυο τυλιγμάτων διαφορετικών φάσεων στον ίδιο πόλο. Η κατασκευή αυτή είναι γνωστή και σαν bifilar.

#### **1.4.6 Περιγραφή λειτουργίας υβριδικών βηματικών κινητήρων**

Όταν μια φάση του στάτη αποτελούμενη από δύο ή περισσότερους πόλους ενεργοποιηθεί, οι οδοντωτές απολήξεις σε κάθε μισό του δρομέα ευθυγραμμίζονται με αυτά των πόλων του στάτη. Η μαγνητική ροή, που δημιουργείται από ένα πόλο του στάτη, διέρχεται μέσω του μαλακού σιδήρου του δρομέα και καταλήγει στον απέναντι πόλο. Μια νέα θέση του δρομέα ή βήμα παράγεται με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε και στους άλλους τύπους βηματικών κινητήρων. Τυπικές βηματικές γωνίες σε αυτού του είδους κινητήρες κυμαίνονται από  $0.9^{\circ}$  μέχρι  $3.6^{\circ}$ .

### **1.5 Τυλίγματα-φάσεις βηματικών κινητήρων**

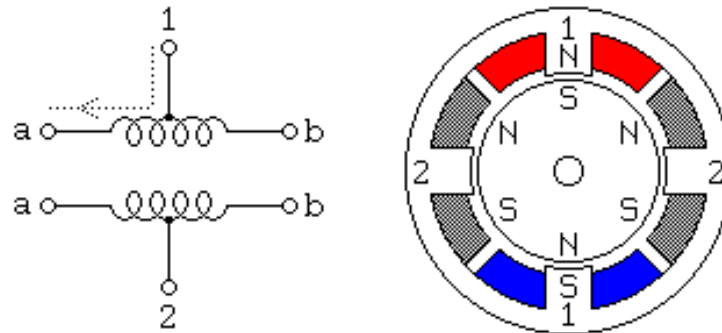
Οι βηματικοί κινητήρες χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με την κατασκευή των τυλιγμάτων τους και κατ' επέκταση με τον τρόπο οδήγησής τους και διακρίνονται σε :

- Ø Μονοπολικούς (unipolar) βηματικούς κινητήρες,
- Ø Διπολικούς (bipolar) βηματικούς κινητήρες,
- Ø Βηματικούς κινητήρες με διπλά τυλίγματα ανά πόλο (Bifilar) και
- Ø Πολυφασικούς (Multiphase) βηματικούς Κινητήρες.

#### **1.5.1 Μονοπολικοί βηματικοί κινητήρες**

Οι μονοπολικοί βηματικοί κινητήρες αποτελούνται από δύο τυλίγματα τα οποία έχουν και μια μεσαία σύνδεση-επαφή. Για να γίνει εύκολα κατανοητό μπορεί να

παρομοιαστεί το τύλιγμα του κινητήρα σαν μετασχηματιστής με μεσαία λήψη. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 1.11 οι διαθέσιμοι ακροδέκτες ενός μονοπολικού κινητήρα είναι έξι. Οι μεσαίες συνδέσεις μπορούν να καταλήγουν εξωτερικά του κινητήρα σαν δύο ξεχωριστά καλώδια ή να συνδέονται εσωτερικά μεταξύ τους και να καταλήγουν σε ένα εξωτερικά. Με αυτόν τον τρόπο συναντάμε μονοπολικούς βηματικούς κινητήρες με πέντε ή έξι ακροδέκτες.



Σχήμα 1.11 Τυλίγματα Μονοπολικού Βηματικού Κινητήρα.

Ανεξάρτητα από τον αριθμό των ακροδεκτών που καταλήγουν εξωτερικά του κινητήρα, η οδήγηση τους γίνεται με τον ίδιο τρόπο. Ο ακροδέκτης της μεσαίας σύνδεσης σε περιπτώσεις κινητήρων με πέντε καλώδια ή οι ακροδέκτες των μεσαίων συνδέσεων σε κινητήρες με έξι καλώδια, συνδέονται με τη θετική (+) τροφοδοσία και τα καλώδια από τις άκρες των τυλιγμάτων γειώνονται (-) διαδοχικά. Οι πολικότητες αυτές παραμένουν ίδιες κατά τη λειτουργία ενός μονοπολικού κινητήρα, όπως και η φορά του ρεύματος στα τυλίγματά του.

Οι μονοπολικοί βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη και οι αντίστοιχοι υβριδικοί λειτουργούν διαφορετικά σε σχέση με τους μονοπολικούς βηματικούς κινητήρες με μεταβαλλόμενη μαγνητική αντίσταση. Συγκεκριμένα δεν λειτουργούν ελαχιστοποιώντας την μαγνητική αντίσταση μεταξύ των πόλων του στάτη και των οδοντικών απολήξεων του δρομέα, αλλά με βάση την έλξη των βόρειων ή των νότιων πόλων του μόνιμα μαγνητισμένου δρομέα. Η φορά του ρεύματος στα τυλίγματα των μονοπολικών κινητήρων καθώς και η συμπεριφορά τους σαν βόρειος ή νότιος πόλος εξαρτάται από το τμήμα του τυλιγματος που τροφοδοτείται. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.11, το τύλιγμα 1 μοιράζεται ανάμεσα στο πάνω και στο κάτω μέρος του

στάτη, ενώ το τύλιγμα 2 ανάμεσα στο αριστερό και δεξί μέρος του. Ο δρομέας είναι ένας μόνιμος μαγνήτης με έξι πόλους, τρεις βόρειους και τρεις νότιους.

Για να περιστραφεί ένας μονοπολικός βηματικός κινητήρας δεξιόστροφα θα πρέπει η τροφοδοσία των τυλιγμάτων του να έχει μια συγκεκριμένη ακολουθία που παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.1. Με τον αριθμό 1 ορίζεται η τροφοδοσία του αντίστοιχου τυλιγματος.

Βήμα	Τύλιγμα 1a	Τύλιγμα 2a	Τύλιγμα 1b	Τύλιγμα 2b
1°	1	0	0	0
2°	0	1	0	0
3°	0	0	1	0
4°	0	0	0	1

Πίνακας 1.1. Ακολουθία βημάτων για δεξιόστροφη περιστροφή του μονοπολικού βηματικού κινητήρα.

Η συνεχόμενη δεξιόστροφη περιστροφή του κινητήρα επιτυγχάνεται με την διαδοχική επανάληψη αυτών των τεσσάρων βημάτων, ενώ για την αριστερόστροφη η ακολουθία είναι η ανάστροφη της δεξιόστροφης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.2.

Βήμα	Τύλιγμα 1a	Τύλιγμα 2a	Τύλιγμα 1b	Τύλιγμα 2b
1°	0	0	0	1
2°	0	0	1	0
3°	0	1	0	0
4°	1	0	0	0

Πίνακας 1.2. Ακολουθία βημάτων για αριστερόστροφη περιστροφή του μονοπολικού βηματικού κινητήρα.

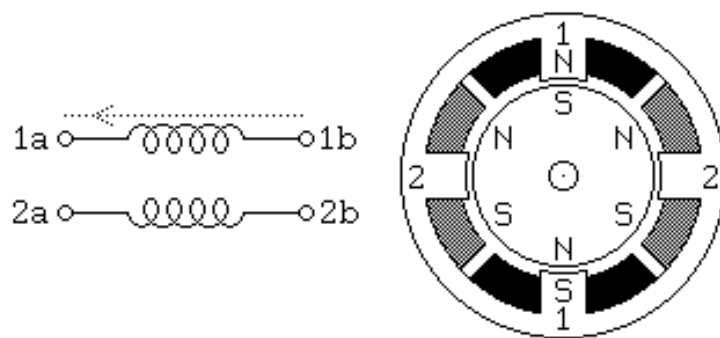
### 1.5.2 Διπολικοί Βηματικοί κινητήρες

Οι διπολικοί βηματικοί κινητήρες αποτελούνται από δύο τυλίγματα τα οποία καταλήγουν εξωτερικά σε τέσσερις ακροδέκτες. Από το πλήθος των ακροδεκτών



γίνεται εύκολα κατανοητό ότι οι διπολικοί βηματικοί κινητήρες δεν έχουν μεσαία λήψη. Για το λόγο αυτό, το ρεύμα διαρρέει ολόκληρο το τύλιγμα και όχι το μισό όπως στη περίπτωση των μονοπολικών, προσδίδοντας στον κινητήρα μεγαλύτερη ροπή στρέψης, σε σύγκριση με έναν αντίστοιχου μεγέθους μονοπολικό. Το πλεονέκτημα αυτό αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι οι διπολικοί κινητήρες χρειάζονται πιο πολύπλοκο κύκλωμα ελέγχου, το οποίο θα πρέπει να αντιστρέφει τη πολικότητα στην έξοδό του, αλλάζοντας τη φορά του ρεύματος στα τυλίγματα.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται ένας διπολικός βηματικός κινητήρας  $30^\circ$  ανά βήμα. Το ρεύμα ρέει από δεξιά προς τα αριστερά στο τύλιγμα 1, όταν ο ακροδέκτης 1α είναι θετικός και ο 1β είναι αρνητικός. Αντίστοιχα το ρεύμα θα αλλάξει φορά όταν αντιστραφούν οι πολικότητες, συνθήκη αναγκαία για την περιστροφή ενός διπολικού κινητήρα.



Σχήμα 1.12 Τυλίγματα Διπολικού Βηματικού Κινητήρα.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα το τύλιγμα 1 μοιράζεται μεταξύ των πόλων του στάτη στο πάνω και κάτω τμήμα του, ενώ το τύλιγμα 2 μεταξύ των πόλων στο αριστερό και δεξί του τμήμα. Ο δρομέας είναι μόνιμος μαγνήτης έξι πόλων, τρεις βόρειους και τρεις νότιους.

Για να περιστραφεί ένας διπολικός βηματικός κινητήρας, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, θα πρέπει το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα να αλλάζει κατεύθυνση. Ορίζοντας με τα πρόσημα τις πολικότητες των τυλιγμάτων, η ακολουθία των βημάτων για δεξιόστροφη περιστροφή είναι αυτή του Πίνακα 1.3.

Βήμα	Τύλιγμα 1a	Τύλιγμα 1b	Τύλιγμα 2a	Τύλιγμα 2b
1°	+	-	-	-
2°	-	-	+	-
3°	-	+	-	-
4°	-	-	-	+

*Πίνακας 1.3. Ακολουθία βημάτων για δεξιόστροφη περιστροφή του διπολικού βηματικού κινητήρα.*

Για την αριστερόστροφη περιστροφή αρκεί να αντιστραφεί η ακολουθία των βημάτων σύμφωνα με τον Πίνακα 1.4.

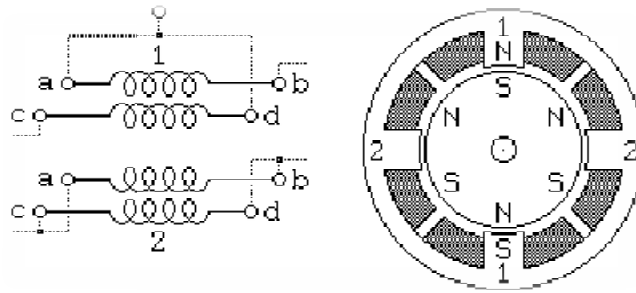
Βήμα	Τύλιγμα 1a	Τύλιγμα 1b	Τύλιγμα 2a	Τύλιγμα 2b
1°	-	-	-	+
2°	-	+	-	-
3°	-	-	+	-
4°	+	-	-	-

*Πίνακας 1.4. Ακολουθία βημάτων για αριστερόστροφη περιστροφή του διπολικού βηματικού κινητήρα.*

Όπως και στην περίπτωση των μονοπολικών έτσι και εδώ, η συνεχόμενη περιστροφή του κινητήρα επιτυγχάνεται με την επανάληψη αυτών των τεσσάρων βημάτων δεξιόστροφα είτε αριστερόστροφα.

### 1.5.3 Bifilar βηματικοί κινητήρες

Οι Bifilar είναι κατασκευαστικά πανομοιότυποι με τους διπολικούς βηματικούς κινητήρες, με τη διαφορά ότι κάθε τύλιγμα αποτελείται από δύο μικρότερα (Σχήμα 1.13). Στους κινητήρες αυτούς καταλήγουν οκτώ ακροδέκτες εξωτερικά. Η ιδιαιτερότητα αυτή, τους δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν είτε ως μονοπολικοί, είτε ως διπολικοί.

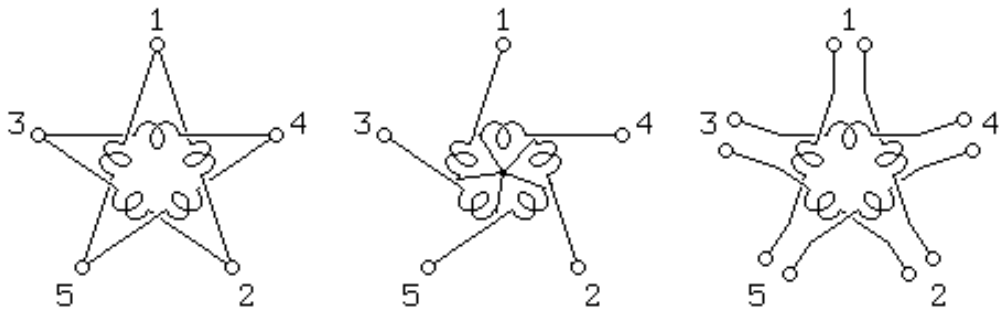


Σχήμα 1.13 Τυλίγματα Bifilar Βηματικού Κινητήρα.

Για να λειτουργήσουν ως μονοπολικοί, τα δύο μικρότερα τυλίγματα συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους χρησιμοποιώντας τη σύνδεση αυτή ως μεσαία, όπως παρατηρείται και στην συνδεσμολογία 1 του Σχήματος 1.13. Αντίθετα, στη συνδεσμολογία 2 η σύνδεση των δύο μικρότερων τυλιγμάτων γίνεται παράλληλα, επιτρέποντας τη λειτουργία του κινητήρα με διπολική οδήγηση. Σε διαφορετική περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η σύνδεση του τυλιγματος 1, σε σειρά δηλαδή, με διπολική οδήγηση η οποία συνιστάται κυρίως όταν ο κινητήρας καλείται να εργαστεί με μεγαλύτερη από την ονομαστική του τάση.

#### 1.5.4 Πολυφασικοί βηματικοί κινητήρες

Μια λιγότερο διαδεδομένη κατηγορία βηματικών κινητήρων μόνιμου μαγνήτη και υβριδικών, είναι κατασκευασμένη με τα τυλίγματα του στάτη συνδεδεμένα κυκλικά, με κεντρική σύνδεση-λήψη ανά ζεύγος τυλιγμάτων ή με ένα μόνο ακροδέκτη στα άκρα του τυλιγματος και τις υπόλοιπες συνδέσεις εσωτερικά. Όταν ο κινητήρας μας είναι τριφασικός οι συνδέσεις αυτές χαρακτηρίζονται ως συνδέσεις αστέρα ή τριγώνου αλλά υπάρχουν και βηματικοί κινητήρες πέντε φάσεων όπως φαίνονται στο Σχήμα.1.14 που ακολουθεί.



Σχήμα 1.14 Πολυφασικά τυλίγματα βηματικών κινητήρων.

Ορισμένοι πολυφασικοί κινητήρες εκθέτουν όλους τους ακροδέκτες των τυλιγμάτων τους, αφήνοντας τον χρήστη να αποφασίσει για συνδεσμολογία είτε αστέρα, είτε τριγώνου ή οδήγηση κάθε τυλίγματος ανεξάρτητα. Η οδήγηση τους είναι παρόμοια με αυτήν των διπολικών, γιατί και σε αυτή την περίπτωση η αλλαγή φοράς του ρεύματος είναι αναγκαία για την περιστροφή τους.

Σε ένα βηματικό κινητήρα πέντε φάσεων πρέπει να γίνει η ακόλουθη διαδοχή δέκα βημάτων στους ακροδέκτες του ώστε να περιστραφεί δεξιόστροφα.

Βήμα	Ακροδέκτης 1	Ακροδέκτης 2	Ακροδέκτης 3	Ακροδέκτης 4	Ακροδέκτης 5
1°	+	-	+	+	-
2°	+	-	-	+	-
3°	+	+	-	+	-
4°	-	+	-	+	-
5°	-	+	-	+	+
6°	-	+	-	-	+
7°	-	+	+	-	+
8°	-	-	+	-	+
9°	+	-	+	-	+
10°	+	-	+	-	-

Πίνακας 1.5. Ακολουθία βημάτων για δεξιόστροφη περιστροφή του βηματικού κινητήρα πέντε φάσεων.

Για τη δεξιόστροφη περιστροφή ενός τριφασικού βηματικού κινητήρα απαιτείται η ακολουθία των έξι βημάτων του Πίνακα 1.6.

Βήμα	Ακροδέκτης 1	Ακροδέκτης 2	Ακροδέκτης 3
1°	+	-	+
2°	+	-	-
3°	+	+	-
4°	-	+	-
5°	-	+	+
6°	-	-	+

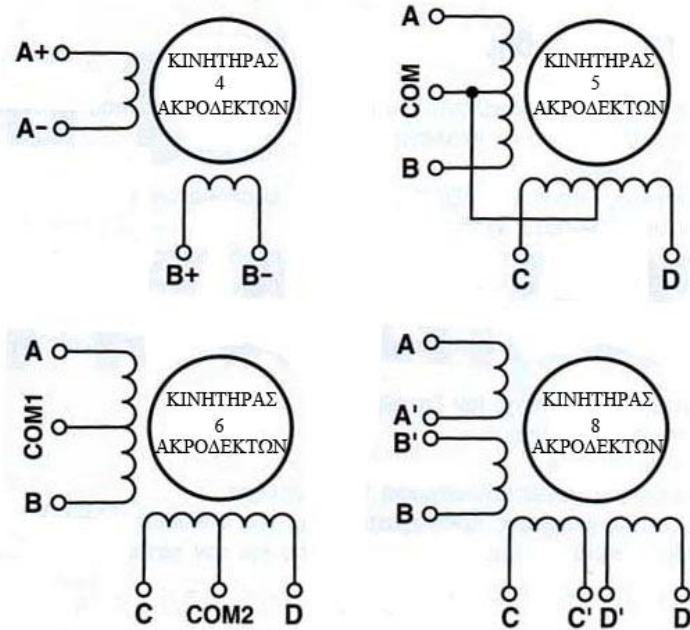
Πίνακας 1.6. Ακολουθία βημάτων για δεξιόστροφη περιστροφή του τριφασικού βηματικού κινητήρα.

Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των πολυφασικών βηματικών κινητήρων, η συνεχής περιστροφή ή η αλλαγή φοράς περιστροφής πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο με τους υπόλοιπους, δηλαδή με την επανάληψη των απαραίτητων βημάτων ή με την αντιστροφή αυτών αντίστοιχα.

Γενικότερα, οι βηματικοί κινητήρες που διατίθενται στο εμπόριο παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.7 ενώ οι βασικές συνδεσμολογίες τους απεικονίζονται στο Σχήμα 1.15.

Ακροδέκτες Βηματικού Κινητήρα	Συνδεσμολογία
4	Διπολική
5	Μονοπολική
6	Μονοπολική και Διπολική (σύνδεση σειράς)
8	Μονοπολική και Διπολική (σύνδεση σειράς ή παράλληλη)

Πίνακας 1.7 Συνδεσμολογία βηματικών κινητήρων σύμφωνα με πλήθος ακροδεκτών.



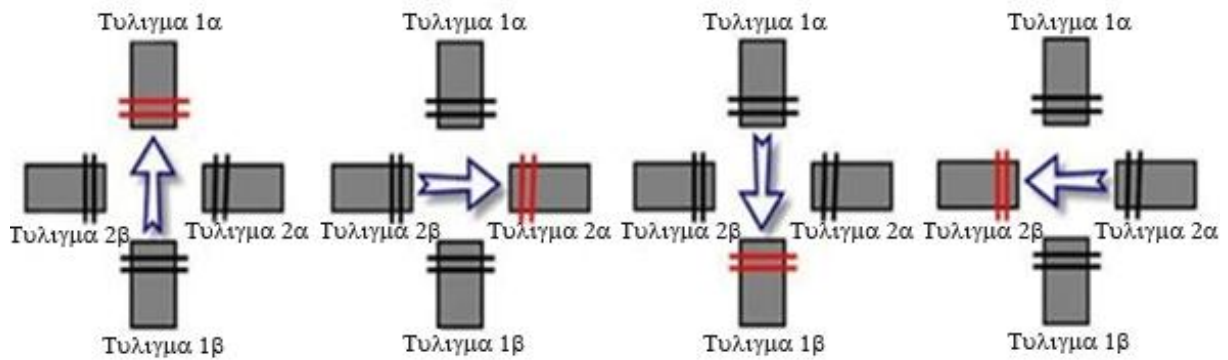
Σχήμα 1.17 Βασικές συνδεσμολογίες βηματικών κινητήρων.

## 1.6 Μέθοδοι βηματισμού

Οι διαφορετικές μέθοδοι οδήγησης έγκεινται στις διάφορες συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων του στάτη. Οι μέθοδοι βηματισμού όμως είναι κοινές σε όλους τους τρόπους οδήγησης και δεν εξαρτώνται από τις συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων του στάτη. Η επίτευξη του επιθυμητού βήματος εξαρτάται από την διαδοχή των παλμών στα τυλίγματα και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα από την συχνότητα των παλμών.

### 1.6.1 Βήμα με διέγερση ενός τυλίγματος (Wave drive)

Η πιο απλή μέθοδος βηματισμού ενός βηματικού κινητήρα είναι με διέγερση ενός τυλίγματος του στάτη κάθε φορά που στέλνεται παλμός. Στους διπολικούς και μονοπολικούς βηματικούς κινητήρες η διέγερση κάθε φορά ενός τυλίγματος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αποδιδόμενης ροπής τους κατά 50%. Στο Σχήμα 1.18 αναπαριστάται ο βηματισμός με διέγερση ενός τυλίγματος.



Σχήμα 1.18 Σχηματική αναπαράσταση βήματος με διέγερση ενός τυλίγματος.

Στην περίπτωση ενός μονοπολικού βηματικού κινητήρα, ο βηματισμός του με διέγερση ενός τυλίγματος θα πρέπει να γίνει σύμφωνα με τον Πίνακα 1.8

Παλμός	Τύλιγμα 1α	Τύλιγμα 2α	Τύλιγμα 1β	Τύλιγμα 2β
1 <sup>ος</sup>	1	0	0	0
2 <sup>ος</sup>	0	1	0	0
3 <sup>ος</sup>	0	0	1	0
4 <sup>ος</sup>	0	0	0	1

Πίνακας 1.8. Ακολουθία παλμών μονοπολικού βηματικού κινητήρα με διέγερση ενός τυλίγματος.

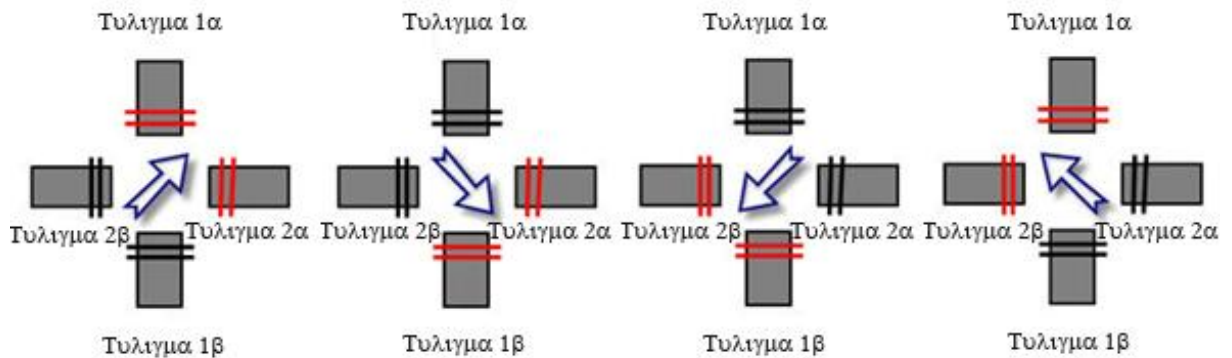
Ενώ στη περίπτωση ενός διπολικού βηματικού κινητήρα, ο βηματισμός του με διέγερση ενός τυλίγματος θα πρέπει να γίνει σύμφωνα με τον Πίνακα 1.9.

Παλμός	Τύλιγμα 1α	Τύλιγμα 2α	Τύλιγμα 1β	Τύλιγμα 2β
1 <sup>ος</sup>	+	-	-	-
2 <sup>ος</sup>	-	+	-	-
3 <sup>ος</sup>	-	-	+	-
4 <sup>ος</sup>	-	-	-	+

Πίνακας 1.9. Ακολουθία παλμών διπολικού βηματικού κινητήρα με διέγερση ενός τυλίγματος.

### 1.6.2 Βήμα με διέγερση δύο τυλιγμάτων (Full step drive)

Με αυτή τη μέθοδο βηματισμού τροφοδοτούνται συγχρόνως δύο τυλιγμάτων σε κάθε βήμα και για το λόγο αυτό επιτυγχάνεται η μέγιστη ροπή του βηματικού



Σχήμα 1.19. Σχηματική αναπαράσταση βήματος με διέγερση δύο τυλιγμάτων.

κινητήρα. Στο Σχήμα 1.19 που ακολουθεί αναπαριστάται ο βηματισμός με διέγερση δύο τυλιγμάτων.

Στη περίπτωση ενός μονοπολικού βηματικού κινητήρα, ο βηματισμός του με διέγερση δύο τυλιγμάτων θα πρέπει να γίνει σύμφωνα με τον Πίνακα 1.10.

Παλμός	Τύλιγμα 1α	Τύλιγμα 2α	Τύλιγμα 1β	Τύλιγμα 2β
1 <sup>ος</sup>	1	1	0	0
2 <sup>ος</sup>	0	1	1	0
3 <sup>ος</sup>	0	0	1	1
4 <sup>ος</sup>	1	0	0	1

Πίνακας 1.10. Ακολουθία παλμών μονοπολικού βηματικού κινητήρα με διέγερση δύο τυλιγμάτων.

Ενώ στη περίπτωση ενός διπολικού βηματικού κινητήρα, ο βηματισμός του με διέγερση δύο τυλιγμάτων θα πρέπει να γίνει σύμφωνα με τον Πίνακα 1.11.

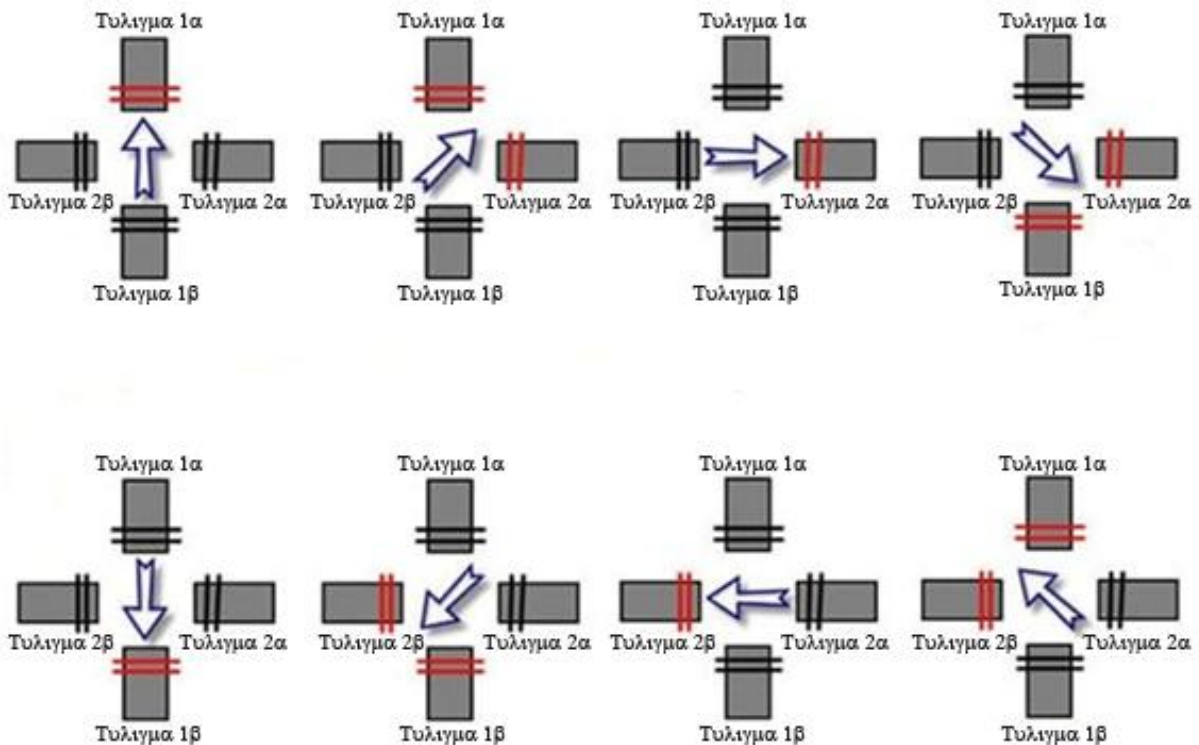


Παλμός	Τύλιγμα 1α	Τύλιγμα 2α	Τύλιγμα 1β	Τύλιγμα 2β
1 <sup>ος</sup>	+	+	-	-
2 <sup>ος</sup>	-	+	+	-
3 <sup>ος</sup>	-	-	+	+
4 <sup>ος</sup>	+	-	-	+

Πίνακας 1.11. Ακολουθία παλμών διπολικού βηματικού κινητήρα με διέγερση δύο τυλιγμάτων.

### 1.6.3 Μισό βήμα (Half step)

Η μέθοδος αυτή συνδυάζει τις δύο προηγούμενες και η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι για κάθε παλμό που εφαρμόζεται στα τυλιγμάτων του στάτη, ο δρομέας περιστρέφεται με τη μισή βηματική γωνία. Για παράδειγμα ένας κινητήρας βηματικής γωνίας  $7^\circ$  με βηματισμό μισού βήματος θα περιστρέφεται κατά  $3.5^\circ$  ανά παλμό. Στο Σχήμα 1.20 που ακολουθεί αναπαριστάται ο βηματισμός με μισό βήμα.



Σχήμα 1.20. Σχηματική αναπαράσταση μισού βήματος.

Στη περίπτωση ενός μονοπολικού βηματικού κινητήρα, ο βηματισμός του με μισό βήμα θα πρέπει να γίνει σύμφωνα με τον Πίνακα 1.12.

Παλμός	Τύλιγμα 1α	Τύλιγμα 2α	Τύλιγμα 1β	Τύλιγμα 2β
1 <sup>ος</sup>	1	0	0	0
2 <sup>ος</sup>	1	1	0	0
3 <sup>ος</sup>	0	1	0	0
4 <sup>ος</sup>	0	1	1	0
5 <sup>ος</sup>	0	0	1	0
6 <sup>ος</sup>	0	0	1	1
7 <sup>ος</sup>	0	0	0	1
8 <sup>ος</sup>	1	0	0	1

Πίνακας 1.12. Ακολουθία παλμών μονοπολικού βηματικού κινητήρα με βηματισμό μισού βήματος.

Ενώ στη περίπτωση ενός διπολικού βηματικού κινητήρα, ο βηματισμός του με μισό βήμα θα πρέπει να γίνει σύμφωνα με τον Πίνακα 1.13.

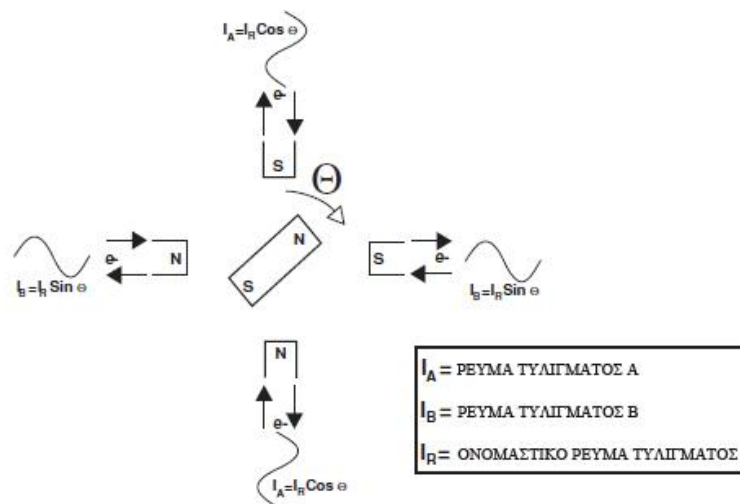
Παλμός	Τύλιγμα 1α	Τύλιγμα 2α	Τύλιγμα 1β	Τύλιγμα 2β
1 <sup>ος</sup>	+	-	-	-
2 <sup>ος</sup>	+	+	-	-
3 <sup>ος</sup>	-	+	-	-
4 <sup>ος</sup>	-	+	+	-
5 <sup>ος</sup>	-	-	+	-
6 <sup>ος</sup>	-	-	+	+
7 <sup>ος</sup>	-	-	-	+
8 <sup>ος</sup>	+	-	-	+

Πίνακας 1.13. Ακολουθία παλμών διπολικού βηματικού κινητήρα με βηματισμό μισού βήματος.

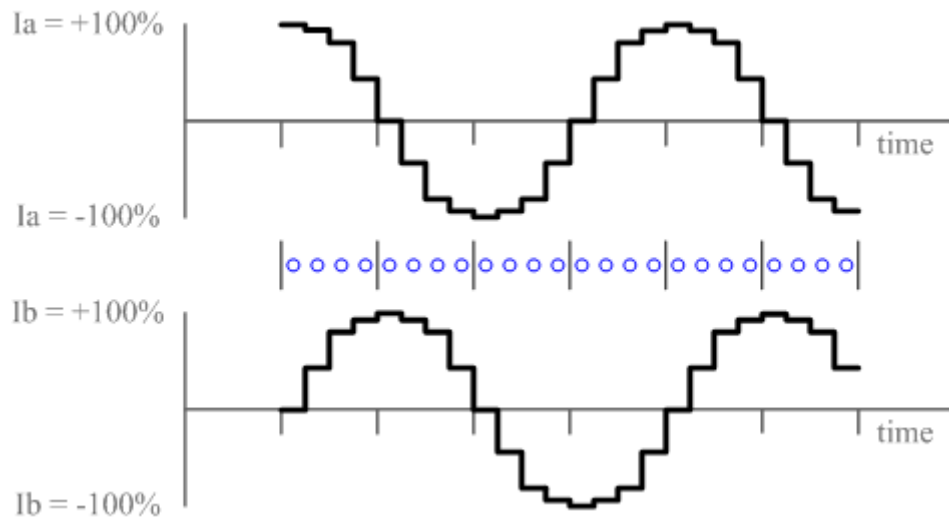
Αναλύοντας τους δύο παραπάνω πίνακες παρατηρείται ο διπλασιασμός τις ακολουθίας των παλμών που απαιτούνται για μια πλήρη περιστροφή του δρομέα ενός βηματικού κινητήρα. Για το λόγο αυτό η ταχύτητα περιστροφής του είναι μισή σε σύγκριση με τις προηγούμενες μεθόδους. Για την επίτευξη ίδιας ταχύτητας περιστροφής του δρομέα θα πρέπει να γίνει διπλασιασμός της συχνότητας των παλμών.

#### 1.6.4.Μικροβηματισμός (Microstepping drive)

Μικροβηματισμός είναι μια μέθοδος που αυξάνει την ανάλυση βηματικής γωνίας, μέχρι και 256 φορές, ελέγχοντας τη φορά και την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα. Βασίζεται στην αρχή της προοδευτικής μεταφοράς ποσότητας ρεύματος από το ένα τυλίγμα στο άλλο με ημιτονοειδή και συνημιτονοειδή μορφή (Σχήμα 1.21). Αυτό επιτυγχάνεται με διαμόρφωση εύρους παλμού (PWM) της τάσης στα άκρα των τυλιγμάτων (Σχήμα 1.22). Η μέθοδος αυτή βελτιώνει την ομαλότητα σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής και μειώνει τη ροπή κατά 30% σε σχέση με τη μέθοδο διέγερσης δύο τυλιγμάτων.



Σχήμα 1.21. Σχηματική αναπαράσταση μικροβηματισμού.



Σχήμα 1.22. Κυματομορφές ρευμάτων σε μέθοδο μικροβηματισμού.

## 1.7 Χαρακτηριστικά

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι τεχνικοί όροι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τα χαρακτηριστικά των βηματικών κινητήρων. Τα χαρακτηριστικά αυτά διακρίνονται σε στατικά και δυναμικά.

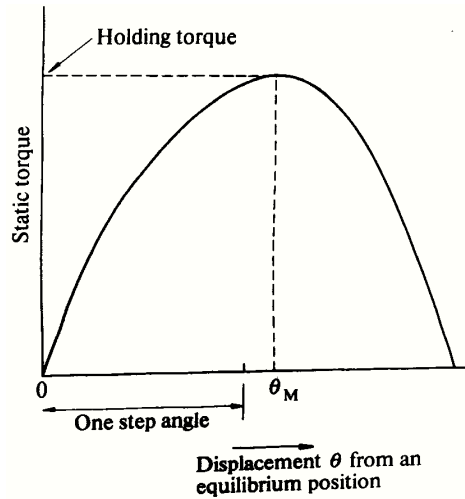
### 1.7.1 Στατικά χαρακτηριστικά

Είναι τα χαρακτηριστικά που διακρίνουν τους βηματικούς κινητήρες με τον δρομέα τους ακινητοποιημένο.

#### ∅ Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής - γωνιακής μετατόπισης $T/\Theta$

Τροφοδοτώντας με ρεύμα ένα ή δύο τυλίγματα του βηματικού κινητήρα, ο δρομέας ακινητοποιείται ισορροπώντας σε θέση τέτοια ώστε να ευθυγραμμίζεται με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργήθηκε στο στάτη. Εφαρμόζοντας μια εξωτερική ροπή στον δρομέα προκαλείται μια γωνιακή μετατόπιση της θέσης του. Η σχέση μεταξύ της εξωτερικής ροπής και της γωνιακής μετατόπισης είναι η χαρακτηριστική της μορφής του Σχήματος 1.23. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται  $T/\Theta$  ενώ η μέγιστη

ροπή που μπορεί να εφαρμοστεί καλείται ροπή συγκράτησης (Holding Torque) στη θέση  $\Theta = \Theta_M$ . Σε μετατοπίσεις μεγαλύτερες της θέσης  $\Theta_M$  η ροπή δεν δρα σε αντίθετη φορά από τη μετατόπιση, αλλά προς την ίδια μέχρι το επόμενο σημείο ισορροπίας.

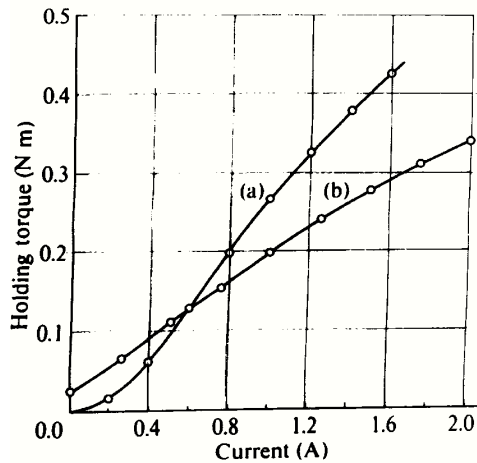


Σχήμα 1.23 Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – γωνιακής μετατόπισης  $T/\Theta$ .

του δρομέα. Η ροπή συγκράτησης χαρακτηρίζει την μέγιστη ροπή που μπορεί να εφαρμοστεί στον ακινητοποιημένο δρομέα ενός βηματικού κινητήρα, όταν τροφοδοτούνται ένα ή δύο τυλίγματα.

#### Ø Χαρακτηριστική ροπής – ρεύματος $T/I$

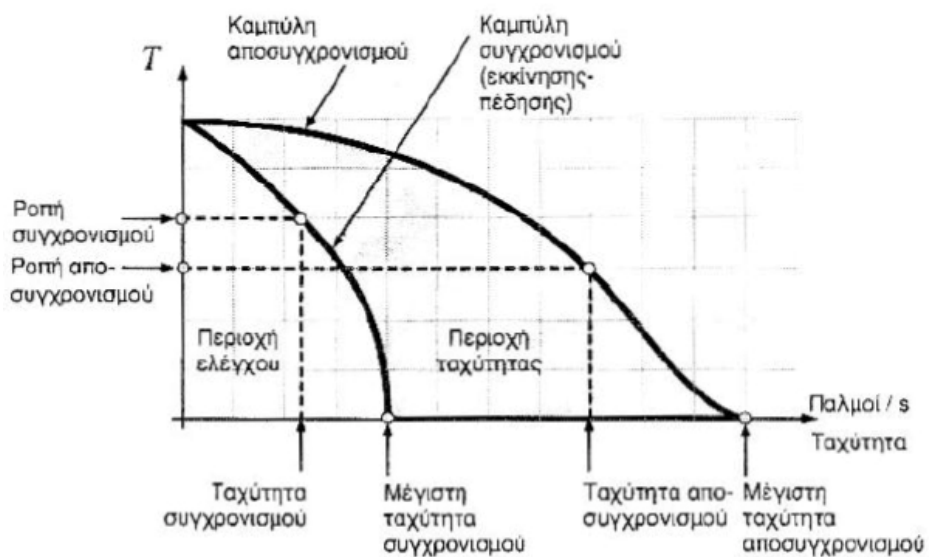
Η ροπή συγκράτησης των βηματικών κινητήρων εξαρτάται από το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα όπως διαπιστώνεται μέσω της χαρακτηριστικής  $T/I$ . Στο Σχήμα 1.24. γίνεται σύγκριση της χαρακτηριστική αυτής μεταξύ ενός υβριδικού βηματικού και ενός μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίδρασης με ίδια βηματική γωνία. Η μέγιστη ροπή που παρουσιάζεται στους υβριδικούς βηματικούς κινητήρες, χωρίς να έχουν ενεργοποιημένα τα τυλίγματα τους, ονομάζεται παραμένουσα ή ανασταλτική ροπή (Detent ή Residual Torque).



Σχήμα 1.24 Χαρακτηριστική ροπής συγκράτησης –ρεύματος  $T/I$  (a) βηματικού μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης (b) υβριδικού βηματικού.

### 1.7.2 Δυναμικά Χαρακτηριστικά

Η χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας των βηματικών κινητήρων (Σχήμα 1.25) περιλαμβάνει δύο καμπύλες. Την καμπύλη συγχρονισμού (pull in) και την καμπύλη αποσυγχρονισμού (pull out). Αυτές χωρίζουν το διάγραμμα ροπής ταχύτητας σε δύο περιοχές. Στη πρώτη, την περιοχή ελέγχου, ο κινητήρας μπορεί να εκκινήσει, να σταματήσει ή να αλλάξει φορά περιστροφής με ένα απλό παλμό. Σε αυτή τη περιοχή ο κινητήρας μπορεί να λειτουργεί με κυκλώματα ελέγχου ανοικτού βρόχου.



*Σχήμα 1.15 Χαρακτηριστικές ροπής στροφών βηματικών κινητήρων*

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

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>**  
**ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΒΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ**



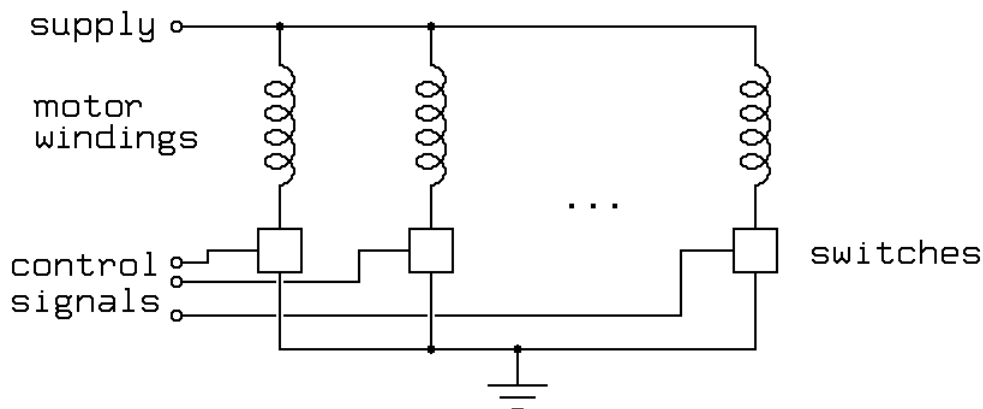
## 2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται βασικά κυκλώματα οδήγησης ισχύος διάφορων τύπων βηματικών κινητήρων. Τα κυκλώματα οδήγησης χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία των τυλιγμάτων του στάτη ελέγχοντας τη φορά του ρεύματος που τα διαρρέει. Αποτελούνται από τρανζίστορ τα οποία λειτουργούν ως διακόπτες και ελέγχονται από ψηφιακά σήματα, προερχόμενα από το κύκλωμα ελέγχου που καθορίζει τη συχνότητα και τη διαδοχή τους.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων το κύκλωμα ελέγχου αποτελείται από ένα προγραμματιζόμενο μικροελεγκτή. Υπάρχουν όμως και εφαρμογές όπου ο έλεγχος γίνεται με ηλεκτρονικούς υπολογιστές ή με απλά ψηφιακά κυκλώματα.

## 2.2 Κύκλωμα οδήγησης μονοπολικού βηματικού κινητήρα μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης

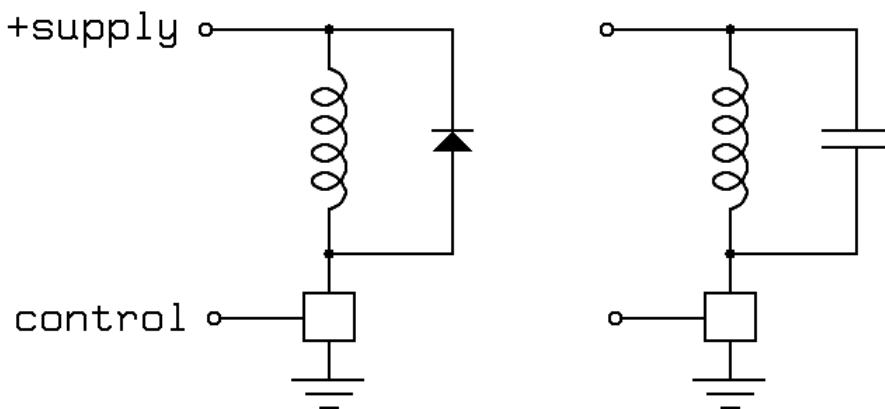
Τα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση μονοπολικών βηματικών κινητήρων μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης είναι παραλλαγές του κυκλώματος του Σχήματος 2.1.



Σχήμα 2.1 Κύκλωμα οδήγησης μονοπολικών βηματικών κινητήρων μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης.

Οι διακόπτες στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται σαν κουτάκια τα οποία λαμβάνουν τα σήματα – παλμούς ελέγχου και ελέγχουν την ροή του ρεύματος στα τυλίγματα του κινητήρα με αποτέλεσμα τη δημιουργία στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο στάτη.

Τα τυλίγματα του κινητήρα, όπως είναι γνωστό, λειτουργούν σαν πηνία. Είναι γνωστό επίσης, ότι αν ένα φορτισμένο πηνίο αφεθεί ελεύθερο, δηλαδή δεν κλείσει βρόχος με κάποιον τρόπο, η αποθηκευμένη ενέργεια εμφανίζεται σαν υπέρταση στα άκρα του. Αυτό συμβαίνει και με την περίπτωση των κυκλωμάτων οδήγησης βηματικών κινητήρων. Για την αντιμετώπιση της υπέρτασης υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι. Ο πρώτος είναι το γεφύρωμα κάθε τυλίγματος ενός μονοπολικού βηματικού κινητήρα ξεχωριστά, μέσω μιας διόδου και ο δεύτερος μέσω ενός πυκνωτή. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται και οι δύο τρόποι προστασίας των διακοπών.



Σχήμα 2.2 Προστασία κυκλωμάτων με χρήση διόδου ή πυκνωτή.

Η διάδος που τοποθετείται στα άκρα του τυλίγματος, θα πρέπει να επιτρέπει την ροή ολόκληρου του αποθηκευμένου ρεύματος σε ακαριαίο χρονικό διάστημα κάθε φορά που ανοίγει ο διακόπτης. Για το λόγο αυτό πρέπει να ελέγχονται τα χαρακτηριστικά τους όπως διαχείριση ρεύματος, μέγιστη ανάστροφη τάση και χρόνος ανάκτησης ώστε να καλύπτουν τις απαιτήσεις του κυκλώματος.

Η τοποθέτηση πυκνωτή στο κύκλωμα οδήγησης (Σχήμα 2.2) είναι περίπλοκη διαδικασία όσον αφορά τον σχεδιασμό της. Αυτό γιατί ο διακόπτης θα πρέπει να ανταπεξέλθει της σύντομης αιχμής ρεύματος, που δημιουργεί η εκφόρτιση του πυκνωτή προς τη γη, τη χρονική στιγμή που αυτός κλείνει. Η αιχμή αυτή ρεύματος μπορεί να αντιμετωπιστεί με την τοποθέτηση μιας αντίστασης σε σειρά με τον

πυκνωτή. Όταν ανοίξει ο διακόπτης, η αποθηκευμένη ενέργεια στο τύλιγμα φορτίζει τον πυκνωτή με τάση πολύ υψηλότερη από την τάση τροφοδοσίας, η οποία πρέπει να βρίσκεται εντός ορίων αντοχής του διακόπτη. Για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής του πυκνωτή, χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος.

$$C > L I^2 / (V_b - V_s)^2 \quad (2.1)$$

- Όπου C : Χωρητικότητα του πυκνωτή σε Farad,
- L : Αυτεπαγωγή του τυλίγματος σε Henrys,
- I : Ρεύμα του τυλίγματος σε Ampere,
- V<sub>b</sub> : Τάση διάσπασης του διακόπτη σε Volt,
- V<sub>s</sub> : Τάση τροφοδοσίας του τυλίγματος σε Volt.

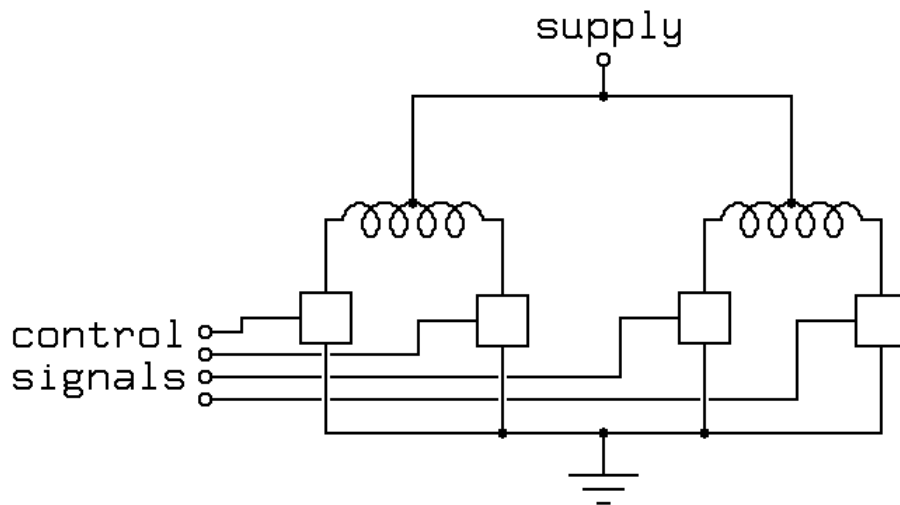
Οι βηματικοί κινητήρες μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης διαθέτουν αυτεπαγωγή που μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση του δρομέα. Στην εκλογή λοιπόν του πυκνωτή, πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η χειρότερη περίπτωση, πράγμα αρκετά δύσκολο μιας και οι βηματικοί κινητήρες, προς το παρόν, έχουν ελλιπή δεδομένα όσον αφορά στην αυτεπαγωγή τους.

Ο πυκνωτής σε συνδυασμό με το τύλιγμα δημιουργούν ένα κύκλωμα συντονισμού. Εάν το κύκλωμα ελέγχου οδηγεί τον κινητήρα σε συχνότητες κοντά στη συχνότητα συντονισμού, το ρεύμα ταλάντωσης δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο μηδενίζεται σε συχνότητα διπλάσια της συχνότητας συντονισμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δραματική μείωση της διαθέσιμης ροπής. Η συχνότητα συντονισμού ορίζεται από τη σχέση:

$$f = 1 / [ 2 \pi ( L C )^{0.5} ] \quad (2.2)$$

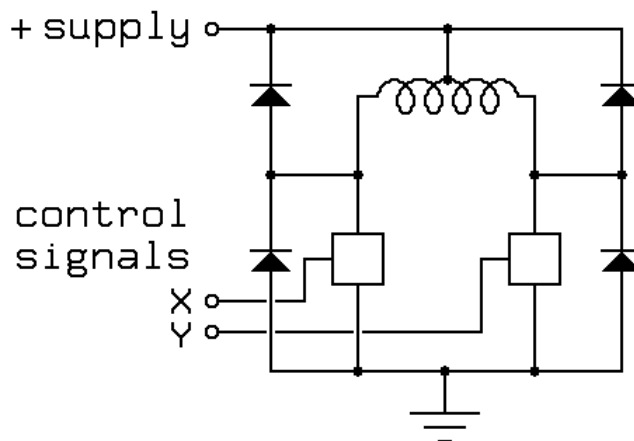
### **2.3 Κύκλωμα οδήγησης μονοπολικού βηματικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη και υβριδικού**

Τα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση βηματικών κινητήρων μόνιμου μαγνήτη και υβριδικών είναι παραλλαγές του κυκλώματος του Σχήματος 2.3.



Σχήμα 2.3 Κύκλωμα οδήγησης μονοπολικού βηματικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη ή υβριδικού.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα τυλίγματα του κινητήρα κατά το άνοιγμα των διακοπών, λόγω αποθηκευμένης ενέργειας δημιουργούν υψηλές τιμές τάσεως στα άκρα τους. Η αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού και σε αυτή τη περίπτωση, γίνεται με τη τοποθέτηση δύο διόδων ανά τύλιγμα (Σχήμα 2.4).

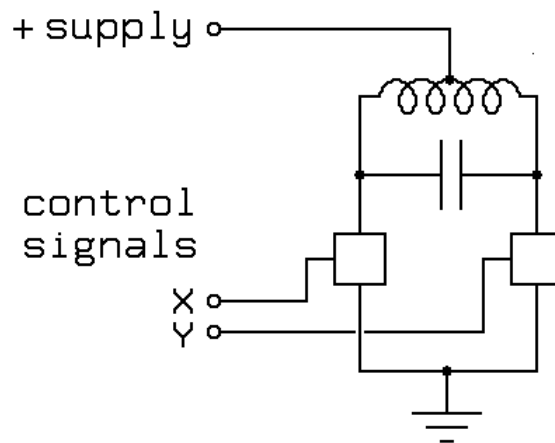


Σχήμα 2.4 Χρήση διόδων προστασίας σε κύκλωμα οδήγησης μονοπολικού βηματικού κινητήρα ή υβριδικού.

Η χρήση δύο διόδων, στη συγκεκριμένη περίπτωση, γίνεται λόγω φαινομένου αυτομετασχηματισμού της τάσης στα άκρα του τυλίγματος που δημιουργείται από τη

σύνδεση της μεσαίας λήψης αυτού σε θετικό δυναμικό. Λόγω αυτομετασχηματισμού, όταν σε άκρο του τυλίγματος μειωθεί το δυναμικό, στο άλλο του άκρο θα υπάρξει αύξηση αυτού και αντιστρόφως. Η πρόσθετη δίοδος προστατεύει τον διακόπτη από το ανάστροφο δυναμικό που μπορεί να δημιουργηθεί στα άκρα του.

Άλλος ένας τρόπος περιορισμού της υπέρτασης είναι με τη χρήση πυκνωτή (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5 Προστασία κυκλώματος οδήγησης μονοπολικού βηματικού κινητήρα ή υβριδικού με πυκνωτή.

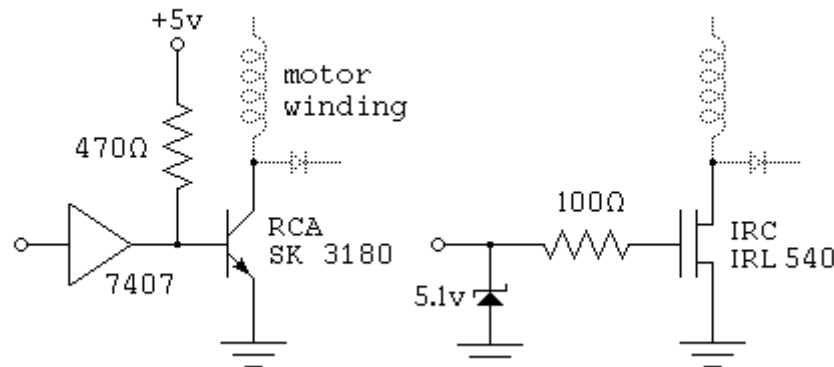
Ο υπολογισμός της ελάχιστης τιμής του πυκνωτή και σε αυτή τη περίπτωση, γίνεται από τη Σχέση 2.2.

## 2.4 Πρακτικά κυκλώματα οδήγησης μονοπολικών βηματικών κινητήρων

Στα προηγούμενα κυκλώματα οδήγησης δεν αναλύθηκαν οι διακόπτες, οι οποίοι μπορεί να είναι από ένα απλό ρελέ (relay) μέχρι mosfet ισχύος. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζονται δύο προτεινόμενα κυκλώματα οδήγησης μονοπολικών κινητήρων με δίοδο προστασίας ανά τύλιγμα.

Τα κυκλώματα που προτείνονται είναι συμβατά σημάτων TTL (Transistor-Transistor-Logic). Η χρήση σταθεροποιημένης τάσης πλάτους 5 βολτ είναι αναγκαία για την οδήγηση του buffer 7407 και κατ' επέκταση του τρανζίστορ σε συνδεσμολογία

ανοικτού συλλέκτη. Η τροφοδοσία του τυλίγματος μπορεί να πάρει τιμές τάσεως από 5 μέχρι 24 V.

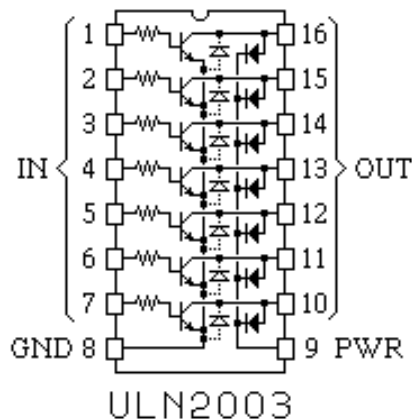


Σχήμα 2.6 Προτεινόμενα κυκλώματα οδήγησης μονοπολικού βηματικού κινητήρα ανά τύλιγμα.

Το τρανζίστορ SK 3180 του Σχήματος 2.6 είναι Darlington ισχύος με τιμή ενίσχυσης - κέρδους ρεύματος πάνω από 1000. Λόγω μεγάλης ενίσχυσης, τα περίπου 10 mA που περνούν από την αντίσταση των 470 Ω, είναι αρκετά για να οδηγήσουν μερικά αμπέρ στο τύλιγμα. Το buffer 7407 χρησιμοποιείται για προστασία του κυκλώματος σε περίπτωση αστοχίας του τρανζίστορ.

Το τρανζίστορ IRL 540 είναι επίδρασης πεδίου FET (Field Effect Transistor), ικανό να διαχειριστεί ρεύμα τάξης 20 A και τάσης μέχρι 100 V. Με τοποθέτηση ψήκτρας στο IRL 540, εξασφαλίζεται ικανή ψύξη που το καθιστά ικανό να απορροφήσει τις αιχμές ρεύματος από τις υπερτάσεις των τυλιγμάτων. Σε περίπτωση αστοχίας του τρανζίστορ, η αντίσταση των 100 Ω σε συνδυασμό με τη δίοδο zener προστατεύει το υπόλοιπο κύκλωμα.

Για εφαρμογές με μονοπολικούς βηματικούς κινητήρες μέχρι μισό αμπέρ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σειρά ολοκληρωμένων οδηγών ULN200x της Allegro Microsystems ή αντίστοιχες των Motorola, MC1413 και National Semiconductor DS200x. Οι οδηγοί αυτοί αποτελούνται από σειρές τρανζίστορ Darlington, ικανά να οδηγήσουν τα τυλίγματα του βηματικού κινητήρα απευθείας, με τη χρήση μόνο των εισόδων ελέγχου. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η εσωτερική διασύνδεση του ευρέως διαδεδομένου οδηγού ULN2003.

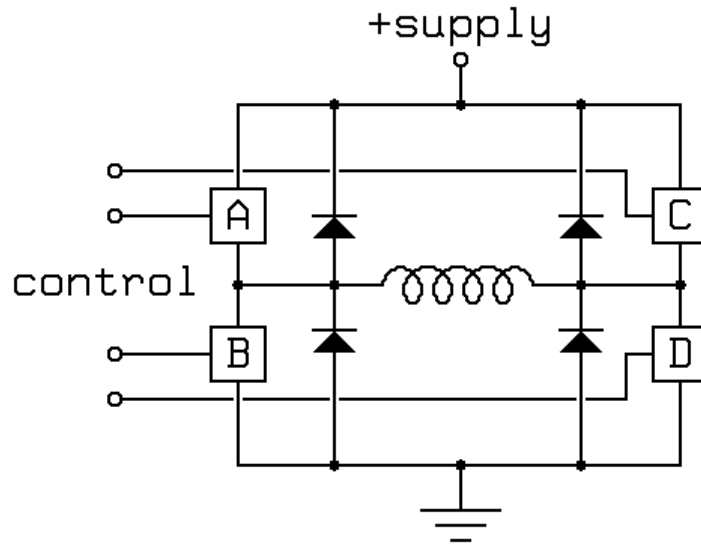


Σχήμα 2.7 Ολοκληρωμένο κύκλωμα οδήγησης μονοπολικού βηματικού κινητήρα ULN2003 της Allegro Microsystems.

Το ολοκληρωμένο ULN2003 αποτελείται από επτά τρανζίστορ Darlington που ελέγχονται με συμβατά σήματα TTL. Κάθε τρανζίστορ έχει συνδεδεμένο τον εκπομπό του στη γείωση και τον συλλέκτη του στη τροφοδοσία, μέσω των ακροδεκτών 8 και 9 αντίστοιχα. Η προστασία των τρανζίστορ γίνεται με τη χρήση δύο διόδων. Η μία χρησιμοποιείται για τη γεφύρωση εκπομπού και συλλέκτη προστατεύοντας από ανάστροφη τάση, ενώ η δεύτερη γεφυρώνει τον συλλέκτη με τη γείωση, για την καταστολή των υπερτάσεων από τα τυλίγματα.

## 2.5 Κύκλωμα οδήγησης διπολικού βηματικού κινητήρα

Η οδήγηση των διπολικών βηματικών κινητήρων είναι πιο δύσκολη από αυτή των μονοπολικών λόγω απουσίας της ορισμένης σε συγκεκριμένο δυναμικό μεσαίας λήψης των τυλιγμάτων. Η δημιουργία στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο στάτη, που περιστρέφει τον δρομέα, προϋποθέτει την αλλαγή φοράς του ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα. Η αλλαγή της φοράς σε κάθε τύλιγμα γίνεται μέσω ενός μετατροπέα πλήρους γέφυρας (full bridge) ή πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα. Ο μετατροπέας αυτός ονομάζεται επίσης γέφυρα-H (H-bridge) λόγω του σχεδιασμού της σαν το γράμμα "H" (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8 Πλήρης γέφυρα ή γέφυρα H.

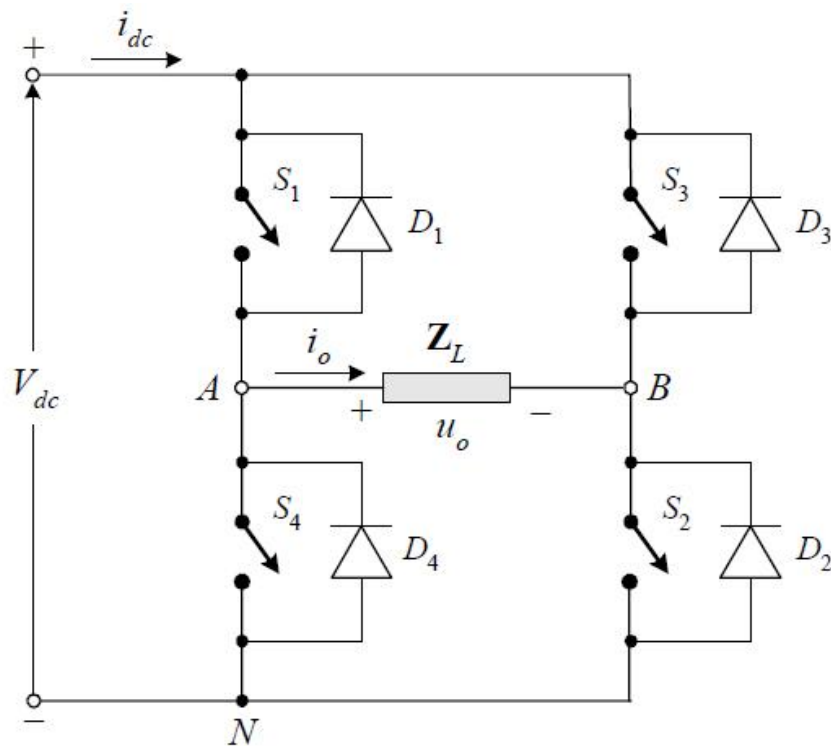
Για την οδήγηση διπολικών βηματικών κινητήρων απαιτείται η χρήση δύο γεφυρών, αφού αυτοί αποτελούνται από δύο τυλίγματα. Όπως και στα κυκλώματα οδήγησης μονοπολικών κινητήρων τα διακοπτικά στοιχεία πρέπει να προστατεύονται από τις αιχμές υπέρτασης, που δημιουργούνται στα άκρα των τυλιγμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται και σε αυτή τη περίπτωση με τη χρήση διόδων.

Το κύκλωμα μετατροπέα πλήρους γέφυρας έχει τη δομή του Σχήματος 2.9. Η γέφυρα αποτελείται από δύο σκέλη (legs), το A και το B. Κάθε σκέλος περιλαμβάνει δύο διακόπτες, αντιπαράλληλα με τους οποίους συνδέονται οι διόδοι. Από τους δύο διακόπτες κάθε σκέλους, ο ένας πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας και ο άλλος σε αποκοπή. Όταν συμβαίνει αυτό, η τάση εξόδου του σκέλους VAN και VBN αντίστοιχα, εξαρτάται μόνο από την κατάσταση των διακοπών και είναι ανεξάρτητη από τη φορά του ρεύματος στο φορτίο  $i_0$ . Η ροή του ρεύματος φορτίου, μέσω του διακόπτη ή της αντιπαράλληλης διόδου, εξαρτάται από τη φορά του.

Η απαίτηση ο ένας διακόπτης κάθε σκέλους να βρίσκεται πάντα σε κατάσταση αγωγής, είναι δύσκολο να επιτευχθεί στα πραγματικά κυκλώματα, όπου οι χρόνοι έναυσης και σβέσης των ημιαγωγών στοιχείων είναι πεπερασμένοι. Στις πρακτικές εφαρμογές μεταξύ της σβέσης του ενός διακόπτη και της έναυσης του άλλου μεσολαβεί κάποιο χρονικό διάστημα, γνωστό ως νεκρός χρόνος (dead time, blanking time). Η εισαγωγή χρονικής καθυστέρησης είναι αναγκαία για την ασφαλή μετάβαση



των διακοπών κάθε σκέλους. Αν και οι δύο διακόπτες ενός σκέλους βρεθούν σε κατάσταση αγωγιμότητας, τότε προκαλείται βραχυκύκλωση της πηγής εισόδου με άμεση συνέπεια την ακαριαία αύξηση του ρεύματος σε υψηλές τιμές. Η κατάσταση αυτή είναι γνωστή ως shoot through fault και μπορεί να αντιμετωπιστεί με εισαγωγή χρονικής καθυστέρησης μεταξύ των σημάτων ελέγχου των ημιαγωγικών διακοπών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω του κυκλώματος ελέγχου, με τη χρήση ολοκληρωμένου οδηγού ή με κατάλληλο ψηφιακό κύκλωμα όπως θα παρουσιαστεί στο κεφάλαιο της κατασκευής.



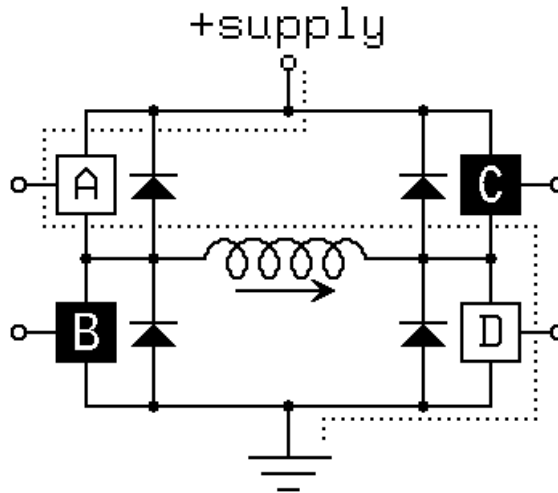
Σχήμα 2.9 Δομή κυκλώματος πλήρους γέφυρας.

### 2.5.1 Ανάλυση λειτουργίας της γέφυρας

Τα τέσσερα διακοπτικά στοιχεία της γέφυρας Η προσδίδουν 16 πιθανές καταστάσεις λειτουργίας της γέφυρας, εκ των οποίων επτά βραχυκυκλώνουν την πηγή τροφοδοσίας. Οι καταστάσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες:

∅ **Ορθή φορά ρεύματος. Διακόπτες A και D κλειστοί.**

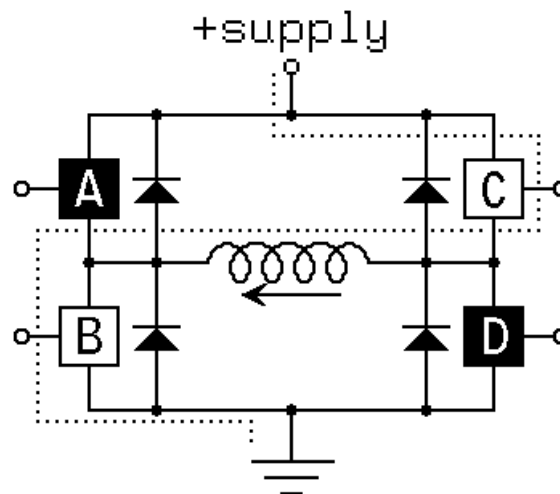
Κλείνοντας οι διακόπτες A και D συνδέουν, το αριστερό άκρο του τυλίγματος σε θετικό δυναμικό και το δεξί σε γείωση αντίστοιχα. Η διέλευση του ρεύματος γίνεται, από το θετικό δυναμικό της τροφοδοσίας της γέφυρας μέσω του κλειστού διακόπτη A, προς το αριστερό άκρο του τυλίγματος καταλήγοντας στο διακόπτη D, όπου και γειώνεται. Στο Σχήμα 2.9 απεικονίζεται η κατάσταση λειτουργίας με ορθή φορά ρεύματος.



Σχήμα 2.9 Ορθή κατάσταση λειτουργίας γέφυρας-H.

**∅ Ανάστροφη φορά ρεύματος. Διακόπτες B και C κλειστοί.**

Στην περίπτωση της λειτουργίας με ανάστροφη φορά ρεύματος, γίνεται εναλλαγή των δυναμικών στα άκρα του τυλίγματος. Εδώ οι διακόπτες B και C συνδέουν, το αριστερό άκρο του τυλίγματος στη γείωση και το δεξί στο θετικό δυναμικό αντίστοιχα.

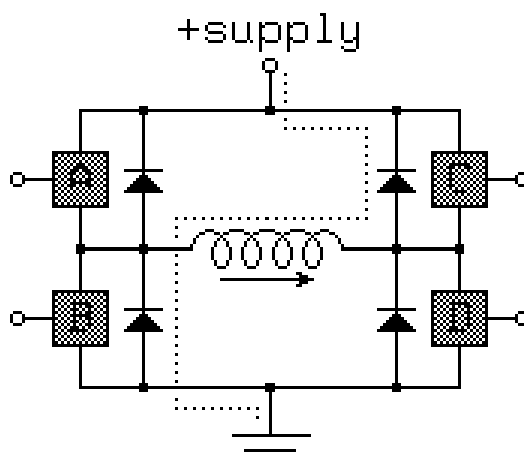


Σχήμα 2.10 Ανάστροφη κατάσταση λειτουργίας γέφυρας H.

Η διέλευση του ρεύματος πραγματοποιείται από το θετικό δυναμικό, προς το δεξιό άκρο του τυλίγματος μέσω των κλειστών διακοπών B και C, καταλήγοντας στη γείωση (Σχήμα 2.10)

**∅ Ελεύθερης περιστροφής ή γρήγορης αποκατάστασης ρεύματος. Όλοι οι διακόπτες ανοικτοί.**

Αυτός ο τύπος λειτουργίας προσφέρει μηδενική ή σε ορισμένες περιπτώσεις, πολύ μικρή δυναμική πέδηση στον κινητήρα αφήνοντας τον δρομέα να περιστρέφεται ελεύθερα. Το παραγόμενο από την περιστροφή του δρομέα ρεύμα, κατά την ελεύθερή του κίνηση, επιστρέφει μέσω των διόδων στη τροφοδοσία της γέφυρας. Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται η ροή του παραγόμενου ρεύματος κατά την περιστροφή του δρομέα από εξωτερική δύναμη ή τη χρονική στιγμή μετάβασης από ορθή λειτουργία, σε ελεύθερη περιστροφή.

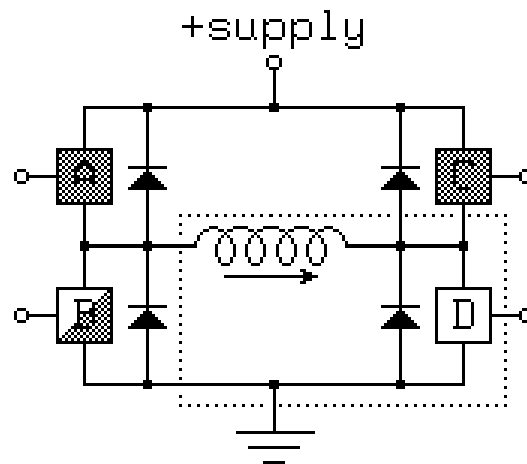


Σχήμα 2.11 Κατάσταση ελεύθερης περιστροφής κινητήρα σε γέφυρα H.

**∅ Δυναμικής πέδησης ή αργής αποκατάστασης ρεύματος. Διακόπτες B και D κλειστοί.**

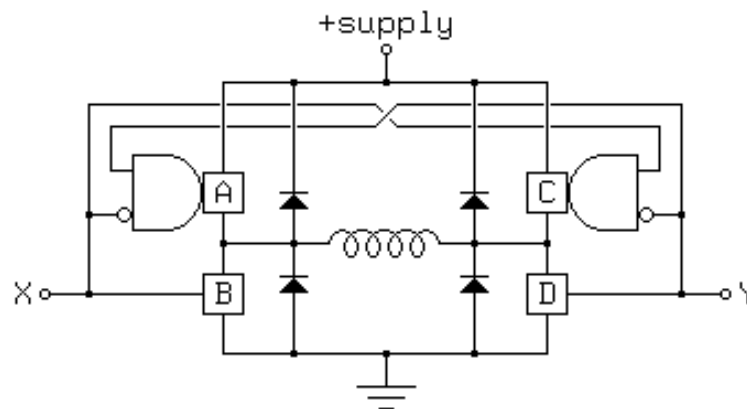
Σε κατάσταση δυναμικής πέδησης το παραγόμενο από την περιστροφή του δρομέα ρεύμα ανακυκλώνεται στο τυλίγμα δημιουργώντας πέδηση στη περιστροφή του (Σχήμα 2.12). Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και κατά τη μετάβαση από ορθή ή

ανάστροφη λειτουργία σε δυναμική πέδηση, όπου η αποθηκευμένη ενέργεια του τυλίγματος ανακυκλώνεται και καταναλίσκεται σε αυτό.



Σχήμα 2.12 Κατάσταση δυναμικής πέδησης κινητήρα σε γέφυρα-H.

Οι περισσότερες γέφυρες H σχεδιάζονται με λογική αποφυγής λάθους κατάστασης λειτουργίας, που έχει σαν αποτέλεσμα το βραχυκύκλωμα της πηγής τροφοδοσίας. Μια τέτοια λογική σχεδιασμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.13 με επιτρεπόμενες καταστάσεις αυτές του Πίνακα 2.1.



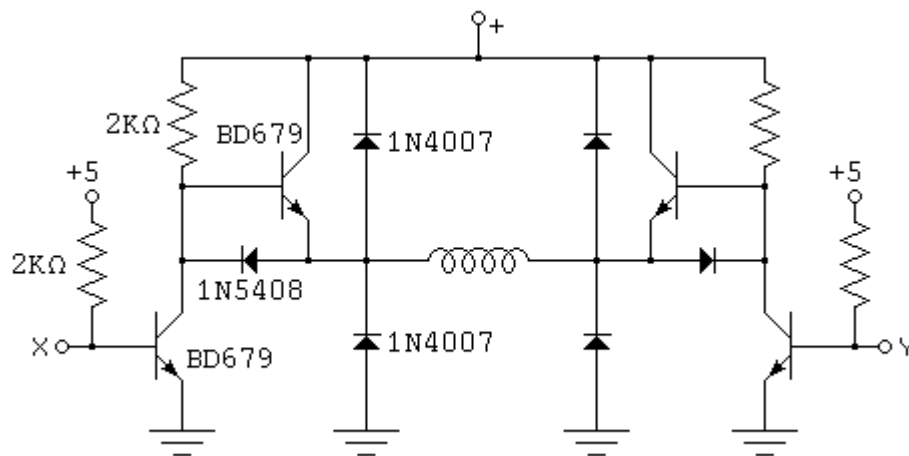
Σχήμα 2.13 Υλοποίηση πλήρους γέφυρας για αποφυγή βραχυκυκλώματος.

<i>XY</i>	<i>ABCD</i>	<i>Κατάσταση</i>
<i>00</i>	<i>0000</i>	<i>Ελεύθερη περιστροφή</i>
<i>01</i>	<i>1001</i>	<i>Ορθή</i>
<i>10</i>	<i>0110</i>	<i>Ανάστροφη</i>
<i>11</i>	<i>0101</i>	<i>Δυναμική πέδηση</i>

Πίνακας 2.1 Καταστάσεις λειτουργίας πλήρους γέφυρας.

### 2.5.2 Πρακτικά κυκλώματα οδήγησης διπολικών βηματικών κινητήρων

Για την οδήγηση διπολικών βηματικών κινητήρων υπάρχει πληθώρα ολοκληρωμένων οδηγών στο εμπόριο, αλλά θεωρείται χρήσιμο να γίνει παρουσίαση κυκλώματος με διακριτά υλικά. Το κύκλωμα του Σχήματος 2.14 που ακολουθεί είναι μια υλοποίηση για την οδήγηση ενός τυλίγματος διπολικού βηματικού κινητήρα.



Σχήμα 2.14 Διπολικό κύκλωμα οδήγησης ενός τυλίγματος.

Οι είσοδοι ελέγχου X και Y δέχονται σήματα TTL όπως του κυκλώματος οδήγησης μονοπολικού κινητήρα του Σχήματος 2.6. Τα δύο τοποθετημένα στο επάνω σκέλος της γέφυρας τρανζίστορ BD679, είναι σε συνδεσμολογία διασφάλισης χαμηλής στάθμης (pulled-down transistor). Με αυτή τη συνδεσμολογία εξασφαλίζεται η αποκοπή τους, όταν άγουν τα τρανζίστορ του κάτω τμήματος, αποκλείοντας με αυτόν τον τρόπο το ενδεχόμενο βραχυκυκλώματος. Το τύλιγμα του κινητήρα θα ενεργοποιηθεί εάν μια από τις εισόδους δεχθεί σήμα υψηλής στάθμης και η δεύτερη δεχθεί χαμηλής.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>**

### **ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ**

### 3.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας κατασκευάστηκε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα για την παλμοδότηση των διακοπτικών στοιχείων των δύο πλήρως ελεγχόμενων γεφυρών του κυκλώματος ισχύος. Για την υλοποίηση του κυκλώματος ελέγχου της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής 16F877 της Microchip που ανήκει στη μεσαία κατηγορία της οικογένειας 16XXXX των PIC.

Γενικά ο μικροελεγκτής είναι ένας τύπος επεξεργαστή, ο οποίος δύναται να λειτουργήσει με ελάχιστα εξωτερικά εξαρτήματα, καθώς διαθέτει πολλά ενσωματωμένα υποσυστήματα ελέγχου. Σε αντίθεση με τους επεξεργαστές που χρησιμοποιούνται σε μη ενσωματωμένα συστήματα (π.χ. προσωπικοί υπολογιστές), κατά τη σχεδίαση ενός μικροελεγκτή δίνεται έμφαση στην αυτονομία, στο χαμηλό κόστος και στην εξειδίκευση. Η χρήση μικροελεγκτών σε εφαρμογές παλμοδότησης είναι ευρέως διαδεδομένη, καθώς προσφέρουν μεγάλη αξιοπιστία έναντι διακοπτικών θορύβων, ευκολία στον προγραμματισμό τους τόσο σε γλώσσα χαμηλού επιπέδου (assembly) όσο και ανώτερου επιπέδου (Basic, C, κτλ), χαμηλό κόστος και μικρό μέγεθος.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια γενική περιγραφή της δομής, των χαρακτηριστικών και του τρόπου λειτουργίας των μικροελεγκτών της οικογένειας PIC που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή.

### 3.2 Μικροελεγκτές και Μικροεπεξεργαστές

Είναι φανερό ότι οι μικροελεγκτές (microcontrollers) και οι μικροεπεξεργαστές (microprocessors) αποτελούν απαραίτητο μέρος των σύγχρονων τεχνολογικών εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα, ο μικροεπεξεργαστής (μΕ) αποτελεί το κεντρικό στοιχείο σε κάθε μικροϋπολογιστικό σύστημα. Ωστόσο, οι δύο αυτές συσκευές διαφέρουν μεταξύ τους σε αρκετά σημεία.

Μια βασική τους διαφορά βρίσκεται στην τρόπο λειτουργίας τους. Προκειμένου να λειτουργήσει ένας μικροεπεξεργαστής θα πρέπει να συνδεθεί και με άλλες συσκευές, όπως μνήμη (memory) ή συσκευή αποστολής και λήψης δεδομένων. Αυτό σημαίνει

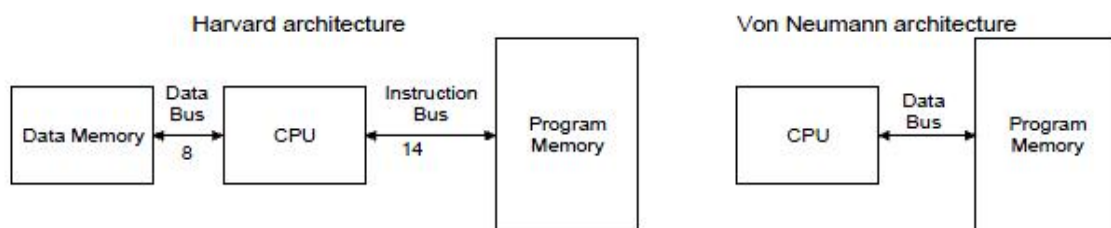


ότι ένας μικροεπεξεργαστής είναι η καρδιά του συστήματος. Αντιθέτως, ένας μικροελεγκτής σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να περιέχει όλες τις παραπάνω συσκευές. Συνεπώς, δεν χρειάζονται άλλες συσκευές για την λειτουργία του, εφόσον όλα τα απαραίτητα περιφερειακά (peripherals) είναι ενσωματωμένα. Με τον τρόπο αυτό γίνεται εξοικονόμηση χώρου και χρόνου κατά την κατασκευή εφαρμογής με χρήση μικροελεγκτή.

### 3.2 Αρχιτεκτονικές Harvard και Von-Neumann

Οι αρχιτεκτονικές Harvard και Von-Neumann αποτελούν τις δύο βασικές αρχιτεκτονικές των σύγχρονων μικροϋπολογιστικών συστημάτων. Οι μικροελεγκτές που είναι σχεδιασμένοι με βάση την αρχιτεκτονική Harvard καλούνται επίσης και μικροελεγκτές RISC (Reduced Instruction Set Computer) ενώ εκείνοι που χρησιμοποιούν την αρχιτεκτονική Von-Neumann καλούνται μικροελεγκτές CISC (Complex Instruction Set Computer).

Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί και από το Σχήμα 3.1, στην αρχιτεκτονική Harvard υπάρχει δίαυλος για τη μεταφορά δεδομένων (data bus) και διαφορετικός δίαυλος για τη μεταφορά των εντολών (instruction bus). Η ύπαρξη δύο διαφορετικών μνημών, μνήμη δεδομένων (data memory) και μνήμη προγράμματος (program memory), καθιστά την αρχιτεκτονική Harvard πιο αποδοτική, αφού μπορεί να εκτελείται κάποια εντολή και παράλληλα να εγγράφεται ή να διαβάζεται η μνήμη.



Σχήμα 3.1 Αρχιτεκτονικές Harvard και Von-Neumann.

Επίσης, η αρχιτεκτονική Harvard επιτρέπει οι εντολές να έχουν διαφορετικό μήκος σε δυαδικά ψηφία (binary digit, bit) από τα δεδομένα. Δίνεται η δυνατότητα να επιλέγεται, ανάλογα με το πλήθος των εντολών, το κατάλληλο μήκος της λέξης

εντολής ώστε να επιτευχθεί η κωδικοποίηση της κάθε εντολής σε μία μόνο λέξη. Επιτυγχάνεται, με αυτό τον τρόπο, να μειωθεί σημαντικά η ταχύτητα ανάκλησης (fetch) της κάθε εντολής.

### 3.3 Γενικά χαρακτηριστικά των μικροελεγκτών της οικογένειας PIC

Ο όρος PIC (Peripheral Interface Controller), όπως είναι το πλήρες όνομα τους, αναφέρεται στην οικογένεια 8-bit μικροελεγκτών της εταιρείας Microchip. Η δομή τους στηρίζεται στην αρχιτεκτονική Harvard. Αυτό το χαρακτηριστικό τους σε συνδυασμό και με άλλα χαρακτηριστικά που αναφέρονται παρακάτω και που συναντώνται σε μικροελεγκτές RISC, τους μετατρέπουν σε συσκευές με αρκετά υψηλή επίδοση.

Χαρακτηριστικό των PIC είναι ότι για την εκτέλεση μίας εντολής χρειάζεται μόνο ένας κύκλος μηχανής (εκτός των εντολών που αλλάζουν την ροή του προγράμματος). Η ανάκληση μίας εντολής χρειάζεται επίσης μόνο ένα κύκλο μηχανής. Οι PIC διαθέτουν επιπλέον μια απλή μονάδα συνεχούς διοχέτευσης (pipeline) με την οποία πετυχαίνουν την εκτέλεση μίας εντολής ανά κύκλο μηχανής χωρίς να χρειάζεται ιδιαίτερα πολύπλοκη αρχιτεκτονική. Άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των PIC είναι ότι όλες οι εντολές επιτρέπεται να εκτελούνται σε οποιοδήποτε καταχωρητή (register) ακόμα και σε καταχωρητές ειδικού σκοπού. Παραδείγματος χάριν, επιτρέπονται λογικές πράξεις με όρισμα το μετρητή προγράμματος (Program Counter, PC) ή τον καταχωρητή κατάστασης (Status register). Το γεγονός ότι δεν υπάρχουν ειδικές περιπτώσεις στη διαχείριση των εντολών σε συνδυασμό με τον μικρό αριθμό αυτών, επιτρέπει την εύκολη και γρήγορη εκμάθηση τους.

Στη δομή ενός PIC διακρίνουμε τρία μέρη: Τον πυρήνα (Core), τα περιφερειακά (Peripherals) και τα ειδικά χαρακτηριστικά (Special features).

#### Ø Πυρήνας

Ο πυρήνας περιέχει όλες τις απαραίτητες συσκευές για την λειτουργία του μικροεπεξεργαστή, όπως τον ταλαντωτή (Oscillator), τα απαραίτητα κυκλώματα για τη σωστή εκκίνηση του μικροελεγκτή (reset logic), την κεντρική μονάδα επεξεργασίας

(Central Processing Unit, CPU), την μνήμη (Memory) και τη λογική διακοπών (Interrupt operation).

### ∅ Περιφερειακά

Τα περιφερειακά είναι το πιο ενδιαφέρον κομμάτι ενός μικροελεγκτή αφού αποτελούν το σημαντικότερο στοιχείο για να αποφανθούμε εάν ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής είναι κατάλληλος για την εφαρμογή μας. Εξάλλου, τα περιφερειακά είναι εκείνα που διαφοροποιούν τους μικροελεγκτές από τους μικροεπεξεργαστές. Οι μικροελεγκτές της οικογένειας PIC έρχονται με διαφορετικούς συνδυασμούς περιφερειακών ανάλογα με την συσκευή που επιλέγουμε. Τέτοια περιφερειακά είναι οι θύρες εισόδου, εξόδου (I/O Ports), έξοδοι διαμόρφωσης εύρους παλμών(PWM), μετατροπείς αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά (A/D converter), οι χρονιστές (Timers) και οι σειριακές θύρες (USART).

### ∅ Ειδικά Χαρακτηριστικά

Τα ειδικά χαρακτηριστικά είναι απαραίτητα για την εξυπηρέτηση των παρακάτω :

- Ελάττωση του κόστους του συστήματος,
- Αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος και
- Αύξηση της προσαρμοστικότητας σχεδιασμού.

Η Mid-Range οικογένεια περιλαμβάνει διάφορα τέτοια χαρακτηριστικά, όπως είναι ο Watchdog timer και ο ενσωματωμένος σειριακός προγραμματιστής (In Circuit Serial Programmer, ICSP)

## 3.4 Κατηγορίες Μικροελεγκτών PIC

Ανάλογα με το μήκος της εντολής που χρησιμοποιείται, διακρίνονται τρεις κατηγορίες της οικογένειας μικροελεγκτών PIC:

- ∅ Τη βασική (Base line) με μήκος λέξης εντολής των 12-bit.
- ∅ Τη μεσαία (Mid Range) με μήκος λέξης εντολής των 14-bit.

∅ Την προηγμένη (High-End) με μήκος λέξης εντολής των 16-bit.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στην αρχιτεκτονική των PIC υπάρχουν τρία κυρίως τμήματα, ο πυρήνας, τα περιφερειακά και κάποια επιπλέον τμήματα που βοηθούν στον γρηγορότερο σχεδιασμό και στην αποτελεσματικότερη λειτουργία της συσκευής (special features).

Συνεπώς, στην ενότητα αυτή, θα μελετηθούν θέματα του PIC που αφορούν:

∅ την αρχιτεκτονική του

∅ τον πυρήνα του :

- Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (CPU)
- Ρολόι - Χρονισμοί - Κύκλος Εντολής
- Μονάδα συνεχούς διοχέτευσης εντολών (Instruction Pipelining)
- Αριθμητική Λογική Μονάδα (Arithmetic Logic unit, ALU)
- Μνήμη προγράμματος ROM (Program Memory)
- Μνήμη δεδομένων RAM (Data Memory)
- Καταχωρητές γενικής χρήσης (General Purpose Registers)
- Καταχωρητές ειδικού σκοπού
- Στοίβα (Stack)
- Καταχωρητής προγράμματος, κατάστασης (PC, STATUS register)
- Διακοπές (Interrupts)

∅ Τα περιφερειακά του :

- Γενικής χρήσης I/O (PortA, PortB, PortC)

### 3.4.1 Αρχιτεκτονική του PIC

Στο Σχήμα 3.2 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του PIC. Μπορούμε να διακρίνουμε την Αριθμητική Λογική Μονάδα (Arithmetic Logic Unit, ALU), την Μνήμη Προγράμματος, την Μνήμη Δεδομένων, διάφορους καταχωρητές, καθώς και τα περιφερειακά του PIC, όπως είναι οι θύρες I/O και οι χρονιστές.



Η Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας είναι υπεύθυνη για την σωστή μεταφορά της εντολής που πρόκειται να εκτελεστεί, για την αποκωδικοποίησή της και για την εκτέλεσή της. Σε μερικές περιπτώσεις, η κεντρική μονάδα επεξεργασίας χρειάζεται να λειτουργήσει σε συνδυασμό με την Αριθμητική Λογική Μονάδα ώστε να συμπληρωθεί η εκτέλεση μιας εντολής (σε αριθμητικές και λογικές πράξεις). Η CPU ελέγχει τον δίαυλο επικοινωνίας με την μνήμη προγράμματος, τον δίαυλο επικοινωνίας με την μνήμη δεδομένων και την πρόσβαση στη **σωρό** (stack).

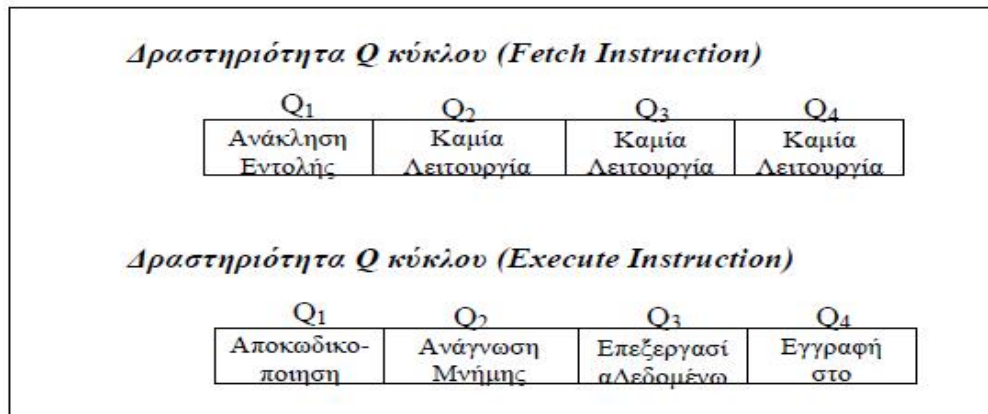
Οι βασικές λειτουργίες που εκτελεί μια CPU είναι :

- Διαβάζει εντολές από την μνήμη, τις αποκωδικοποιεί και τις εκτελεί
- Ελέγχει το όλο σύστημα παρέχοντας τα απαραίτητα προς αυτό σήματα. Έτσι, μεταφέρει δεδομένα από και προς την μνήμη καθώς επίσης από και προς τις μονάδες εισόδων / εξόδων
- Ανταποκρίνεται σε σήματα διακοπών και ελέγχου
- Διακλαδώνει την ομαλή ακολουθιακή ροή ενός προγράμματος σε άλλο σημείο, σε υπορουτίνα, επιστρέφει από υπορουτίνα και αποκρίνεται σε διακοπές από εξωτερικά σήματα ή από το πρόγραμμα.

## Ø Ρολόι - Χρονισμοί - Κύκλος Εντολής

Οι παλμοί που παράγονται από τον ταλαντωτή (OSC1) διαιρούνται εσωτερικά με το 4 για να δώσουν τέσσερις μη υπερκαλυπτόμενους παλμούς Q1, Q2, Q3, Q4. Οι παλμοί αυτοί χρησιμοποιούνται από τον πυρήνα για να συγχρονιστούν οι διάφορες λειτουργίες κατά τη διάρκεια ανάκλησης και εκτέλεσης μιας εντολής. Για παράδειγμα η ανάκληση της εντολής (fetch), ξεκινάει με τον μετρητή προγράμματος (PC) να αυξάνει κατά την φάση Q1. Στην εκτέλεση η εντολή αποθηκεύεται στο καταχωρητή εντολών (instruction register, IR), κατά την διάρκεια της φάσης Q1. Η εντολή αποκωδικοποιείται και εκτελείται στις φάσεις Q2, Q3, Q4. Τα δεδομένα διαβάζονται από τη μνήμη κατά την φάση Q2, και γράφονται κατά την Q4. Κατά την φάση Q3 γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων. Το σχήμα 3.3 παρουσιάζει μια σχηματική περιγραφή των παραπάνω.

Το σύνολο των τεσσάρων παλμών Q1 ως Q4 αποτελούν ένα κύκλο εντολής (ή κύκλο μηχανής). Μέσα σε ένα κύκλο εντολής εκτελείται μια οποιαδήποτε εντολή. Εάν γίνει υπολογισμός ότι, για την εκτέλεση μιας εντολής χρειάζεται ένα κύκλο μηχανής καθώς και έναν επιπλέον κύκλο μηχανής για την ανάκληση της, έχουμε ότι



Σχήμα 3.3 Δραστηριότητα Q (Q cycle activity).

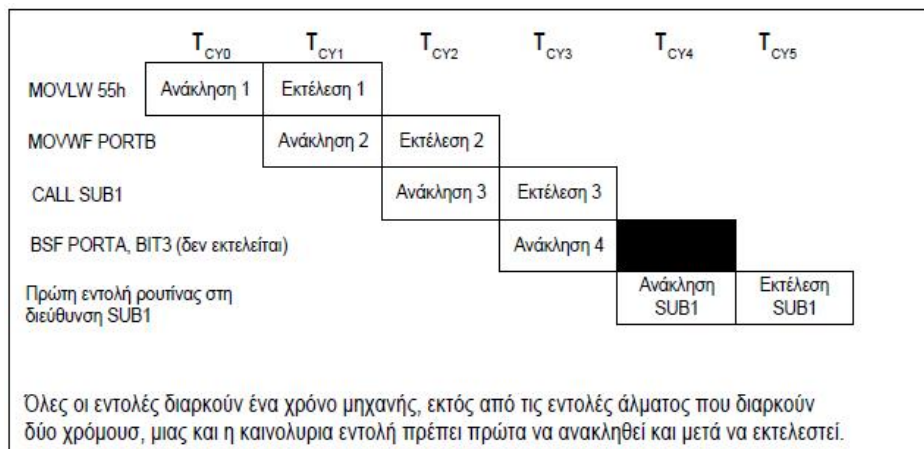
συνολικά για την ανάκληση και την εκτέλεση μιας εντολής χρειάζονται δύο κύκλους μηχανής. Όπως θα περιγραφεί και στη συνέχεια με τη βοήθεια της μονάδας συνεχούς διοχέτευσης (pipeline) επιτυγχάνεται το σύνολο της ανάκλησης και εκτέλεσης μιας εντολής να φαίνεται ότι διαρκεί μόνο ένα κύκλο μηχανής. Προκύπτει λοιπόν ότι εάν ένα PIC δουλεύει με ένα κρύσταλλο των 4 MHz, εκτελεί εντολές με ρυθμό 1 εκατομμύριο εντολές το δευτερόλεπτο, ή ότι η διάρκεια μιας εντολής είναι 1  $\mu$ s (= 4 / 4 MHz).

### Ø Μονάδα συνεχούς διοχέτευσης εντολών (Instruction Pipelining)

Ο κύκλος εντολής αποτελείται από τέσσερις Q φάσεις (Q1, Q2, Q3, Q4). Η αναζήτηση της εντολής διαρκεί ένα κύκλο εντολής και η εκτέλεση της άλλο ένα κύκλο εντολής. Εξαιτίας της μονάδας συνεχούς διοχέτευσης εντολών, η συνολική εκτέλεση μιας εντολής διαρκεί ένα μόνο κύκλο μηχανής αφού η ανάκληση της έχει πραγματοποιηθεί κατά την εκτέλεση της προηγούμενη εντολής. Εξαιρέση αποτελούν όλες εκείνες οι εντολές που αλλάζουν το περιεχόμενο του μετρητή προγράμματος (PC) μιας και η επόμενη εντολή που περιμένει στην ουρά της μονάδας συνεχούς διοχέτευσης δεν είναι αυτή που θα εκτελεστεί. Στην περίπτωση αυτή η εντολή διαρκεί δύο κύκλους μηχανής. Στον πρώτο κύκλο γίνεται η εκτέλεση της εντολής δηλαδή η αλλαγή του μετρητή προγράμματος, στον επόμενο κύκλο γίνεται ανάκληση της

σωστής εντολής και εκτέλεση μιας εντολής NOP (No OPeration) που ισοδυναμεί με άδειασμα του buffer της μονάδας συνεχούς διοχέτευσης.

Στη συνέχεια (Σχήμα 3.4 ) ακολουθεί ένα παράδειγμα εκτέλεσης τμήματος ενός προγράμματος. Το σχήμα δείχνει σε ποιο κύκλο μηχανής ανακαλείται κάθε εντολή και σε ποιο κύκλο εντολής εκτελείται. Παρατηρείται λοιπόν ότι μετά από την κλήση μιας υπορουτίνας με την εντολή CALL, η ουρά της συνεχούς διοχέτευσης αδειάζει και εκτελείται μια εντολή NOP. Ο επόμενος κύκλος ξεκινά με την ανάκληση της πρώτης εντολής της υπορουτίνας.

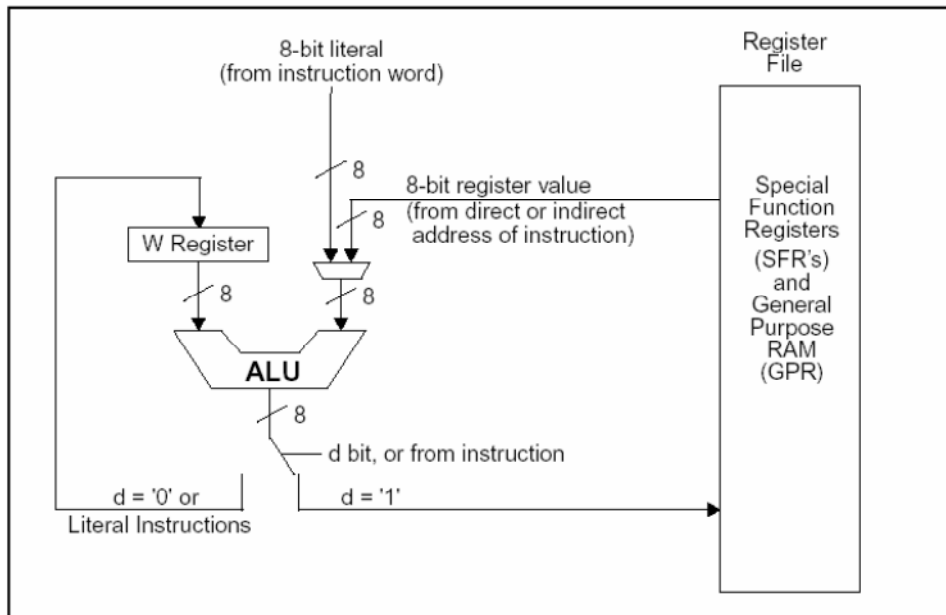


Σχήμα 3.4 Παράδειγμα συνεχούς διοχέτευσης εντολών (pipelining).

## Ø Αριθμητική Λογική Μονάδα (ALU)

Οι PIC της μεσαίας οικογένειας περιέχουν μια Αριθμητική Λογική Μονάδα των 8 bit. Η ALU είναι μιας γενικής χρήσης αριθμητική και λογική μονάδα. Είναι υπεύθυνη για αριθμητικές και λογικές πράξεις μεταξύ των δεδομένων στον καταχωρητή εργασίας (W register) και οποιουδήποτε άλλου καταχωρητή. Σε κάθε εντολή το





Σχήμα 3.5 Αριθμητική Λογική Μονάδα (ALU) του PIC.

αποτέλεσμα μπορεί να μεταφερθεί είτε στον καταχωρητή ο οποίος συμμετέχει στην πράξη είτε στον W register (ανάλογα με το d bit του Instruction Register). Στο σχήμα 4.5 που ακολουθεί παρουσιάζεται η ALU του PIC.

Η ALU έχει εύρος 8 bit και μπορεί να εκτελέσει αριθμητικές πράξεις (πρόσθεση, αφαίρεση), ολίσθησης και λογικής. Όλες οι αριθμητικές λειτουργίες είναι της μορφής συμπληρώματος ως προς 2. Σε περίπτωση εντολής με δύο τελεστές (operands), ο ένας είναι ο καταχωρητής εργασίας W ενώ ο άλλος μπορεί να είναι είτε οποιοσδήποτε άλλος καταχωρητής, είτε απ' ευθείας δεδομένα (literal). Σε εντολές με έναν τελεστή, αυτός μπορεί να είναι ή ο W register ή κάποιος άλλος καταχωρητής. Ο καταχωρητής εργασίας W είναι ένας καταχωρητής εύρους 8 bit και ο οποίος δεν είναι διευθυνσιοδοτημένος στην μνήμη δεδομένων. Το αποτέλεσμα της ALU αποθηκεύεται στον W register.

Αναλόγως την εντολή που εκτελείται, η αριθμητική λογική μονάδα μπορεί να επηρεάσει την τιμή του Carry (C), του Digit Carry (DC) και του Zero (Z) που περιέχονται στα τρία λιγότερο σημαντικά ψηφία (Less Significant Bits, LSBs) του καταχωρητή κατάστασης STATUS.

## ∅ Μνήμη Προγράμματος ROM (Program Memory)

Η οικογένεια PIC16XXX διαθέτει μετρητή προγράμματος των 13-bit και μπορεί συνεπώς να διαχειρίζεται μνήμη προγράμματος ίση με  $2^{13} = 8K$  θέσεις. Το εύρος του διαύλου επικοινωνίας με την μνήμη προγράμματος είναι 14 bit. Από τη στιγμή που όλες εντολές είναι μιας λέξης (single word), μια συσκευή με  $8K \times 14$  bit εντολής, διαθέτει χώρο για 8K εντολές. Η μνήμη εντολών διαιρείται σε τέσσερις σελίδες (pages) 2K λέξεων η κάθε μια, που αντιστοιχεί στις επόμενες διευθύνσεις :

- Page 1 : 0h - 7FFh
- Page 2 : 800h – FFFh
- Page 3 : 1000h - 17FFh
- Page 4 : 1800h - 1FFFh

Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζεται χάρτης της μνήμης προγράμματος. Για να γίνει εφικτή η εκτέλεση άλματος αρχικά θα πρέπει να οριστούν τα δύο bit του καταχωρητή PCLATH (PCLATH<4:3>) που προσδιορίζουν την αντίστοιχη σελίδα μνήμης. Επομένως πριν από μια εντολή CALL ή GOTO θα πρέπει να είναι σίγουρο ότι τα δύο bits που δείχνουν τον αριθμό της σελίδας είναι τα επιθυμητά. Αντίθετα όταν πραγματοποιείται επιστροφή από μια υπορουτίνα με μια εντολή RET, δεν χρειάζεται οποιοσδήποτε χειρισμός αυτών των δύο bits αφού και τα 13 bits του PC αποκαθίστανται από τη σωρό (Stack).

Για να γίνει άλμα μεταξύ διαφορετικών σελίδων θα πρέπει να γίνει αλλαγή στα υψηλής αξίας bits του μετρητή προγράμματος μέσω του καταχωρητή PCLATH. Στην περίπτωση που εκτελούνται διαδοχικά οι εντολές χωρίς την αλλαγή της ροής του προγράμματος τότε το πρόγραμμα θα συνεχίσει κανονικά σε μια νέα σελίδα ανεξάρτητα της τιμής του καταχωρητή PCLATH.

Κατά την επανεκκίνηση (reset) ο μετρητής προγράμματος (PC) και ο καταχωρητής PCLATH αρχικοποιούνται στην τιμή 0. Συνεπώς η αρχή για κάθε πρόγραμμα είναι η διεύθυνση 0 της σελίδας 0. Η διεύθυνση αυτή ονομάζεται άνυσμα διεύθυνσης επανεκκίνησης (Reset Vector Address).

Διεύθυνση Εκκίνησης Reset Vector	0000h
Διεύθυνση Εξυπηρέτησης Διακοπών Interrupt Vector	0004h
Μνήμη Προγράμματος- Σελίδα 0 (Page 0)	07FFh
Μνήμη Προγράμματος- Σελίδα 1 (Page 1)	0800h
Μνήμη Προγράμματος- Σελίδα 2 (Page 2)	0FFFh
Μνήμη Προγράμματος- Σελίδα 3 (Page 3)	1000h
	17FFh
	1800h
	1FFFh

Σχήμα 3.6 Χάρτης της μνήμης προγράμματος (Program memory map).

Όταν συμβαίνει κάποια διακοπή (Interrupt), ο μετρητής προγράμματος PC, παίρνει την τιμή 0004h που είναι η διεύθυνση της επόμενης εντολής που θα εκτελεσθεί. Η διεύθυνση αυτή καλείται άνυσμα διεύθυνσης διακοπής (Interrupt Vector Address). Ο καταχωρητής PCLATH δεν αλλάζει. Γι' αυτό μόλις γίνει εισαγωγή στην ρουτίνα εξυπηρέτησης της διακοπής (Interrupt Service Routine) θα πρέπει να αλλάζεται η διευθυνσιοδότησή του κατάλληλα και να αποθηκευτούν τα δεδομένα του ώστε να μην επηρεαστεί το κυρίως πρόγραμμα μετά την εξυπηρέτηση της διακοπής. Για την επιστροφή από τη διακοπή δεν χρειάζεται ο καταχωρητής PCLATH μια και ολόκληρος ο μετρητής προγράμματος αποθηκεύεται στη σωρό κατά την είσοδο μας στη ρουτίνα εξυπηρέτησης της διακοπής.

Η μνήμη προγράμματος περιέχει επίσης και ένα πλήθος πληροφοριών για την ακριβέστερη ρύθμιση της κάθε συσκευής (Calibration Values). Οι τιμές αυτές προγραμματίζονται από την Microchip, κατά την τελική δοκιμή της συσκευής.

### Ø Μνήμη Δεδομένων RAM (Data Memory)

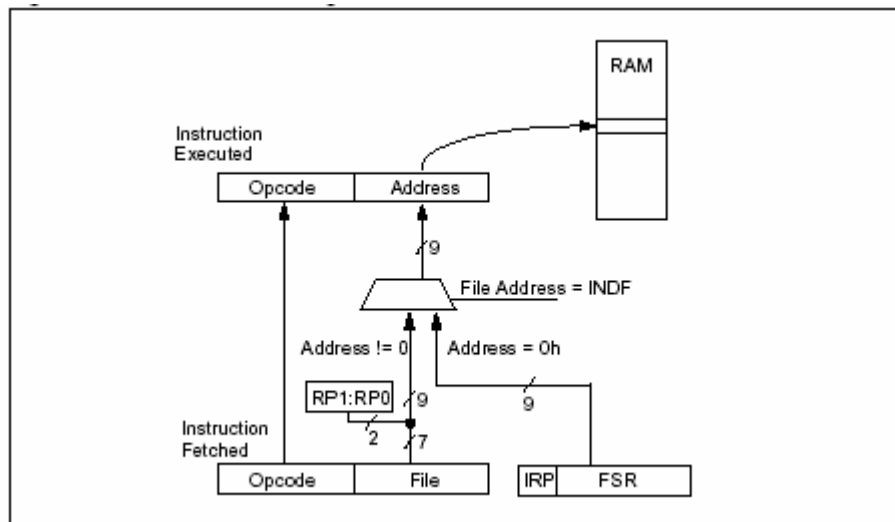
Η μνήμη δεδομένων περιέχει, τους ειδικού σκοπού καταχωρητές (Special Function Registers, SFRs) και τους γενικού σκοπού καταχωρητές (General Purpose

Registers, GPRs). Χωρίζεται σε τέσσερα το πολύ τμήματα (banks) των 128 bytes. Τα bits που ελέγχουν σε ποιο τμήμα (bank) γίνεται η αναφορά, είναι τα 3 MSB ψηφία του καταχωρητή STATUS και η μνήμη μπορεί να προσπελαστεί είτε άμεσα είτε έμμεσα. Κάθε τμήμα περιέχει καταχωρητές γενικού σκοπού (GPRs) και καταχωρητές ειδικού σκοπού (SFRs). Η σχηματική παρουσίαση της μνήμης του PIC ακολουθεί την δομή του Σχήματος 3.7.



## ∅ Καταχωρητές γενικού σκοπού (General purpose registers)

Οι καταχωρητές γενικού σκοπού είναι το σύνολο της διαθέσιμης μνήμης δεδομένων του χρήστη με συνολική χωρητικότητα 368 bytes. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7 οι καταχωρητές αυτοί βρίσκονται στο τέλος κάθε τμήματος. Οι καταχωρητές γενικής χρήσης δεν αρχικοποιούνται στην περίπτωση Power-on Reset και κρατούν τις τιμές τους στην περίπτωση όλων των άλλων resets. Οι καταχωρητές είναι προσβάσιμοι είτε άμεσα είτε έμμεσα μέσω του καταχωρητή File Select Register (FSR). Σε μερικές συσκευές, ένα μέρος των καταχωρητών αυτών είναι το ίδιο σε όλα τα τμήματα και συνεπώς η πρόσβαση σε αυτούς γίνεται ανεξαρτήτως του τμήματος (bank). Εγγραφή σε αυτούς σημαίνει εγγραφή στην ίδια διεύθυνση σε όλα τα τμήματα.



Σχήμα 3.10 Επιλογή τρόπου προσπέλασης της μνήμης.

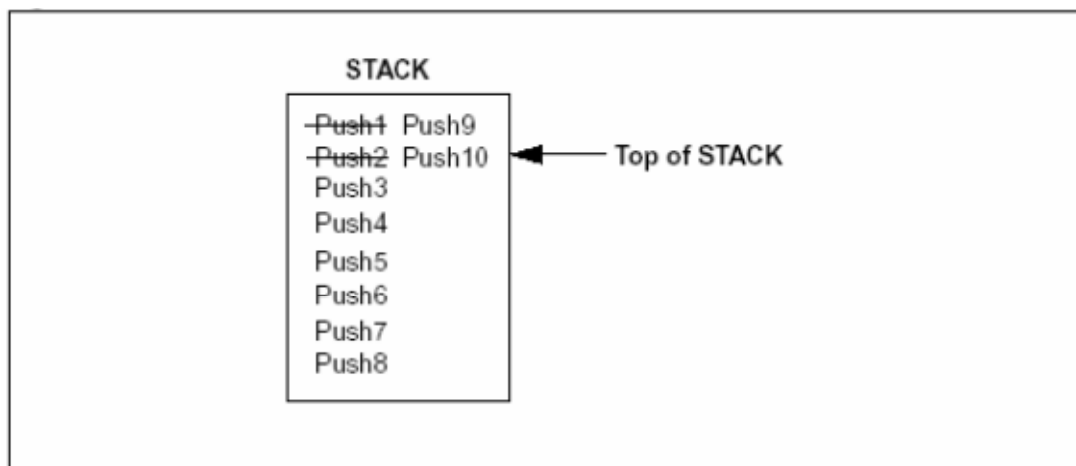
## ∅ Καταχωρητές ειδικού σκοπού (Special Function Registers)

Οι καταχωρητές ειδικού σκοπού μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες. Σε αυτούς που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της κατάστασης και τη ρύθμιση της λειτουργίας των περιφερειακών μονάδων και σε εκείνους που χρησιμοποιούνται από τον πυρήνα της συσκευής και την Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας. Μερικοί καταχωρητές ειδικού τύπου αρχικοποιούνται στην περίπτωση ενός Power on Reset ενώ άλλοι παραμένουν άθικτοι.

## ∅ Σωρός (Stack)

Η σωρός (stack) έχει διαστάσεις 8x13 bits επιτρέποντας να συμβούν διαδοχικά μέχρι 8 κλήσεις προγράμματος (CALL) ή διακοπών. Η σωρός δεν ανήκει ούτε στη μνήμη προγράμματος ούτε στη μνήμη δεδομένων. Το πρόγραμμα δεν μπορεί να έχει άμεση πρόσβαση στη σωρό ούτε για εγγραφή ούτε για ανάγνωση. Κατά την εκτέλεση μιας εντολής κλήσης υπορουτίνας (CALL) ή τη στιγμή που συμβαίνει μια διακοπή, η τιμή του PC προωθείται αυτόματα στη σωρό (PUSH). Μόλις το πρόγραμμα συναντήσει μια εντολή επιστροφής από υπορουτίνα ή διακοπή (RETURN, RETLW, RETFIE) η παλιά τιμή του PC ανακαλείται από τη σωρό και αποκαθίσταται. Ο καταχωρητής PCLATH δεν αλλάζει ενώ η τιμή του PC προωθείται προς τη σωρό ή ανακαλείται από αυτή.

Η σωρός είναι κυκλική. Αυτό σημαίνει ότι μόλις αποθηκευθεί η όγδοη λέξη, η επόμενη λέξη θα γραφτεί πάνω από την πρώτη, κ.ο.κ. (Σχήμα 4.11). Αυτό βέβαια θα έχει καταστροφικές συνέπειες για τη ροή του προγράμματος για αυτό θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι ο μέγιστος αριθμός των συνεχόμενων κλήσεων σε υπορουτίνες συνυπολογίζοντας και την περίπτωση κάποιας διακοπής, δεν θα πρέπει να ξεπερνά τις οκτώ.



Σχήμα 4.11 Τρόπος λειτουργίας της σωρού (stack).

## Ø Καταχωρητές PC και STATUS

Ο καταχωρητής προγράμματος (Program Counter, PC) δείχνει την εντολή που θα ανακληθεί από την μνήμη εντολών και θα εκτελεσθεί στον επόμενο κύκλο εντολής. Ο μετρητής προγράμματος έχει μήκος 13-bits συνεπώς μπορεί να διαχειριστεί μέχρι  $2^{13} = 8K$  μνήμης προγράμματος.

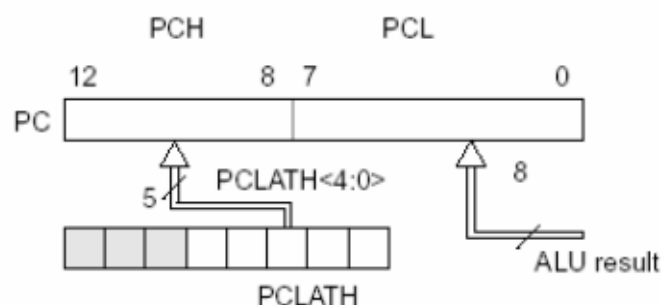
Ο καταχωρητής PC αποτελείται από δύο τμήματα. Τα 8 λιγότερο σημαντικά bits του καταχωρητή PC βρίσκονται στον καταχωρητή PCL. Ο προγραμματιστής έχει άμεση πρόσβαση σε αυτά για εγγραφή ή ανάγνωση.



Σχήμα 3.12 Μετρητής προγράμματος PC.

Τα 5 περισσότερα σημαντικά bits περιέχονται στον καταχωρητή PCH αλλά δεν είναι προσβάσιμα για ανάγνωση παρά μόνο για εγγραφή. Οι αλλαγές στον PCH γίνονται έμμεσα μέσω του καταχωρητή PCLATH (Program Counter Latch High). Τα 3 λιγότερα σημαντικά bits του καταχωρητή PCLATH παραμένουν πάντα μηδενικά.

Υπάρχουν διαθέσιμοι διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους αλλάζει το περιεχόμενο του μετρητή προγράμματος PC. Στην περίπτωση του επόμενου σχήματος (Σχήμα 3.13) πραγματοποιείται απευθείας αναφορά με προορισμό τον καταχωρητή PCL.

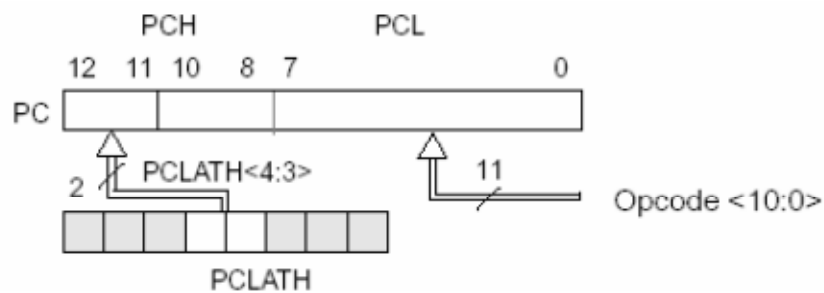


Σχήμα 3.13 Απευθείας αναφορά στα 8 χαμηλής αξίας bit του μετρητή προγράμματος.



Το όρισμα που έρχεται από την αριθμητική και λογική μονάδα, ALU, τοποθετείται απευθείας στο κομμάτι PCL του μετρητή προγράμματος ενώ τα υπόλοιπα 5 bit του μετρητή προγράμματος, δηλαδή το τμήμα PCH, φορτώνονται από τον καταχωρητή PCLATH. Για παράδειγμα, για να εκτελεστεί μια εντολή άλματος με μεταβλητό όρισμα διεύθυνσης αρκεί να προσθέσουμε την επιθυμητή τιμή (offset) στον καταχωρητή PCL.

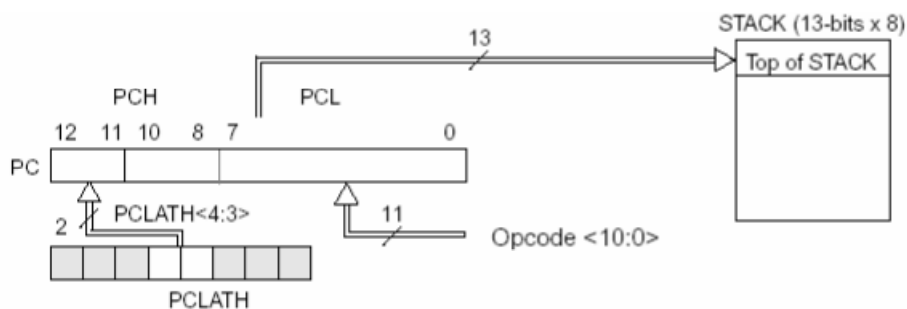
Το επόμενο σχήμα (Σχήμα 3.14) εξηγεί την περίπτωση όπου υπάρχει μια εντολή άλματος (GOTO).



Σχήμα 3.14 Αλλαγή περιεχομένου του μετρητή για την εντολή GOTO.

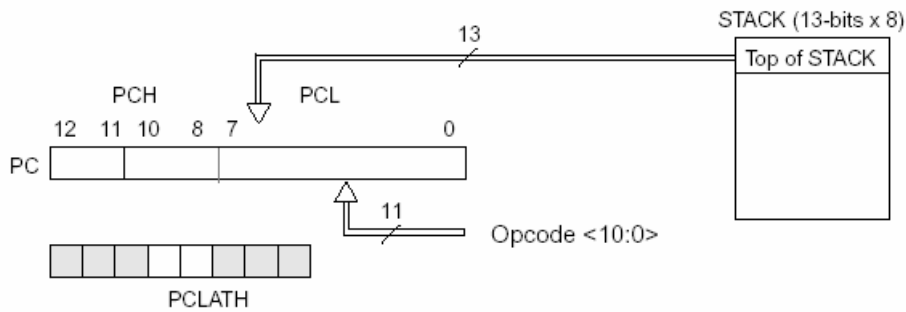
Το όρισμα της διεύθυνσης στην εντολή άλματος GOTO, έχει μήκος 11 δυαδικά ψηφία, τα οποία φορτώνονται απευθείας στα 11 μικρότερης αξίας δυαδικά ψηφία (<10:0>) του μετρητή προγράμματος PC. Τα υπόλοιπα 2 bits προέρχονται από τον καταχωρητή PCLATH.

Η εντολή κλήσης υπορουτίνας (CALL) λειτουργεί όπως ακριβώς και η εντολή άλματος GOTO μόνο που, επιπλέον, ολόκληρη η τιμή του καταχωρητή PC, αποθηκεύεται στη σωρό.



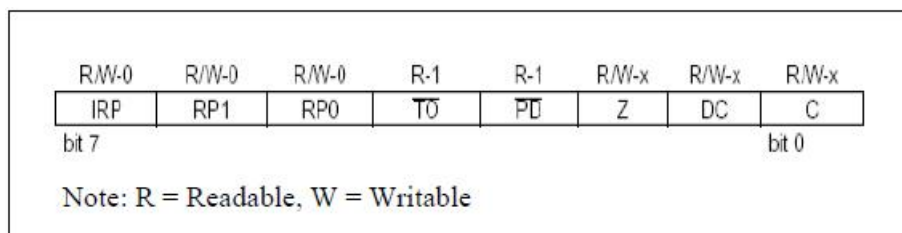
Σχήμα 3.15 Αλλαγή περιεχομένου του μετρητή προγράμματος κατά την εκτέλεση της εντολής CALL.

Τέλος στην περίπτωση όπου υπάρχει επιστροφή από υπορουτίνα ή διακοπή, ανακαλείται ολόκληρη η τιμή του μετρητή προγράμματος PC από τη σωρό όπου είχε αποθηκευθεί προσωρινά οπότε δεν χρειάζεται ο χειρισμός των bits του PCLATH για να γίνει επιστροφή στην σωστή διεύθυνση.



Σχήμα 3.16 Αλλαγή περιεχομένου του μετρητή προγράμματος σε περίπτωση επιστροφής από υπορουτίνα.

Ο καταχωρητής κατάστασης Status περιέχει τις σημαίες (flags), που δίνουν πληροφορίες για το αποτέλεσμα που προκύπτει από την Αριθμητική Λογική Μονάδα, καθώς επίσης και τα bits εκείνα που είναι απαραίτητα για την επιλογή του κατάλληλου τμήματος της μνήμης κατά την προσπέλασή της. Επιπρόσθετα, τα bits 3 και 4 του καταχωρητή Status δεν μπορούν να εγγραφούν από τον χρήστη, παρά μόνο να διαβαστούν. Συνεπώς, η εγγραφή στη μνήμη με προορισμό τον καταχωρητή κατάστασης μπορεί να μην έχει το αποτέλεσμα που αναμένεται. Ειδικότερα, τα bits που αποτελούν τον καταχωρητή κατάστασης φαίνονται στο Σχήμα 3.17.



Σχήμα 3.17 Τα bit του καταχωρητή κατάστασης (STATUS).

### Επεξήγηση των bit του Status Register:

- Bit 7 : IRP (Register Bank Select bit): Bit για την επιλογή του τμήματος μνήμης (για έμμεση προσπέλαση)

1 = Bank 2, 3 (100h - 1FFh)

0 = Bank 0, 1 (00h - FFh)

- Bit 6:5 : **RP1:RP0**: (Register Bank Select bits) Bit για την επιλογή του τμήματος μνήμης (για άμεση προσπέλαση)

11 = Bank 3 (180h - 1FFh)

10 = Bank 2 (100h - 17Fh)

01 = Bank 1 (80h - FFh)

00 = Bank 0 (00h - 7Fh)

- Bit 4 : **TO**: (Time-out bit)

1 = Στο άνοιγμα ή κατά τις εντολές CLRWDT και SLEEP

0 = Όταν ο μετρητής Watchdog Timer υπερχειλίσει(Overflow)

- Bit 3 : **PD**: (Power-down bit)

1 = Στο άνοιγμα ή κατά την εντολή CLRWDT

0 = Κατά την εκτέλεση της εντολής SLEEP

- Bit 2 : **Z**: (Zero Bit) Bit μηδενισμού

1 = Το αποτέλεσμα της αριθμητικής ή λογικής πράξης είναι 0

0 = Το αποτέλεσμα δεν είναι 0

- Bit 1 : **DC**: (Digit carry / borrow) Bit ενδιάμεσου κρατούμενου / δανεισμού

1 = Δημιουργήθηκε κρατούμενο από το 4ο στο 5ο bit.

0 = Δεν δημιουργήθηκε κρατούμενο από το 4ο στο 5ο bit.

- Bit 0 : **C**: (Cary Bit) Bit κρατούμενου / δανεισμού

1 = Δημιουργήθηκε κρατούμενο από το 8ο στο 9ο bit.

0 = Δεν δημιουργήθηκε κρατούμενο από το 8ο στο 9ο bit.

## Ø Διακοπές (Interrupts)

Οι PIC υποστηρίζουν ένα μεγάλο αριθμό διακοπών. Οι διακοπές κατά πλειοψηφία παράγονται από τις περιφερειακές μονάδες. Υπάρχουν και περιφερειακές μονάδες οι οποίες μπορούν να παράγουν περισσότερες από μία διακοπές, όπως είναι ο πομπός / δέκτης σύγχρονης σειριακής επικοινωνίας (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter, USART)

Οι σημαντικότερες διακοπές είναι:

- ο Εξωτερική διακοπή στον ακροδέκτη PB0/INT (external interrupt)
- ο Διακοπή από υπερχείλιση του χρονιστή timer0 (TMR0 Overflow Interrupt)
- ο Διακοπή όταν αλλάζει κατάσταση ένας από τους ακροδέκτες PORTB<7:4> (PORTB change interrupt)
- ο Διακοπή παράλληλης θύρας (Parallel Slave Port Interrupt)
- ο Διακοπές σειριακής θύρας (USART Interrupts)
- ο Διακοπή σειριακής λήψης (Receive Interrupt)
- ο Διακοπή σειριακής αποστολής (Transmit Interrupt)
- ο Διακοπή υπερχείλισης του χρονιστή 1 (Timer1 Overflow Interrupt)
- ο Διακοπή υπερχείλισης του χρονιστή 2 (Timer2 Overflow Interrupt)

Η κάθε διακοπή ελέγχεται από δύο bits, το *intIE* (Interrupt Enable bit) και το *intIF* (Interrupt Flag Bit). Το *intIE* bit ενεργοποιεί την αντίστοιχη διακοπή ενώ το *intIF* σηματοδοτεί ότι υπάρχει διακοπή προς εξυπηρέτηση.

Το bit *intIF* γίνεται λογικό ένα "1" ανεξάρτητα, με το αν είναι ενεργοποιημένη η αντίστοιχη διακοπή ή όχι, δηλαδή αν το *intIE* είναι "1" ή "0". Το *intIF* δε γίνεται από μόνο του μηδέν μόλις εξυπηρετηθεί η διακοπή που προκάλεσε, και πρέπει να μηδενίζεται από το πρόγραμμα της ρουτίνας εξυπηρέτησης γιατί διαφορετικά θα προκληθεί νέα διακοπή. Το ίδιο bit μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς την χρήση διακοπών για να αναγνωρίζουμε το γεγονός που περιγράφει η αντίστοιχη διακοπή. Η διαδικασία αυτή γίνεται εξετάζοντας την τιμή του συγκεκριμένου bit κατά τακτά χρονικά διαστήματα (polling). Η λογική των διακοπών παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.18.



Το **GIE** (Global Interrupt Enable bit) ενεργοποιεί τις διακοπές αν είναι ένα (1) ενώ τις απενεργοποιεί αν είναι μηδέν (0).

Το **PIE** (Peripheral Interrupt Enable bit) αντίστοιχα, ενεργοποιεί όλες τις διακοπές από τα περιφερειακά όταν είναι ένα (1), ενώ τις απενεργοποιεί όταν είναι μηδέν (0).

Το **TOIE** (TMR0 Overflow Interrupt Enable bit ) ενεργοποιεί την διακοπή του Timer 0.

Το **INTE** (External Interrupt Enable bit) ενεργοποιεί την διακοπή του εξωτερικού ακροδέκτη INT.

Το **RBIE** (RB port change Interrupt Enable bit)ενεργοποιεί την διακοπή που συμβαίνει κάθε φορά που αλλάζει ένα από τα τέσσερα σημαντικότερα bits της PORTB (PORTB change interrupt) και εφόσον αυτά έχουν τεθεί ως είσοδοι.

Τα bit **TOIF** (Testing Overflow bit), **INTF** (external Interrupt Flag bit), **RBIF** (RB Port Change Interrupt Flag bit) αποτελούν τις αντίστοιχες σημαίες που δείχνουν πότε συμβαίνει κάποια από τις παραπάνω διακοπές. Όταν συμβαίνει μια διακοπή, το bit GIE μηδενίζεται αυτόματα ώστε να μη μπορούν να προκληθούν και άλλες διακοπές. Η διεύθυνση επιστροφής που βρίσκεται στον PC προωθείται στη στοίβα και ο PC παίρνει την τιμή 0004h. Η διεύθυνση εκκίνησης της ρουτίνα εξυπηρέτησης των διακοπών, ή διάνυσμα διακοπών (Interrupt Vector), είναι κοινή για όλες τις διακοπές και είναι η διεύθυνση 0004h. Το αίτιο της διακοπής καθορίζεται από τις σημαίες των διακοπών *int(name)IF*, που βρίσκονται στους καταχωρητές INTCON και PIR. Το πρόγραμμα επιστρέφοντας από μία ρουτίνα εξυπηρέτησης διακοπής με την εντολή RETFIE, θέτει ξανά σε λογικό 1 το GIE με αποτέλεσμα να εκτελείται οποιαδήποτε διακοπή περιμένει (pending Interrupt). Κατά την εκκίνηση ή επανεκκίνηση του μικροελεγκτή το GIE μηδενίζεται και η διακοπές είναι απενεργοποιημένες.

Ανάλογα με τα περιφερειακά που περιέχονται σε ένα μικροελεγκτή της οικογένειας PIC μπορούμε να έχουμε ένα ή και παραπάνω καταχωρητές ενεργοποίησης διακοπών **PIE** και ελέγχου διακοπών **PIR**. Κάθε bit του καταχωρητή **PIE** σχετίζεται με την ενεργοποίηση μιας διακοπής ενός περιφερειακού ενώ ο καταχωρητής **PIR** μας δείχνει ποιες διακοπές περιμένουν να εξυπηρετηθούν. Με άλλα λόγια ο **PIE** περιέχει

τις σημαίες ενεργοποίησης των διακοπών *int IE*, ενώ ο **PIR** τις σημαίες ένδειξης διακοπής *int IF*.

### 3.4.3. Τα περιφερειακά του PIC

#### Ø Γενικής χρήσης μονάδες εισόδου-εξόδου I/O (Ports)

Οι γενικής χρήσης θύρες εισόδου-εξόδου, (I/O ports), είναι τα πιο απλά περιφερειακά. Οι θύρες αυτές είναι διπλής κατεύθυνσης και η κατεύθυνση του κάθε ακροδέκτη, δηλαδή το αν ένας ακροδέκτης λειτουργεί ως είσοδος ή ως έξοδος, ελέγχεται από τον καταχωρητή ελέγχου κατεύθυνσης που καλείται TRIS. Ο καταχωρητής TRISx ελέγχει αντίστοιχα τη διεύθυνση στην θύρα PORTx. Εάν κάποιο bit του καταχωρητή TRISx είναι μονάδα τότε ο αντίστοιχος ακροδέκτης της θύρας συμπεριφέρεται ως είσοδος, ενώ αν το bit είναι μηδέν ο ακροδέκτης συμπεριφέρεται ως έξοδος.

Ο καταχωρητής PORTx περιέχει τα δεδομένα εξόδου της θύρας. Όταν διαβάζουμε τα δεδομένα του καταχωρητή PORTx δε διαβάζουμε τον ίδιο τον καταχωρητή αλλά ότι εμφανίζεται στους ακροδέκτες της θύρας.

Για οικονομία στο πλήθος των ακροδεκτών, οι είσοδοι και οι έξοδοι των περιφερειακών του PIC, όπως είναι ο A/D μετατροπέας, οι σειριακές θύρες κτλ., χρησιμοποιούν τους ίδιους ακροδέκτες με τις ψηφιακές θύρες. Το περιφερειακό αποφασίζει τον τρόπο που λειτουργεί ο ακροδέκτης που χρησιμοποιεί και μπορεί να παρακάμψει τη λειτουργικότητα του καταχωρητή TRIS.

- PORTB - Οι καταχωρητές PORTB και TRISB

Η θύρα B είναι μια θύρα 8 δυαδικών ψηφίων, διπλής κατεύθυνσης. Η κατεύθυνση των ακροδεκτών, δηλαδή το αν ένας ακροδέκτης συμπεριφέρεται ως είσοδος ή ως έξοδος, καθορίζεται από τον καταχωρητή TRISB. Κάθε ακροδέκτης από την PORTB έχει έναν μικρής ισχύος pull-up διακόπτη. Μηδενίζοντας το bit RPBU (OPTION<7>) μπορούμε να ενεργοποιήσουμε όλα τα pull-up. Το pull-up κομμάτι απενεργοποιείται αυτόματα όταν ο ακροδέκτης ρυθμίζεται ως έξοδος καθώς και μετά από ένα power on reset. Τα 4 περισσότερο σημαντικά bits της θύρας B, δηλαδή οι ακροδέκτες RB7:RB4 παρέχουν τη λειτουργία κατά την οποία προκαλείται διακοπή μόλις αλλάξει η τιμή







**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>**  
**ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ**

## 4.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια περιγράφηκε η θεωρία λειτουργίας των απαραίτητων τμημάτων για την οδήγηση βηματικών κινητήρων μέσω μικροελεγκτή που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της διαδικασίας σχεδιασμού και υλοποίησης των στοιχείων που απαρτίζουν τη συσκευή αυτή.

Σκοπός λοιπόν της εργασίας αυτής είναι να κατασκευαστεί η διάταξη για την οδήγηση διπολικών βηματικών κινητήρων, η οποία να δίνει τη δυνατότητα σε προπτυχιακούς σπουδαστές του τμήματος να γνωρίσουν τις ιδιαιτερότητες του τρόπου λειτουργίας και ελέγχου των κινητήρων αυτών.

Η επιλογή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν έγινε με βάση των στοιχείων που συλλέχθηκαν από τη θεωρητική ανάλυση, τη διαθεσιμότητα τους στη αγορά, το κόστος αγοράς των στοιχείων και το βασικότερο μετά από σειρά δοκιμών και μετρήσεων.

## 4.2 Σχεδιαστικές προδιαγραφές και απαιτήσεις

Σύμφωνα με τον τίτλο της παρούσας εργασίας έπρεπε να κατασκευαστεί διάταξη τροφοδοτούμενη με τάση 5 V ικανή να οδηγήσει διπολικούς βηματικούς κινητήρες με μέγιστη τιμή ρεύματος τα 2.5 A. Οι αρχικές προδιαγραφές της διάταξης ήταν οι εξής:

- ∅ Επιλογή συνεχόμενης κίνησης ή κίνησης ανά βήμα
- ∅ Επιλογή δεξιόστροφης ή αριστερόστροφης κίνησης.
- ∅ Επιλογή τρόπου βηματισμού ανάμεσα σε βηματισμό πλήρους βήματος με διέγερση ενός τυλίγματος, με διέγερση δύο τυλιγμάτων και μισού βήματος.
- ∅ Περιστροφή με ελεγχόμενη ταχύτητα.

Ø Προβολή στοιχείων ελέγχου στον χρήστη μέσω οθόνης υγρών κρυστάλλων.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές που τέθηκαν έγινε η επιλογή των υλικών και των απαραίτητων λύσεων για την κατασκευή της διάταξης. Σύμφωνα λοιπόν με τη θεωρητική ανάλυση, η οδήγηση διπολικών βηματικών κινητήρων γίνεται μέσω δύο πλήρως ελεγχόμενων γεφυρών. Η οδήγηση τους βέβαια θα μπορούσε να γίνει εύκολα με τη χρήση ολοκληρωμένων οδηγών που υπάρχουν στο εμπόριο (όπως το L298 της ST και το DRV8811 της Texas Instruments) που εκτός ότι ενσωματώνουν τα δύο κυκλώματα των γεφυρών, διαθέτουν και άλλα χρήσιμα χαρακτηριστικά όπως ο έλεγχος του ρεύματος. Η υλοποίηση τους όμως επιλέχθηκε να γίνει με διακριτά υλικά ώστε να γίνεται ευκολότερα κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας τους.

Το αμέσως επόμενο βήμα ήταν να βρεθεί ο μικροελεγκτής ο οποίος θα οδηγούσε τις δυο αυτές γέφυρες. Καθώς κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως εξόδους PWM και ενσωματωμένους μετατροπείς αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά δεν ήταν απαραίτητα, η λύση βρέθηκε στο δημοφιλή μικροελεγκτή γενικού σκοπού της Microchip τον PIC 16f628. Ενώ αρχικά η διαθέσιμη μνήμη των 2 KBytes για την αποθήκευση του κώδικα προγράμματος και των 16 I/O αρχικά έδειχναν να καλύπτουν τη συγκεκριμένη εφαρμογή, κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού του όμως, στην ενσωμάτωση περισσότερων λειτουργιών, η μνήμη κώδικα αποδείχτηκε μικρότερη της απαιτούμενης. Στην περίπτωση αυτή υπήρχαν δύο διαθέσιμες λύσεις εκ των οποίων η πρώτη περιελάμβανε ορισμένες τροποποιήσεις στο κύκλωμα και την αντικατάσταση του μικροελεγκτή με άλλον μεγαλύτερης μνήμης, ενώ η δεύτερη λύση ήταν να ξαναγραφεί ο κώδικας προγράμματος σε assembly ώστε να καθαριστεί ο περιττός κώδικας που εισήγαγε ο μεταγλωττιστής (compiler) της Basic. Επομένως ο μικροελεγκτής 16F628 αντικαταστάθηκε από τον αμέσως επόμενο διαθέσιμο μικροελεγκτή 16F877 με 8 KBytes μνήμη προγράμματος και 33 I/O.

### **4.3 Κύκλωμα ισχύος**

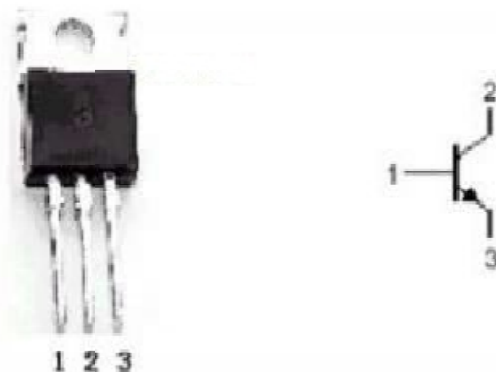
Στο αρχικό στάδιο της υλοποίησης σχεδιάστηκε το θεωρητικό μοντέλο της πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας και ελέγχθηκε η ορθότητα λειτουργίας της μέσω του προγράμματος Multisim της σουίτας Circuit Design της National Instruments. Η

κατασκευή άρχισε με τη βοήθεια μιας πλαστικής διάτρητης δοκιμαστικής πλακέτας (breadboard) πάνω στην οποία τοποθετήθηκαν τα πρώτα υλικά τα οποία άρχισαν να συνθέτουν την τοπολογία της γέφυρας. Οι δοκιμές αρχικά έγιναν με τέσσερα διπολικά NPN τρανζίστορ όμως υπήρχε ένας σημαντικός παράγοντας που έπρεπε να ληφθεί υπ'όψιν.

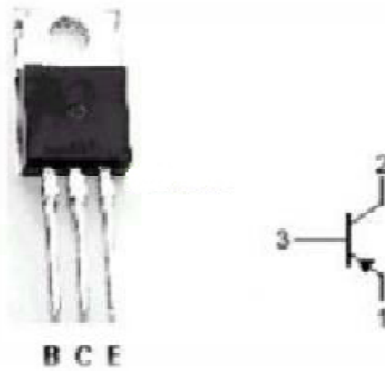
Τα κάτω NPN τρανζίστορ της γέφυρας έρχονται σε κόρο αν μεταξύ βάσης-εκπομπού εφαρμοστούν παλμοί τάσης 5 V επειδή ο εκπομπός τους είναι γειωμένος. Αντίθετα, λόγω σύνδεσης των εκπομπών των άνω NPN τρανζίστορ με τους συλλέκτες των κάτω NPN τρανζίστορ (emitter follower), τα άνω NPN τρανζίστορ της γέφυρας απαιτούν την εφαρμογή παλμών μεγαλύτερης τάσης μεταξύ βάσης-εκπομπού. Το πρόβλημα αυτό εξαλείφεται χωρίς να επιφέρει σημαντικές απώλειες ισχύος στο κύκλωμα με την αντικατάσταση των άνω NPN τρανζίστορ με τρανζίστορ τύπου PNP. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να ενσωματωθεί στο κύκλωμα τεχνική αύξησης τάσης αντίστοιχης της bootstrapping των Mosfet και IGBT.

#### 4.3.1 Επιλογή ημιαγωγικών στοιχείων

Τα τρανζίστορ που επιλέχθηκαν είναι τεχνολογίας BJT, λόγω της μικρής απώλειας αγωγής τους. Συγκεκριμένα για τρανζίστορ ισχύος χρησιμοποιήθηκαν τα NPN BD241C και PNP BD242C που είναι μεσαίας ισχύος, επιτρέπουν ρεύμα μέχρι 3 A και δέχονται ανάστροφη τάση μεταξύ συλλέκτη-εκπομπού έως 100 V.



Σχήμα 4.1 Τρανζίστορ NPN BD241C.



Σχήμα 4.2 Τρανζίστορ PNP BD242C.

Τα τρανζίστορ ισχύος λειτουργούν ως ημιαγωγικοί διακόπτες στη τοπολογία πλήρους γέφυρας, δηλαδή στις περιοχές κόρου και αποκοπής. Σε αυτές τις συνθήκες σύμφωνα με τις χαρακτηριστικές λειτουργίας του εγχειριδίου τους, το κέρδος ρεύματος είναι 20, με αποτέλεσμα την ανάγκη υψηλού ρεύματος οδήγησης βάσης για το επιθυμητό ρεύμα των 2.5 A στους συλλέκτες τους.

Οι παλμοί ελέγχου που στέλνονται από τον μικροελεγκτή έχουν πλάτος 5 V με μέγιστη ένταση ρεύματος τα 25 mA, τα οποία δεν αρκούν για την οδήγηση των τρανζίστορ ισχύος στα επιθυμητά επίπεδα ρεύματος της εφαρμογής. Για το λόγο αυτό στο κύκλωμα προστέθηκαν ως οδηγοί τα γενικής χρήσεως NPN τρανζίστορ BC337 (Σχήμα 4.3), τα οποία με ρεύμα εξόδου της τάξης των 800 mA οδηγούν επαρκώς τα τρανζίστορ ισχύος BD241C.

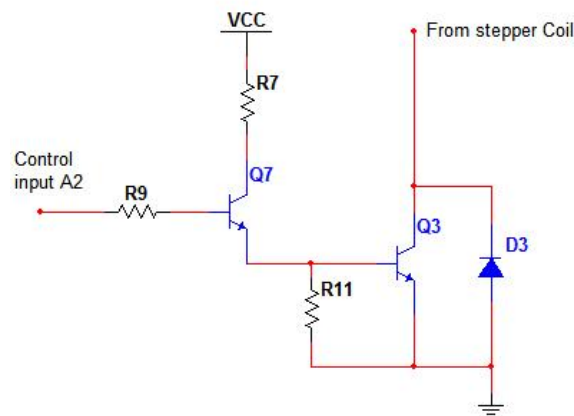


Σχήμα 4.3 Τρανζίστορ NPN BC337.

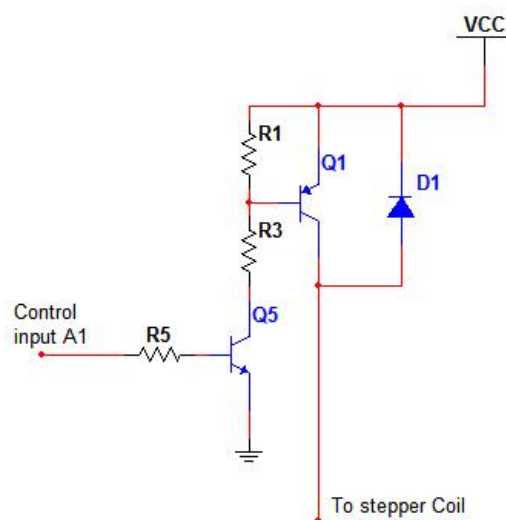
Για την καταστολή των υπερτάσεων και την επιστροφή της ενέργειας στην πηγή οι δίοδοι που επιλέχθηκαν είναι οι BY399, με ικανότητα να διαχειριστούν σε διακοπτική λειτουργία ρεύματα μέχρι 3 A, αντοχή σε ανάστροφη τάση 800 V και χρόνο ανάστροφης ανάκτησης 200 nsec.

### 4.3.2 Διασύνδεση ημιαγωγικών στοιχείων σε τοπολογία πλήρους ελεγχόμενης γέφυρας

Τα NPN τρανζίστορ ισχύος τοποθετήθηκαν στο κύκλωμα (Σχήμα 4.4), σε συνδεσμολογία διασφάλισης χαμηλής στάθμης (pull-down) μέσω της αντίστασης R11. Με την τοπολογία αυτή εξασφαλίζεται η αποκοπή τους όταν δεν στέλνονται παλμοί από το κύκλωμα ελέγχου καθώς οι βάσεις τους βρίσκονται σε χαμηλό δυναμικό. Ακολουθώντας την ίδια λογική, τα PNP τρανζίστορ του άνω σκέλους της γέφυρας τοποθετήθηκαν σε συνδεσμολογία διασφάλισης υψηλής στάθμης (pull-up) μέσω της αντίστασης R1 (Σχήμα 4.5).

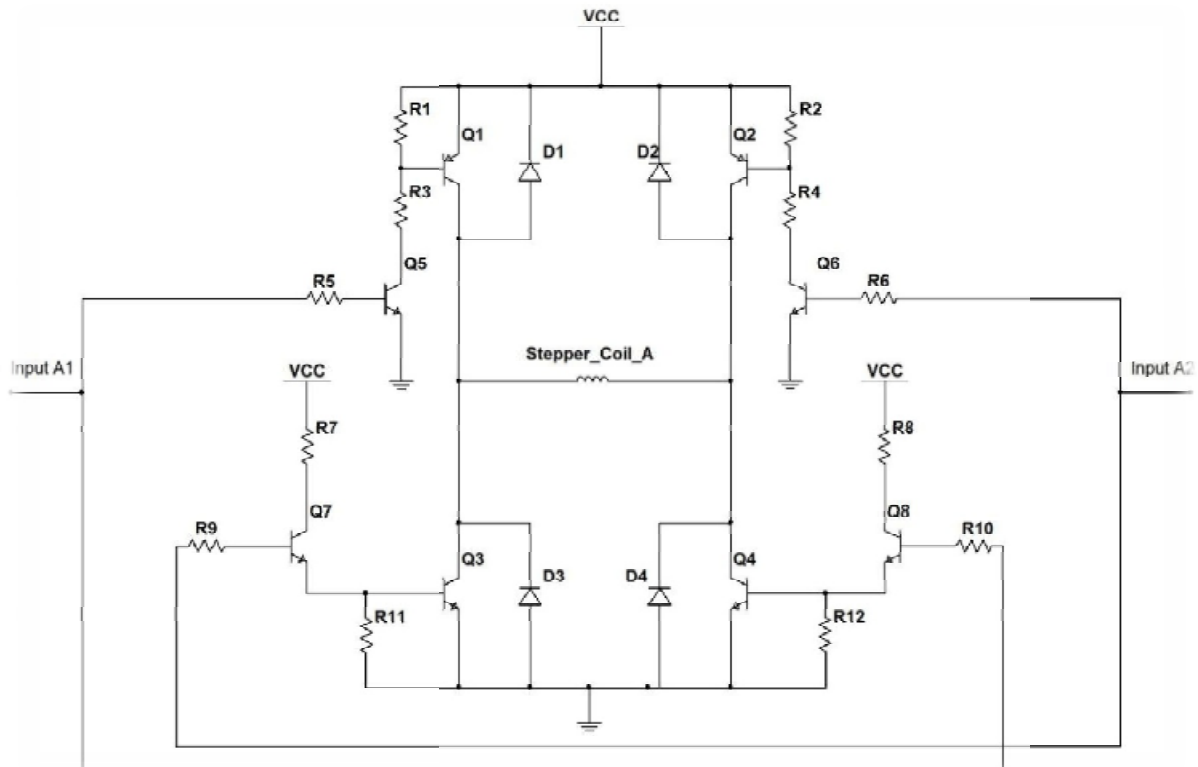


Σχήμα 4.4 Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης NPN τρανζίστορ της γέφυρας.



Σχήμα 4.5 Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης PNP τρανζίστορ της γέφυρας.

Για να μειωθεί το πλήθος των σημάτων του κυκλώματος ελέγχου που καταλήγουν στις δύο γέφυρες, συνδέθηκαν αντιδιαμετρικά οι ακροδέκτες ελέγχου των οδηγών των τρανζίστορ ισχύος Q5,Q8 και Q7,Q6 . Η σύνδεση αυτή επιτρέπει τον ταυτόχρονο έλεγχο δύο στοιχείων με τον ίδιο παλμό, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τα απαιτούμενα σήματα σε τέσσερα συνολικά για τον έλεγχο και των δύο γεφυρών.



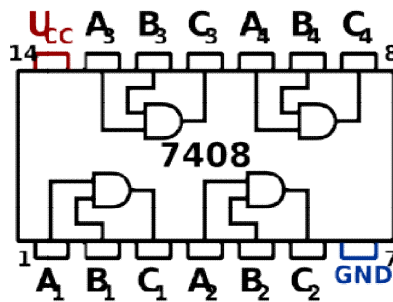
Σχήμα 4.6 Σχηματικό διάγραμμα πλήρους γέφυρας με ταυτόχρονο έλεγχο στοιχείων.

#### 4.3.3 Κύκλωμα χρονικής καθυστέρησης ανερχόμενου μετώπου παλμού

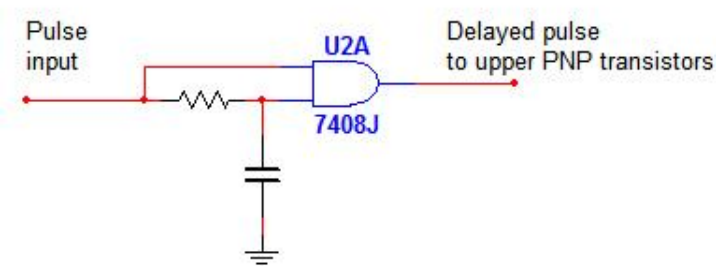
Καθώς οι χρόνοι έναυσης και αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων είναι πεπερασμένοι, είναι απαραίτητη η εισαγωγή χρονικής καθυστέρησης για την ασφαλή μετάβαση της κατάστασης λειτουργίας τους. Στην περίπτωση όμως του ταυτόχρονου ελέγχου δύο διακοπτικών στοιχείων η εισαγωγή αυτή δεν μπορεί να εφαρμοστεί μέσω προγραμματισμού του μικροελεγκτή. Για το λόγο αυτό τα σήματα εισόδου των PNP τρανζίστορ Q1 και Q2 εφαρμόζονται σε πύλες AND μέσω του ολοκληρωμένου 7408 μια φορά απευθείας και μια φορά με καθυστέρηση μέσω δικτυώματος RC. Με τον τρόπο αυτό, μια μετάβαση του παλμού εισόδου από υψηλό σε χαμηλό δυναμικό



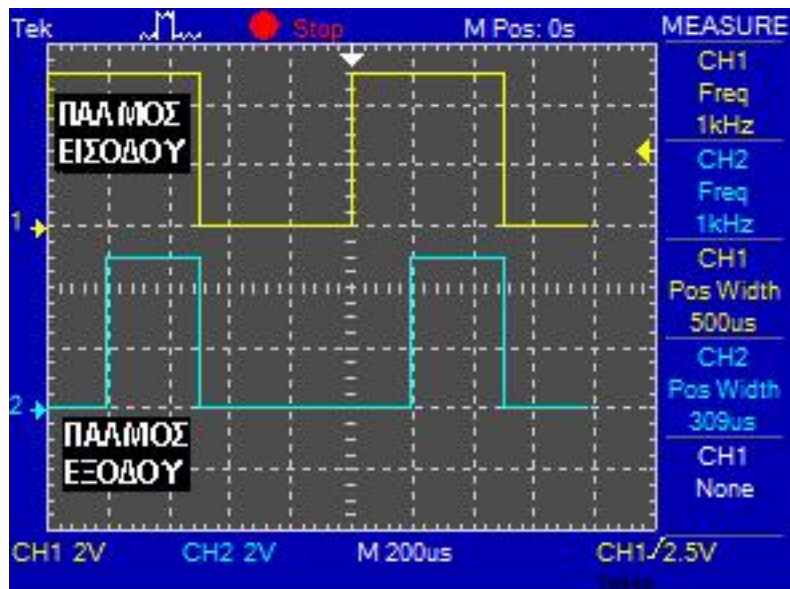
μεταβιβάζεται απευθείας από την πύλη, ενώ σε αντίθετη περίπτωση δηλαδή από χαμηλό δυναμικό σε υψηλό, μεταβιβάζεται με χρονική καθυστέρηση (Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.7 Σχηματικό διάγραμμα ολοκληρωμένου 7408.

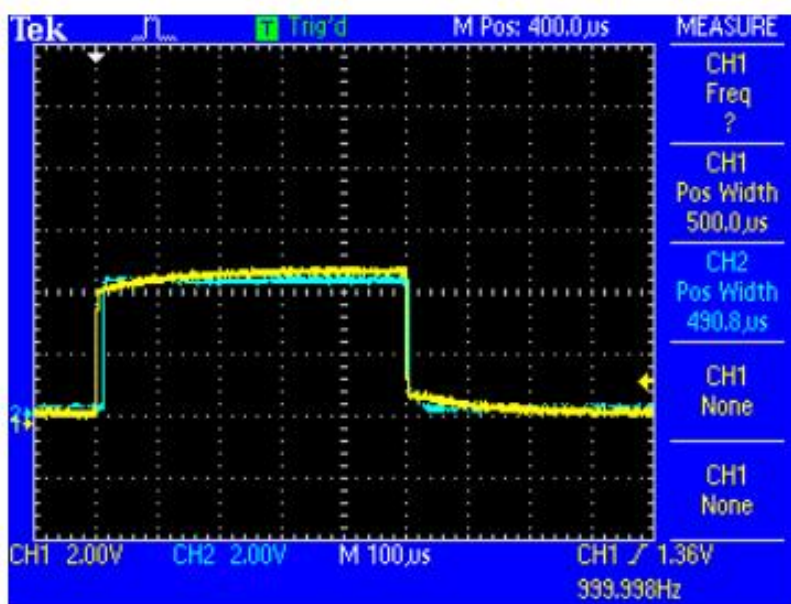


Σχήμα 4.8 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος καθυστέρησης παλμών των PNP τρανζίστορ.



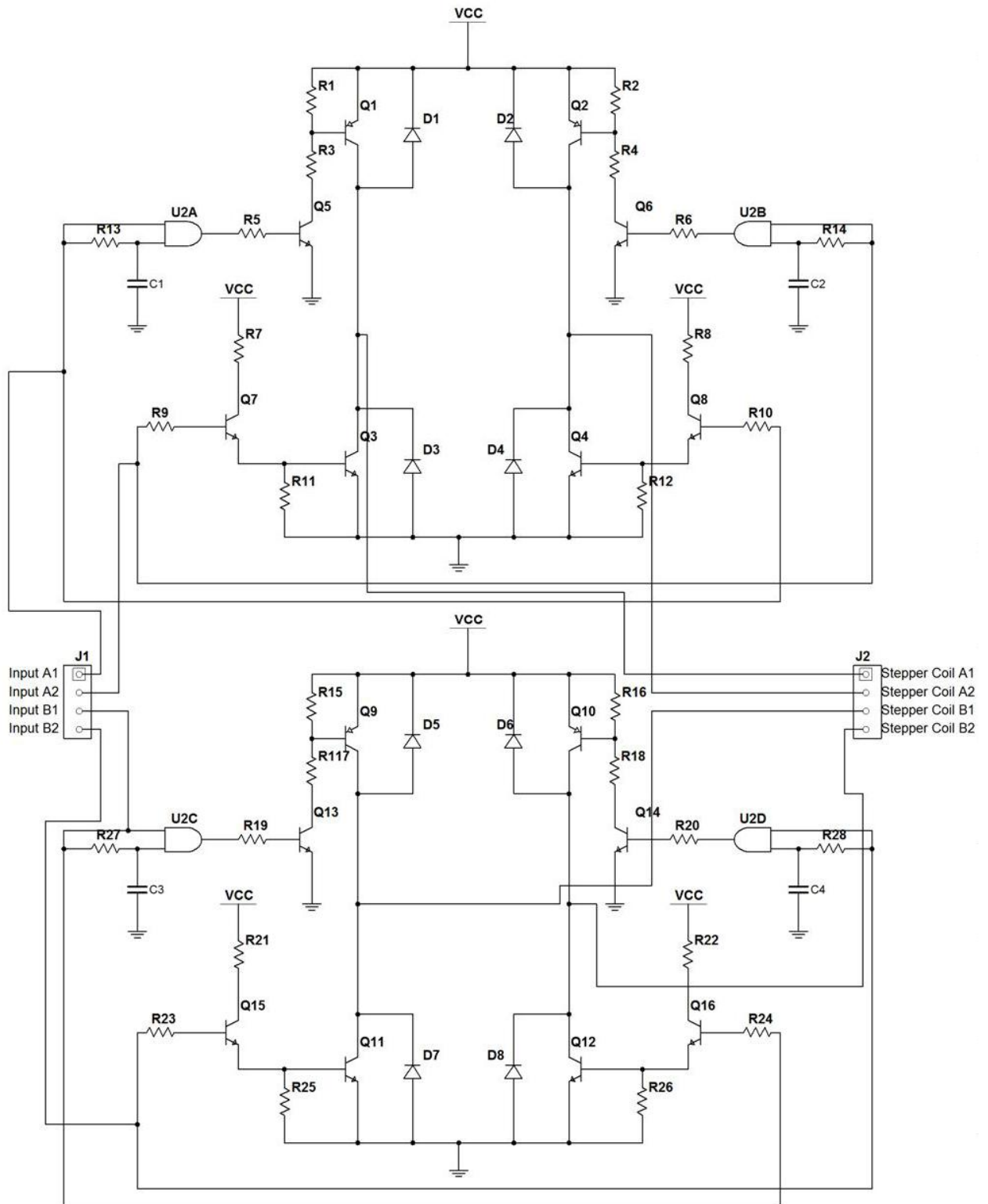
Σχήμα 4.9 Παλμογράφημα παραδείγματος καθυστέρησης 200  $\mu$ sec ανερχόμενου μετώπου παλμού συχνότητας 1KHz.

Για τον υπολογισμό της χρονικής καθυστέρησης εξετάστηκαν οι γραφικές παραστάσεις στο εγχειρίδιο λειτουργίας των τρανζίστορ BD241 και BD242. Σύμφωνα με τις παραστάσεις αυτές, ο μέγιστος χρόνος σβέσης των τρανζίστορ είναι 2.5  $\mu\text{sec}$ . Για την ασφαλή μετάβαση λειτουργίας της γέφυρας επιλέχθηκαν οι τιμές, 1 k $\Omega$  για την αντίσταση και 10 nF για τον πυκνωτή ώστε να καθυστερούν το ανερχόμενο μέτωπο του παλμού κατά 10  $\mu\text{sec}$ .



Σχήμα 4.10 Παλμογράφημα καθυστέρησης 10  $\mu\text{sec}$  ανερχόμενου μετώπου παλμού συχνότητας 1 KHz του κυκλώματος χρονικής καθυστέρησης.

### 4.3.4 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος ισχύος



Σχήμα 4.11 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος ισχύος.

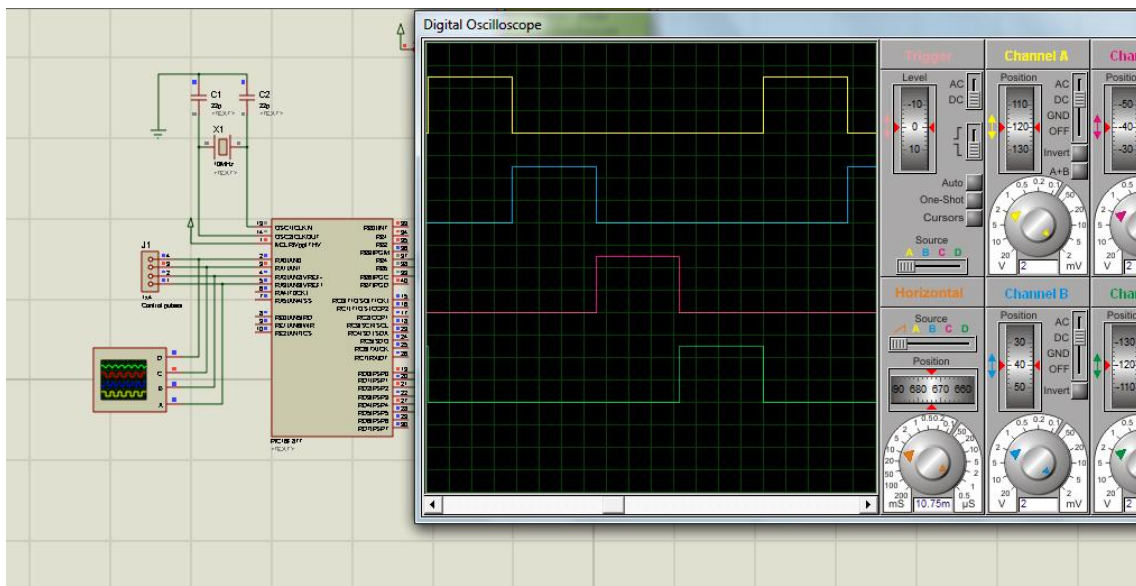
ΌΝΟΜΑ	ΤΥΠΟΣ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
<b>Q1, Q2, Q9, Q10</b>	BD242C	PNP Τρανζίστορ ισχύος
<b>Q3, Q4, Q11, Q12</b>	BD241C	NPN Τρανζίστορ ισχύος
<b>Q5 - Q8, Q13 - Q16</b>	BC337	Οδηγοί των τρανζίστορ ισχύος
<b>D1 - D8</b>	BY399	Δίοδοι καταστολής υπέρτασης
<b>U2</b>	7408	Καθυστέρηση ανερχομένου μετώπου παλμού
<b>R1, R2, R7, R8, R15, R16, R21, R22</b>	15Ω	Αντιστάσεις pull-up και πόλωσης των τρανζίστορ ισχύος
<b>R3, R4, R11, R12, R17, R18, R25, R26</b>	1KΩ	Αντιστάσεις pull-down και πόλωσης των τρανζίστορ ισχύος
<b>R5, R6, R9, R10, R19, R20, R23, R24</b>	62Ω	Αντιστάσεις πόλωσης των τρανζίστορ BC337
<b>R13, R14, R27, R28</b>	510Ω	Αντιστάσεις δικτυώματος RC καθυστέρησης παλμών
<b>C1 - C4</b>	10nF πολυεστερικός	Πυκνωτές δικτυώματος RC καθυστέρησης παλμών
<b>J1, J2</b>	Ακροδέκτης 4 ακίδων	Ακροδέκτες για την σύνδεση με το κύκλωμα ελέγχου και τον κινητήρα.

Πίνακας 4.1 Πίνακας υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του κυκλώματος ισχύος.

## 4.4 Κύκλωμα ελέγχου

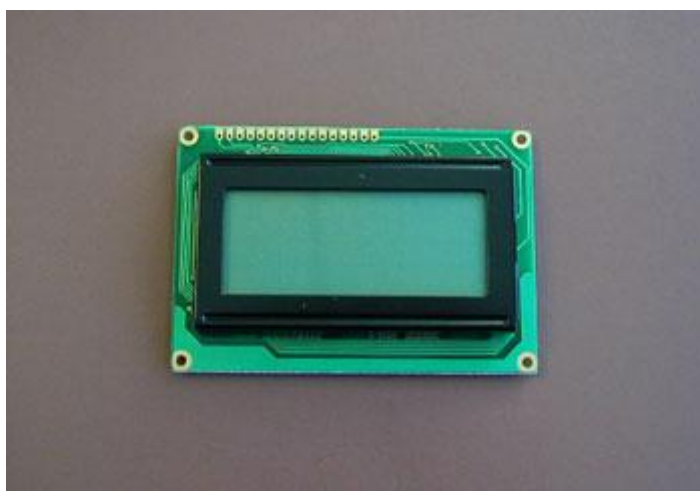
Η υλοποίηση του κυκλώματος ελέγχου πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικά στάδια, τόσο σε επίπεδο ανάπτυξης όσο και σε αυτό της αποσφαλμάτωσης του κώδικα προγράμματος του μικροελεγκτή. Η γλώσσα προγραμματισμού που επιλέχθηκε είναι Basic για μικροελεγκτές αφού πρόκειται συγκεκριμένα για την Mikrobasic της εταιρίας Mikroelektronika. Για λόγους ευκολίας της ανάπτυξης ο μικροελεγκτής τοποθετήθηκε και σε αυτή τη περίπτωση πάνω σε δοκιμαστική πλακέτα. Η επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον Η/Υ πραγματοποιήθηκε μέσω της σειριακής θύρας αξιοποιώντας τον προγραμματιστή ICD2 της Microchip, ώστε η μεταφορά του κώδικα να γίνεται απευθείας χωρίς να είναι απαραίτητη η αφαίρεση του μικροελεγκτή από το κύκλωμα.

Αρχικά δοκιμάστηκε η λειτουργία του στη δημιουργία των απαιτούμενων παλμών για τον έλεγχο των δύο γεφυρών στους διάφορους τύπους βηματισμού που έπρεπε να διαθέτει το κύκλωμα οδήγησης. Πριν την πραγματοποίηση της μεταφοράς του κώδικα στον μικροελεγκτή είχε προηγηθεί προσομοίωση της διάταξης αξιοποιώντας τις δυνατότητες του σχεδιαστικού προγράμματος Proteus Isis.



Σχήμα 4.12 Παράδειγμα προσομοίωσης δημιουργίας παλμών του μικροελεγκτή στο Proteus Isis.

Μετά την ολοκλήρωση των ελέγχων στη δημιουργία παλμών ακολούθησε η διασύνδεση της οθόνης υγρών κρυστάλλων μέσω των τεσσάρων bits. Η συγκεκριμένη οθόνη έχει δυνατότητα απεικόνισης τεσσάρων γραμμών και δεκαέξι χαρακτήρων ανά γραμμή και διαθέτει ενσωματωμένο ελεγκτή, συμβατό του Hitachi HD44780. Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή για την διαχείριση της οθόνης και την δημιουργία του μενού πραγματοποιήθηκε μέσω της ενσωματωμένης βιβλιοθήκης για ελεγκτές τύπου HD44780 που διαθέτει ο μεταγλωττιστής (compiler) της Mikrobasic.

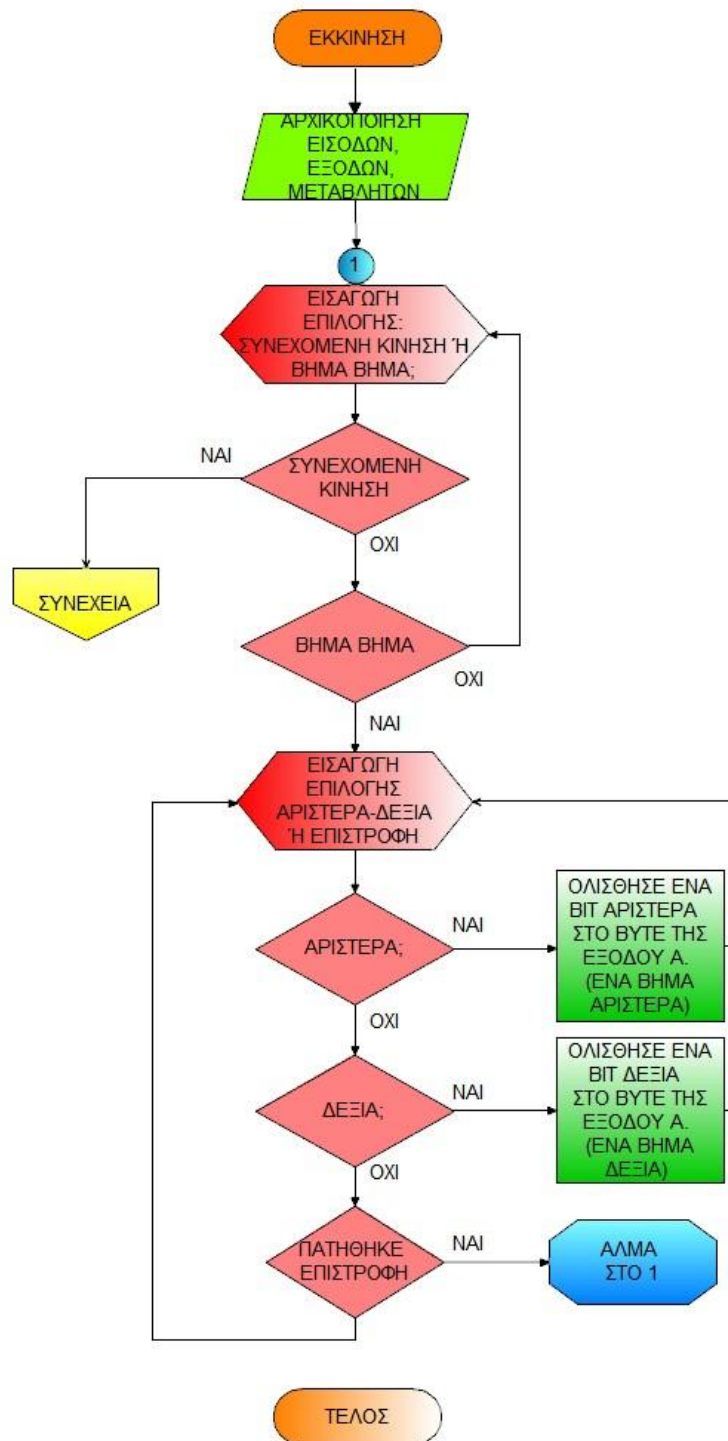


*Σχήμα 4.13 Οθόνη υγρών κρυστάλλων με ελεγκτή συμβατό του Hitachi HD44780.*

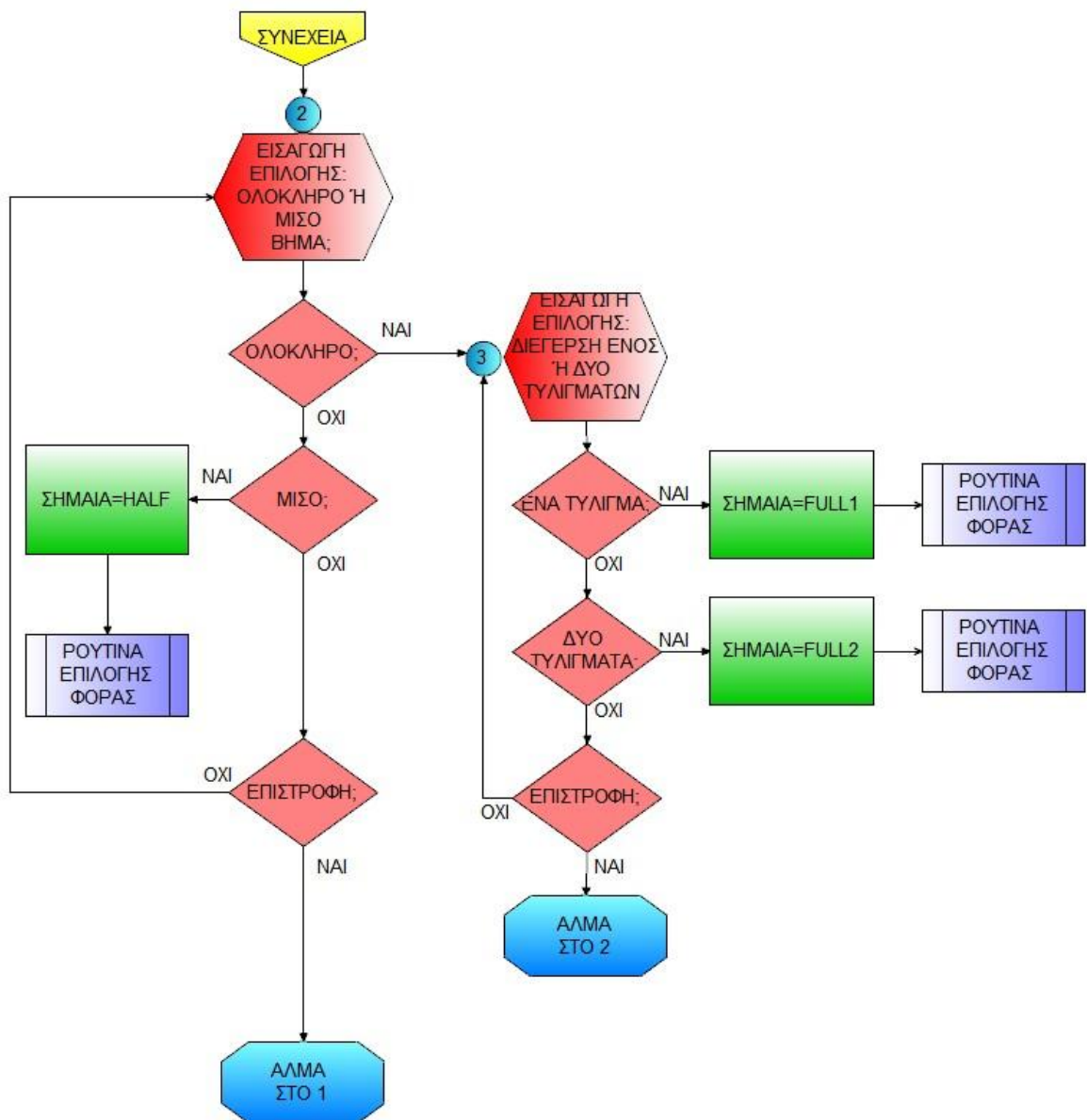
Ο τελικός κώδικας προγράμματος του μικροελεγκτή ενσωματώνει όλες τις απαιτούμενες λειτουργίες που είχαν απαιτηθεί για την συγκεκριμένη εργασία. Ο χρήστης, με τις επιλογές να αναγράφονται στην οθόνη, έχει τη δυνατότητα να περιηγηθεί στο μενού λειτουργίας με χρήση τριών πλήκτρων ώστε να επιλέξει α) τον τρόπο βηματισμού, με συνεχόμενη περιστροφή ή ανά βήμα, β) τη μέθοδο βηματισμού, με διέγερση ενός ή δύο τυλιγμάτων με ολόκληρο ή με μισό βήμα, γ) τη φορά περιστροφής και δ) τον πλήρη έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής, εύρους 25 μέχρι 1000 βήματα το δευτερόλεπτο με ρυθμό μεταβολής 25 βημάτων.

Ο κώδικας προγραμματισμού σε γλώσσα Basic του μικροελεγκτή του κυκλώματος παρατίθεται στο Παράρτημα Α .

#### 4.1.4 Διάγραμμα ροής του πλάτους κώδικα

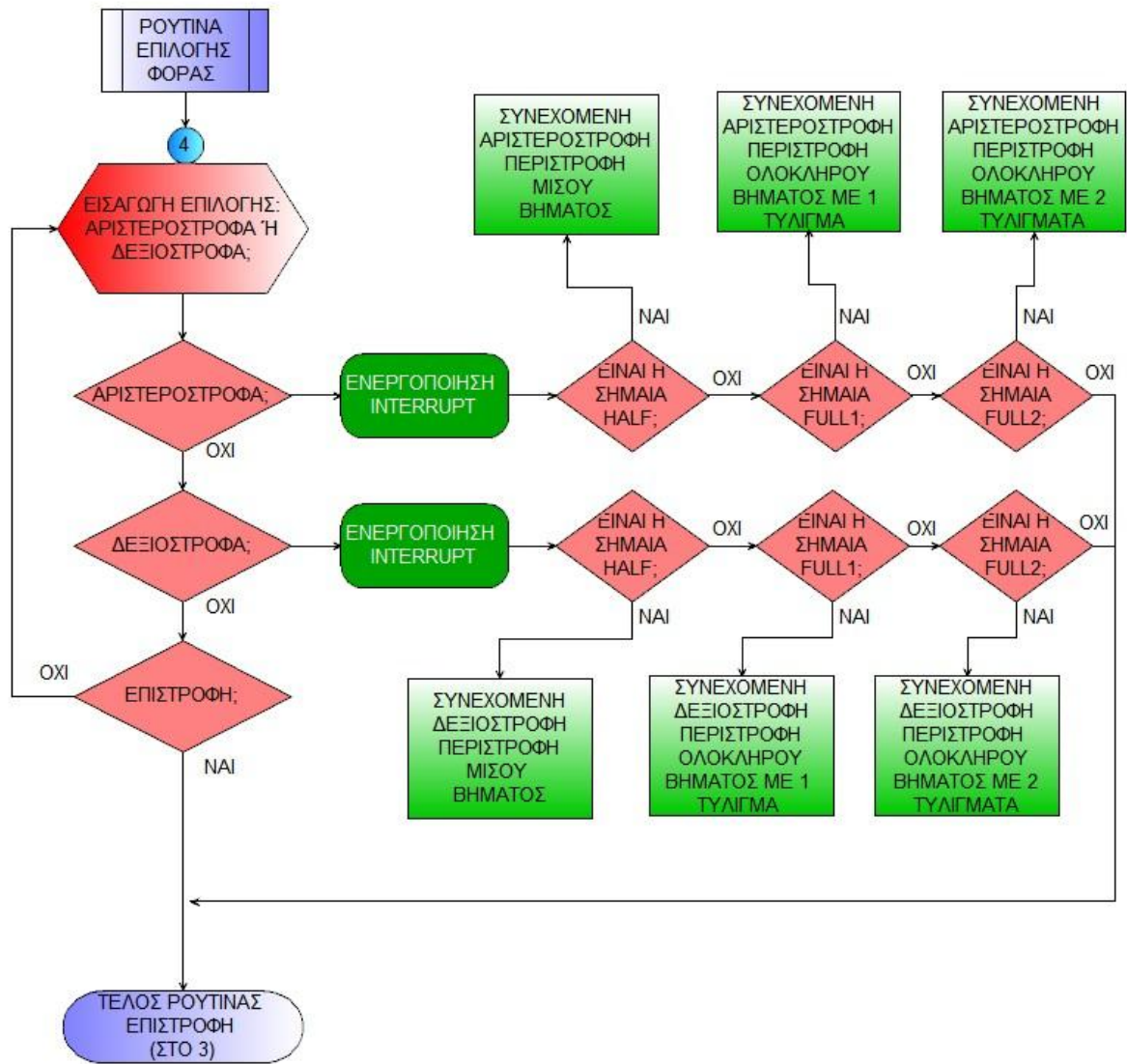


Σχήμα 4.14 Διάγραμμα ροής κύριου προγράμματος Α.

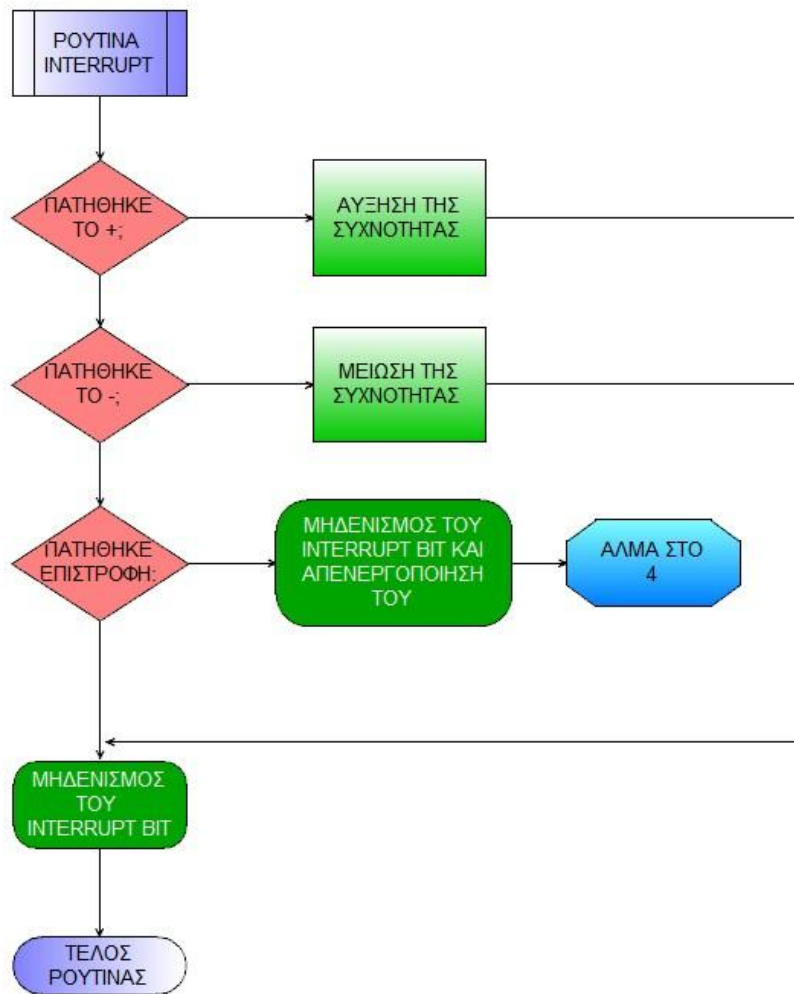


Σχήμα 4.15 Διάγραμμα ροής κύριου προγράμματος Β.



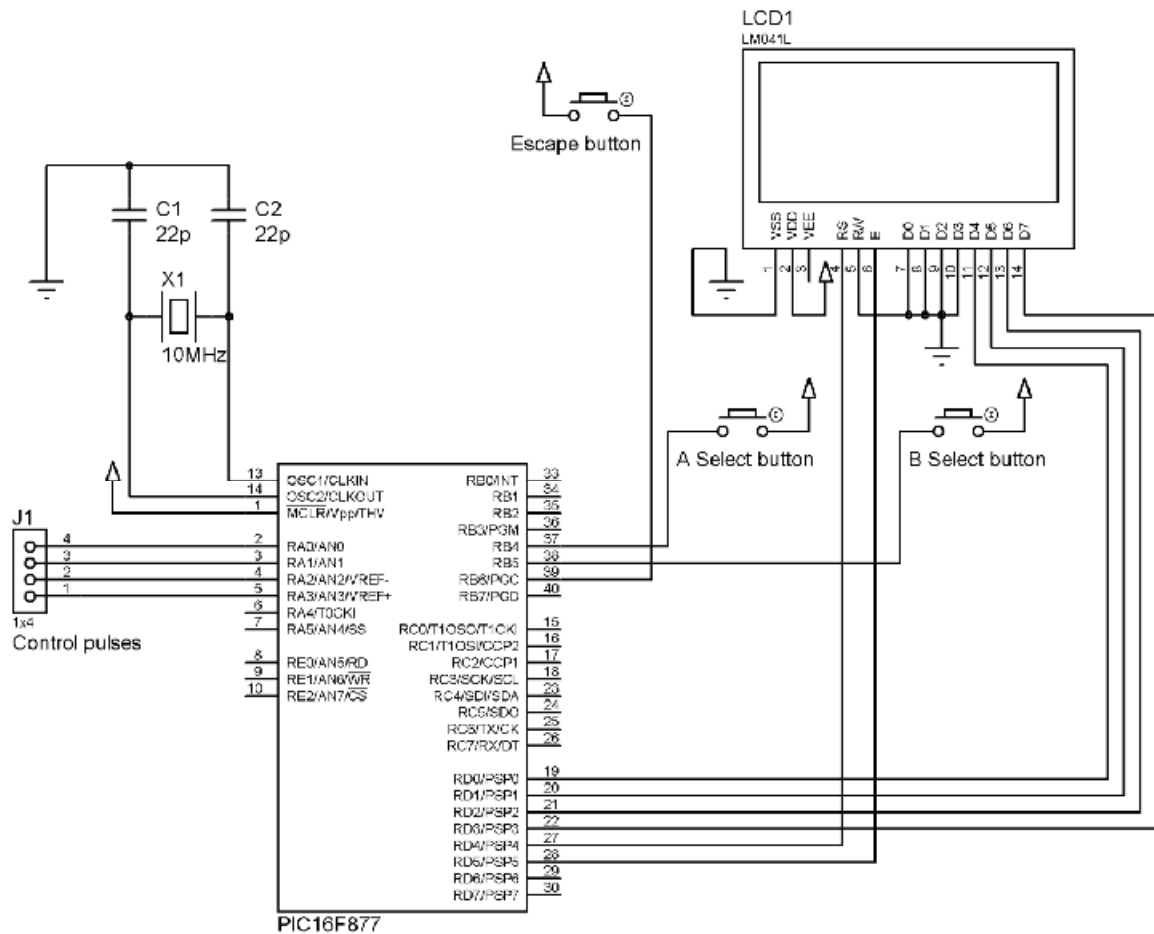


Σχήμα 4.16 Διάγραμμα ροής ρουτίνας επιλογής φοράς.



Σχήμα 4.17 Διάγραμμα ροής ρουτίνας interrupt.

#### 4.4.2 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου

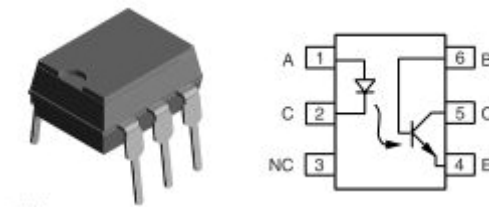


Σχήμα 4.18 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου.

#### 4.5 Κύκλωμα απομόνωσης

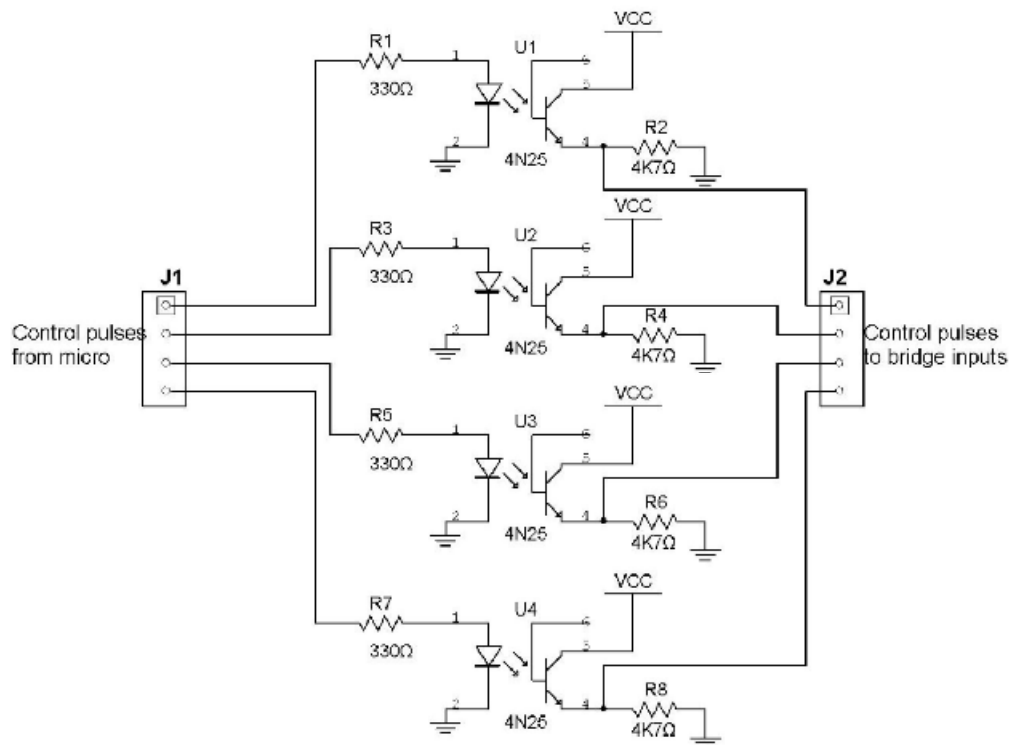
Σε κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος η γαλβανική απομόνωση μεταξύ των κυκλωμάτων παλμοδότησης και των κυκλωμάτων ισχύος επιφέρει μεγαλύτερη ασφάλεια από τυχόν διαρροές ρευμάτων υψηλής τιμής. Συνήθως αυτό επιτυγχάνεται με χρήση οπτοαποζευκτών (optocoupler). Οι οπτοαποζεύκτες διατίθενται σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος αποτελούμενο από μια υπέρυθρη δίοδο και ένα φωτοτρανζίστορ. Η λειτουργία τους οφείλεται στην εναλλαγή κατάστασης της υπέρυθρης δίοδου που οδηγεί σε κόρο ή αποκοπή το φωτοτρανζίστορ. Στη διάταξη που κατασκευάστηκε προστέθηκαν τέσσερα ολοκληρωμένα 4N25, ώστε να

επιτευχτεί η προστασία του μικροελεγκτή και η απρόσκοπτη λειτουργία του κυκλώματος ελέγχου.



Σχήμα 4.19 Μορφή και σχηματικό διάγραμμα ολοκληρωμένου 4N25.

#### 4.5.1 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος απομόνωσης



Σχήμα 4.20 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος απομόνωσης.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>**

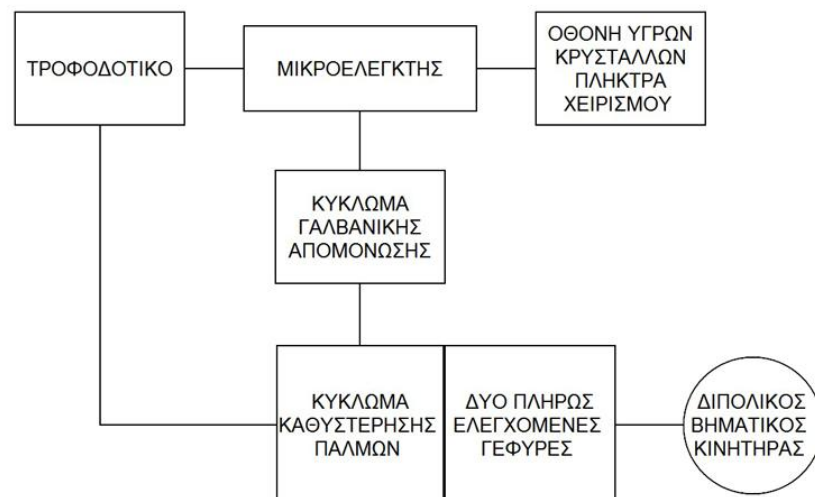
### **ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ**

## 5.1 Εισαγωγή

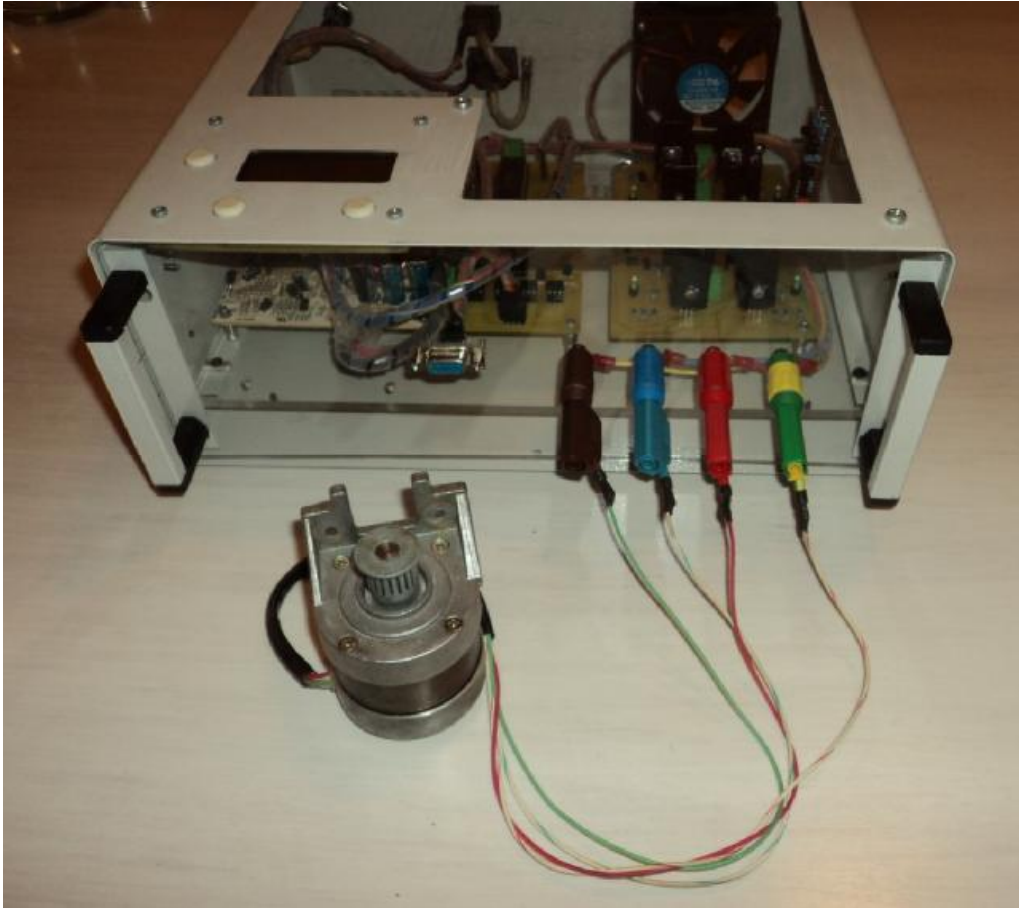
Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα παλμογραφήματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις στη πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε. Αρχικά, παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα της δημιουργίας και διαδοχής των παλμών στους διάφορους τρόπους βηματισμού από το κύκλωμα ελέγχου. Οι μετρήσεις με φορτίο στο κύκλωμα ισχύος πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικούς υβριδικούς βηματικούς κινητήρες.

## 5.2 Πειραματική διάταξη συστήματος

Η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1. Αποτελείται από α) το κύκλωμα ελέγχου με τον μικροελεγκτή PIC 16f877, την οθόνη υγρών κρυστάλλων με τα πλήκτρα χειρισμού, β) το κύκλωμα ισχύος με τις δύο πλήρως ελεγχόμενες γέφυρες και ενσωματωμένο το κύκλωμα χρονικής καθυστέρησης ανερχομένου μετώπου παλμού, γ) το κύκλωμα γαλβανικής απομόνωσης με τους οπτοαποζεύκτες και δ) το παλμοτροφοδοτικό μέγιστης ισχύος 50 W και έξοδο 5 V.



Σχήμα 5.1 Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης του συστήματος.



*Σχήμα 5.2 Το σύστημα όπως υλοποιήθηκε.*

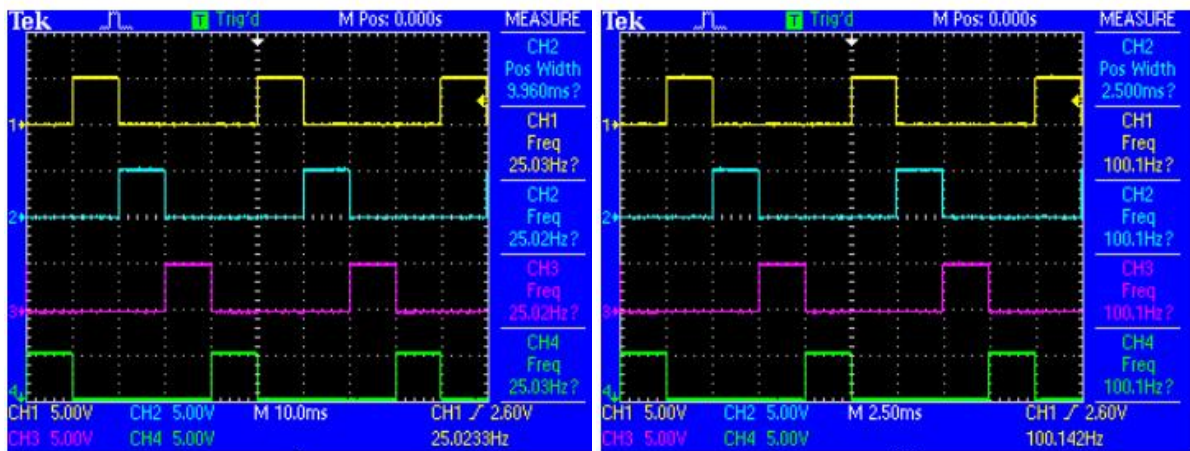
Για τις μετρήσεις στην πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκαν :

- Ø Ο τετρακάναλος ψηφιακός παλμογράφος TDS2014B της Tektronix,
- Ø τέσσερα (passive) probes P2220 της Tektronix,
- Ø ένα διαφορικό (differential) probe DP25 της CHAUVIN ARNOUX και
- Ø μια αμπεροτσιμπίδα AC-DC (current probe) E3N της CHAUVIN ARNOUX.

### **5.3 Παλμογραφήματα του κυκλώματος ελέγχου**

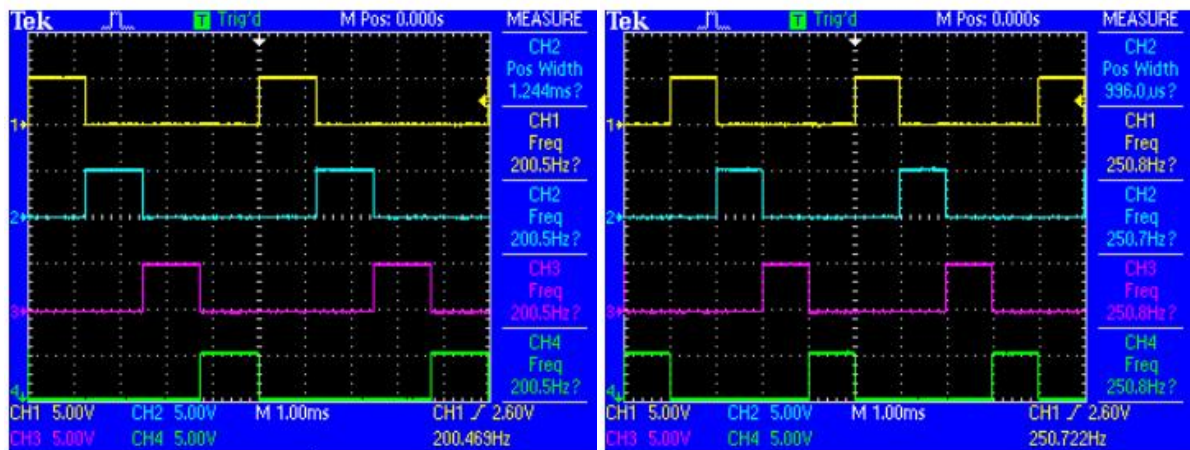
Παρακάτω παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα στην έξοδο του κυκλώματος ελέγχου. Πρόκειται για του παλμούς ελέγχου των ημιαγωγικών στοιχείων των δύο γεφυρών σε βηματισμό ολόκληρου βήματος με διέγερση ενός τυλίγματος, με διέγερση δύο τυλιγμάτων και μισού βήματος. Οι ενδεικτικές τιμές ταχύτητας

περιστροφής του δρομέα στα παλμογραφήματα ορίζονται σε παλμούς ανά δευτερόλεπτο (**pulses per second**).



α)

β)

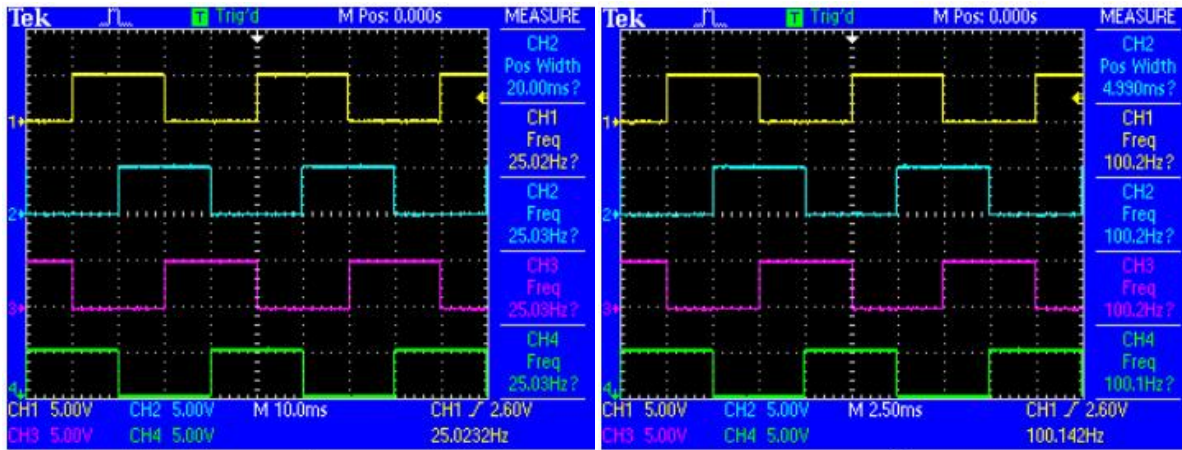


γ)

δ)

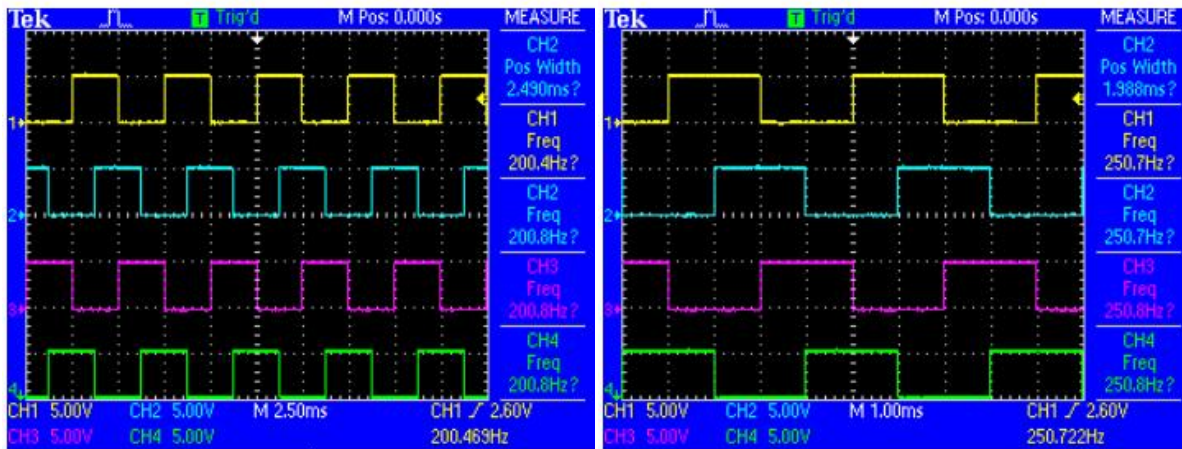
Σχήμα 5.3 Διαδοχή των παλμών ελέγχου για δεξιόστροφη περιστροφή του δρομέα, σε βηματισμό ολόκληρου βήματος και ενεργοποίηση ενός τυλίγματος τη φορά. α)100 pps , β)400 pps, γ)800 pps και δ)1000 pps.





α)

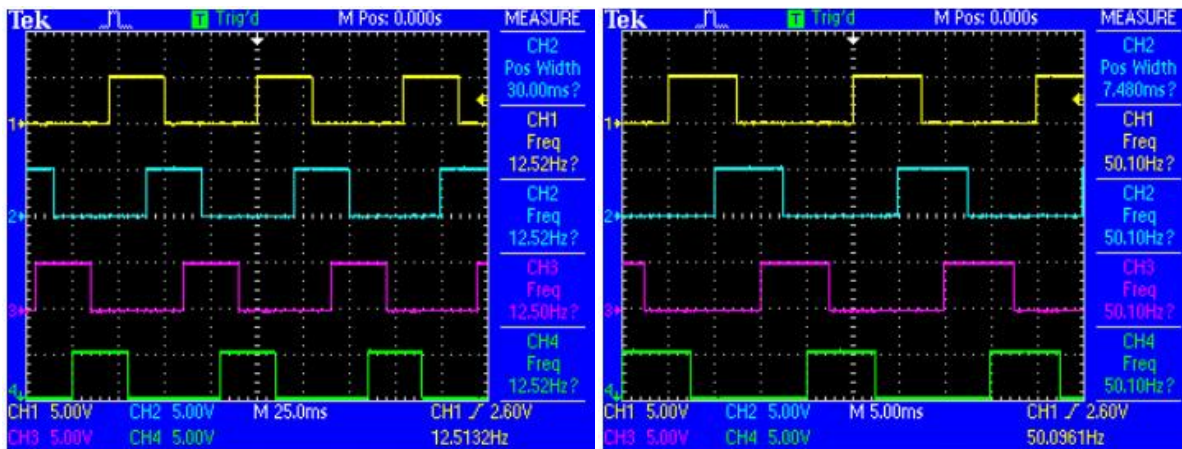
β)



γ)

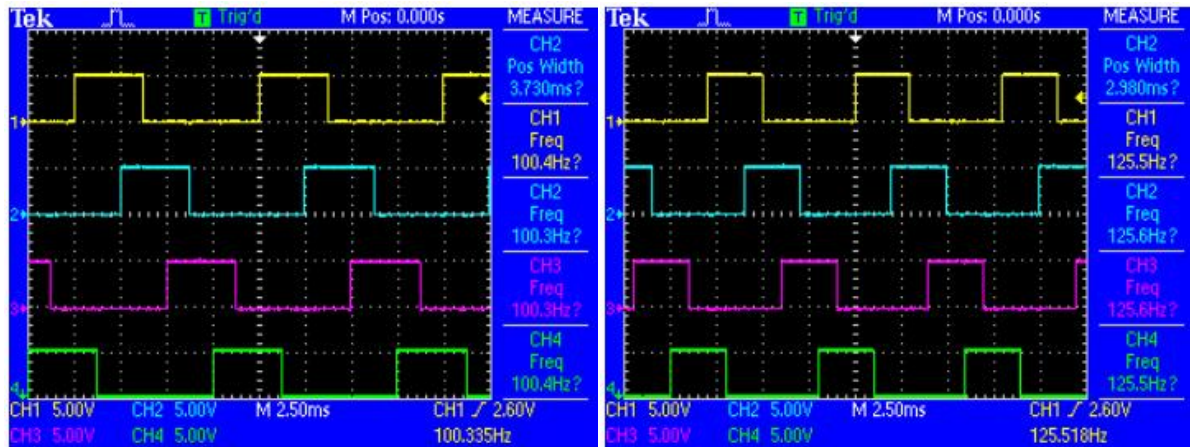
δ)

Σχήμα 5.4 Διαδοχή των παλμών ελέγχου για δεξιόστροφη περιστροφή του δρομέα, σε βηματισμό ολόκληρου βήματος και ενεργοποίηση δύο τυλιγμάτων τη φορά. α)100 pps , β)400 pps, γ)800 pps και δ)1000 pps.



α)

β)

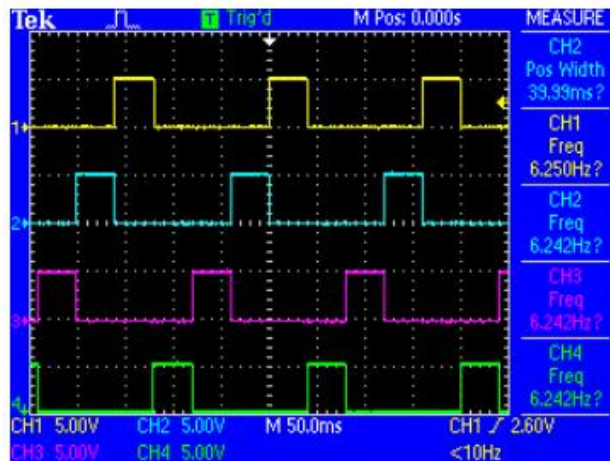


γ)

δ)

Σχήμα 5.5 Διαδοχή των παλμών ελέγχου για δεξιόστροφη περιστροφή του δρομέα σε βηματισμό μισού βήματος. α)100 rps , β)400 rps, γ)800 rps και δ)1000 rps.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για την ανάστροφη περιστροφή του δρομέα, σε όλους τους τύπους βηματισμού, απαιτείται η αντίστροφη αλληλουχία παλμών όπως αυτή του Σχήματος 5.6.



Σχήμα 5.6 Διαδοχή των παλμών ελέγχου για αριστερόστροφη περιστροφή του δρομέα, σε βηματισμό ολόκληρου βήματος και ενεργοποίηση ενός τυλίγματος τη φορά στα 25 rps.

## 5.4 Παλμογραφήματα του κυκλώματος ισχύος

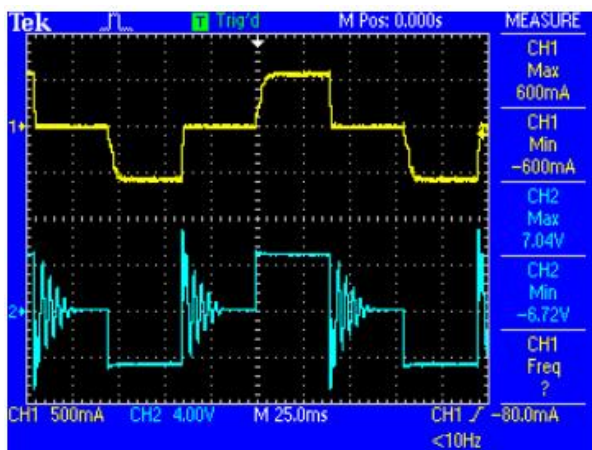
Η λήψη των παλμογραφημάτων τάσης και ρεύματος πραγματοποιήθηκε στην μια διπολική έξοδο του συστήματος, δηλαδή στη μία γέφυρα, με συνδεδεμένους ως φορτίο δύο διαφορετικούς κινητήρες. Πρόκειται για δύο υβριδικούς βηματικούς των

έξι ακροδεκτών με βηματική γωνία  $1.8^\circ$ , τον SST40C2010 της εταιρίας SKC και τον KE56KM2 της Japan Servo Co LTD.

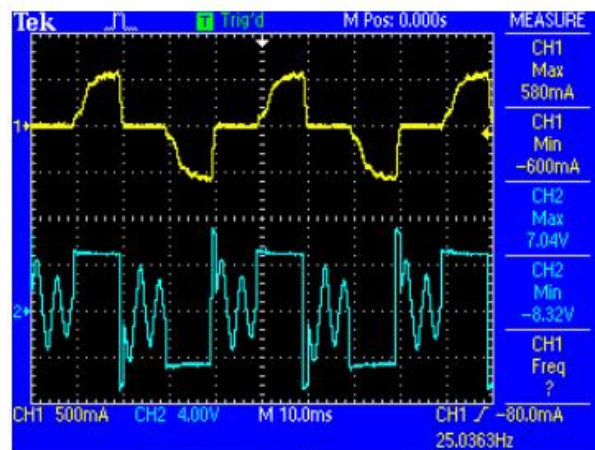
### 5.4.1 Παλμογραφήματα κινητήρα SST40C2010

Σε αυτή την ομάδα μετρήσεων ο κινητήρας SST40C2010 οδηγείται από το σύστημα με τους τρεις διαθέσιμους τρόπους βηματισμού.

Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται τα παλμογραφήματα τάσης και ρεύματος του κινητήρα σε βηματισμό ολόκληρου βήματος και ενεργοποίηση ενός τυλίγματος για κάθε βήμα-παλμό. Οι τιμές της συχνότητας οδήγησης είναι ενδεικτικές για την απόκριση του κινητήρα.



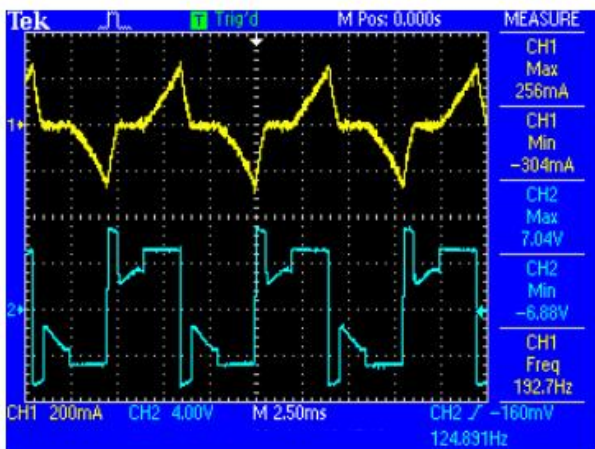
α)



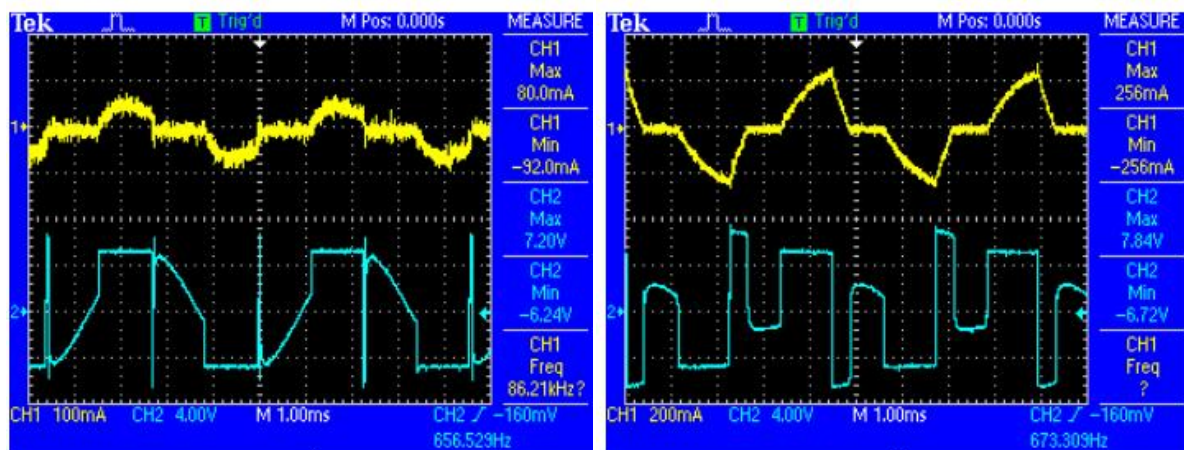
β)



γ)



δ)



ε)

ζ)

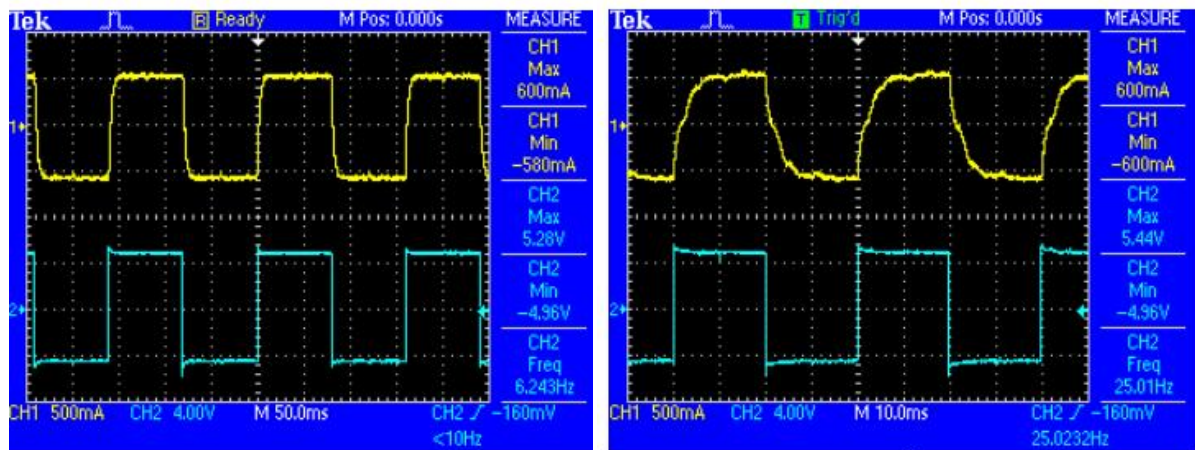
Σχήμα 5.7 Παλμογραφήματα ρεύματος (κίτρινο) και τάσης (μπλε) στο ένα τύλιγμα του κινητήρα SST40C2010 σε βηματισμό ολόκληρου βήματος με διέγερση ενός τυλίγματος τη φορά. α)25rps β)100rps γ)300rps δ)500rps ε)875rps ζ)900rps.

Εξετάζοντας τα παραπάνω παλμογραφήματα διαπιστώνεται πως ο χρόνος αποκατάστασης του ρεύματος στη μέγιστη τιμή του (600mA) είναι περίπου 10 msec (Σχήμα 5.7 β). Σε συχνότητες μεγαλύτερες των 100 rps παρατηρείται πτώση της τιμής του ρεύματος άρα και της ροπής, καθώς η διάρκεια αγωγής (πλάτος) των παλμών είναι μικρότερη των 10 msec, με μικρότερη τιμή των 85 mA σε συχνότητα 875 rps. Σε περαιτέρω αύξηση της συχνότητας ο κινητήρας αποσυγχρονίζεται και σταματά να περιστρέφεται (Σχήμα 5.7 ζ). Συγκρίνοντας την τιμή αυτή της μέγιστης συχνότητας περιστροφής με αυτήν του εγχειριδίου του κινητήρα παρατηρείται μια μεγάλη απόκλιση. Η διαφορά αυτή είναι απολύτως φυσιολογική, δεδομένου ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση ο κινητήρας τροφοδοτείται μόνο με την ονομαστική του τάση και όχι με 24 V όπως στους εγχειριδίου.

Αξίζει να παρατηρηθεί το γεγονός ότι, στο χρονικό διάστημα που η τάση του τυλίγματος πρέπει να μηδενίζεται αφού τροφοδοτείται με ρεύμα το επόμενο τύλιγμα, στην πραγματικότητα δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο. Η απότομη αύξηση της τάσεως (7V περίπου) τη χρονική στιγμή που σταματά το τύλιγμα να τροφοδοτείται (Σχήμα 5.7 γ), οφείλεται στην επιστροφή της αποθηκευμένης ενέργειας του τυλίγματος μέσω των διόδων καταστολής της υπέρτασης, στη τροφοδοσία της γέφυρας. Η διάρκεια αυτού του φαινομένου λαμβάνει χώρα μέχρι την αποκατάσταση-μηδενισμό του ρεύματος στο τύλιγμα. Μετά το πέρας της αποκατάστασης του ρεύματος ενώ η τάση θα

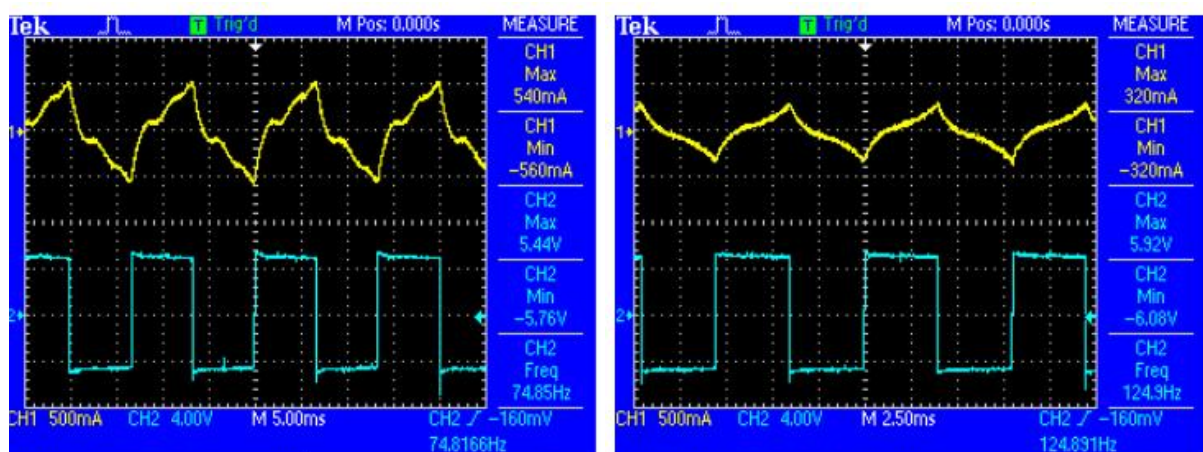
έπρεπε να μηδενίζεται και αυτή, υπάρχει δημιουργία επαγωγικής τάσεως λόγω περιστροφής του δρομέα. Αυτό γίνεται πιο εύκολα αντιληπτό από το παλμογράφημα (α) του Σχήματος 5.7 με τη δημιουργία τάσεως εξ'επαγωγής λόγω ταλάντωσης του δρομέα, όπως και του παλμογραφήματος (ζ) με τον δρομέα ακινητοποιημένο λόγω αποσυγχρονισμού και απουσίας επαγωγικής τάσης. Το φαινόμενο αυτό βέβαια δημιουργεί μια ανθιστάμενη ροπή στην κίνηση του δρομέα, καθιστώντας την τροχοπέδη για τις προδιαγραφές λειτουργίας του κινητήρα.

Ακολουθούν τα παλμογραφήματα τάσης και ρεύματος του κινητήρα σε βηματισμό ολόκληρου βήματος με ταυτόχρονη ενεργοποίηση και των δύο τυλιγμάτων για κάθε βήμα-παλμό.



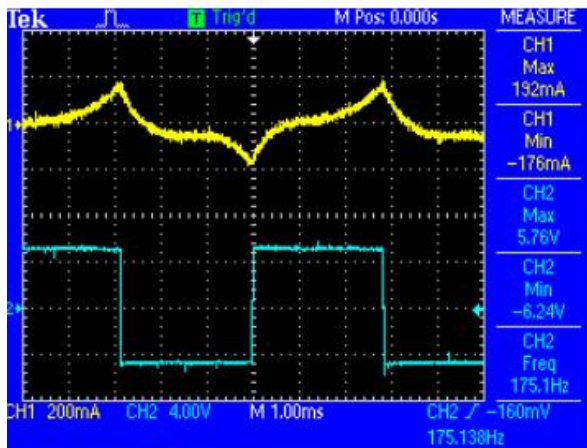
α)

β)

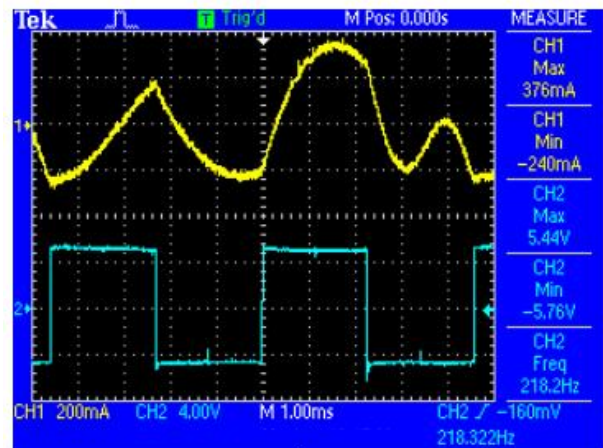


γ)

δ)



ε)

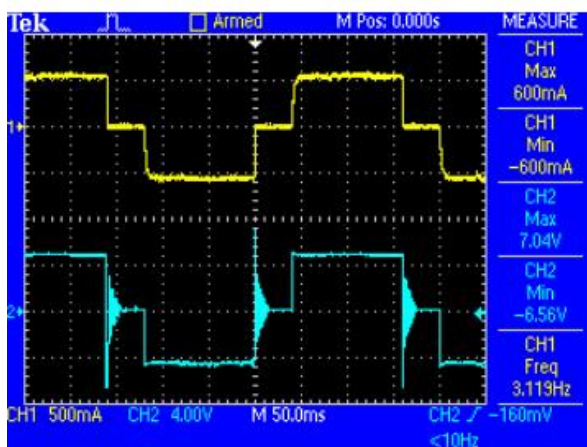


ζ)

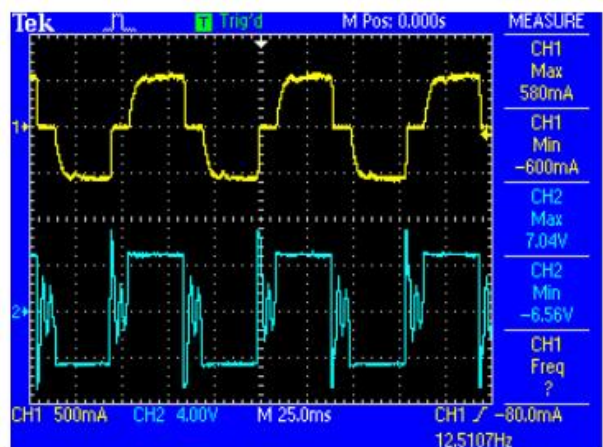
Σχήμα 5.8 Παλμογραφήματα ρεύματος (κίτρινο) και τάσης (μπλε) στο ένα τυλιγμά του κινητήρα SST40C2010 σε βηματισμό ολόκληρου βήματος με διέγερση δύο τυλιγμάτων τη φορά. α)25rps β)100rps γ)300rps δ)500rps ε)700rps ζ)875rps απώλεια βημάτων.

Με την ενεργοποίηση και των δύο τυλιγμάτων σε κάθε βήμα στους βηματικούς κινητήρες αποδίδεται η ονομαστική ροπή τους. Το μέτωπο του παλμού της τάσης διπλασιάζεται (10V) με αποτέλεσμα η αποκατάσταση του ρεύματος του τυλιγματος στη μέγιστη τιμή του να επιτυγχάνεται σε μικρότερο χρόνο. Η μέγιστη συχνότητα παλμοδότησης του κινητήρα ώστε η αποδιδόμενη ροπή του να είναι και η ονομαστική είναι τα 300 rps (Σχήμα 5.8 γ) ενώ η απόδοση του μειώνεται σταδιακά μέχρι τα 875 rps όπου ξεκινά ο αποσυγχρονισμός του χάνοντας βήματα.

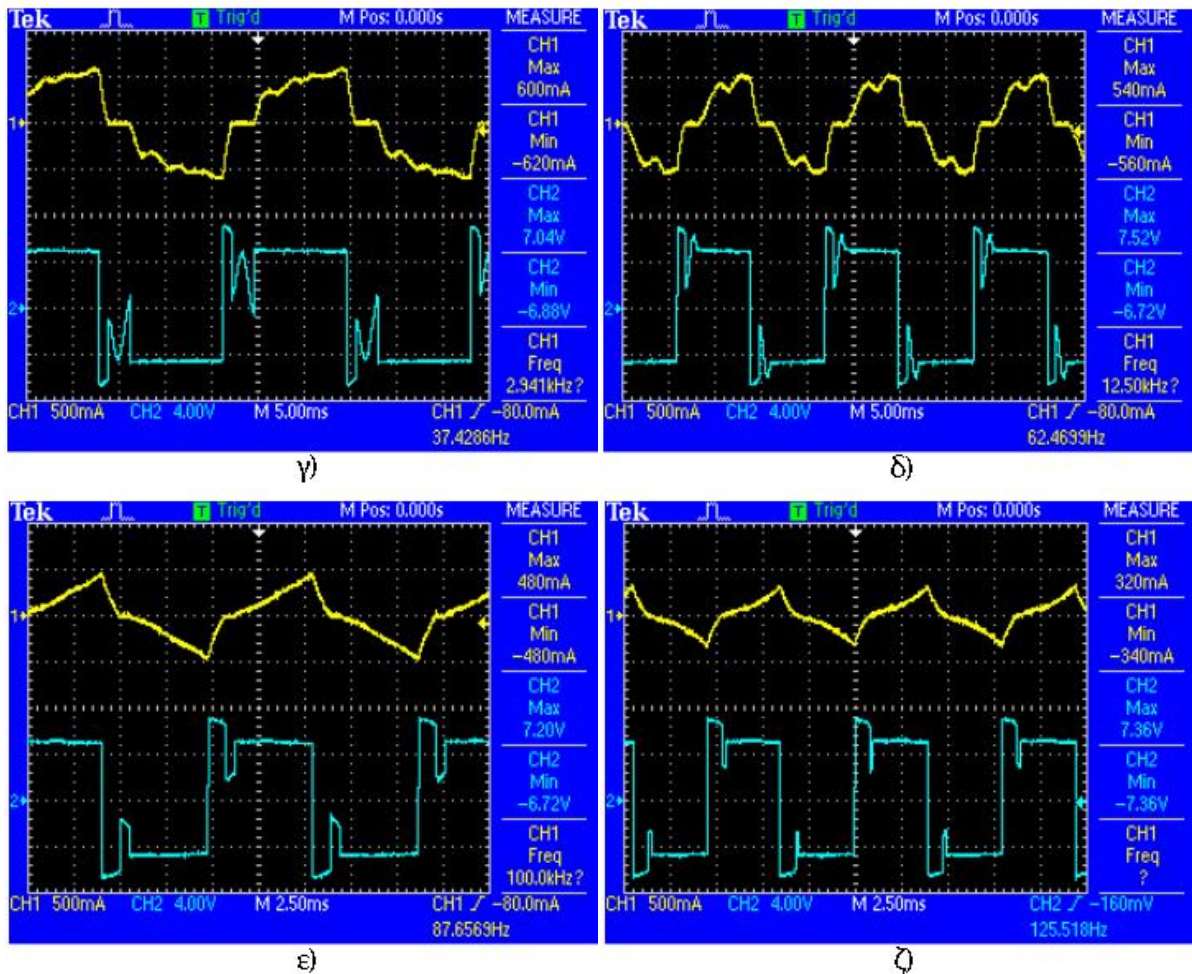
Στη συνέχεια παρατίθενται τα παλμογραφήματα τάσης και ρεύματος του κινητήρα σε βηματισμό μισού βήματος.



α)



β)

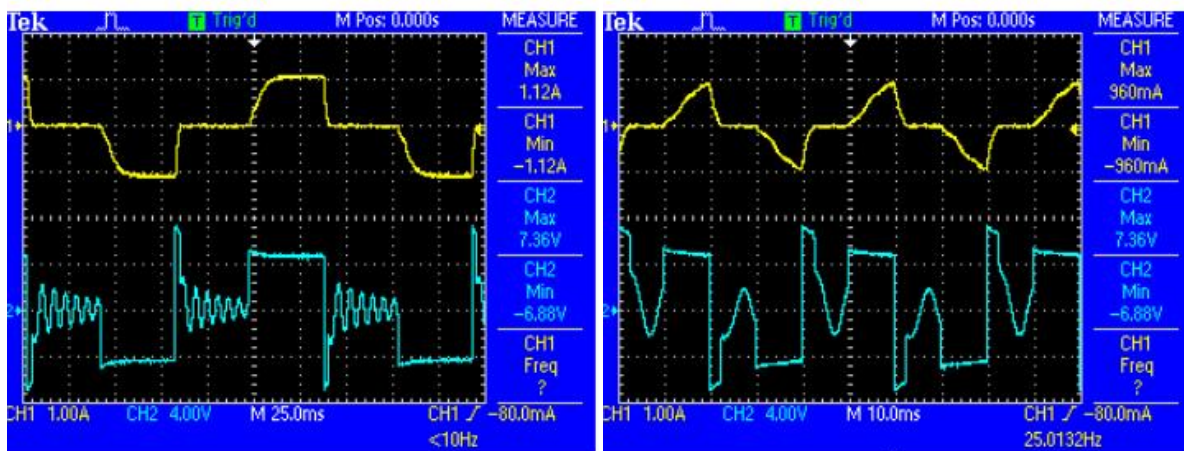


Σχήμα 5.9 Παλμογραφήματα ρεύματος (κίτρινο) και τάσης (μπλε) στο ένα τυλίγμα του κινητήρα SST40C2010 σε βηματισμό μισού βήματος. α)25rps β)100rps γ)300rps δ)500rps ε)700rps ζ)1000rps.

Σύμφωνα με την θεωρία των προηγούμενων κεφαλαίων, με την μέθοδο οδήγησης του μισού βήματος η ροπή των βηματικών κινητήρων μεταβάλλεται σε κάθε τους βήμα. Αυτό συμβαίνει γιατί ενώ ενεργοποιούνται και τα δύο τυλίγματα σε ένα τους βήμα στο αμέσως επόμενο βήμα ενεργοποιείται μόνο το ένα. Το γεγονός αυτό γίνεται αντιληπτό παρατηρώντας και την κυματομορφή του ρεύματος στο παλμογράφημα (δ) του παραπάνω σχήματος. Σε αυτή τη μέθοδο βηματισμού ο δρομέας περιστρέφεται μέχρι τα 1000 rps χωρίς να αποσυγχρονίζεται, διατηρώντας το μισό ονομαστικό του ρεύμα.

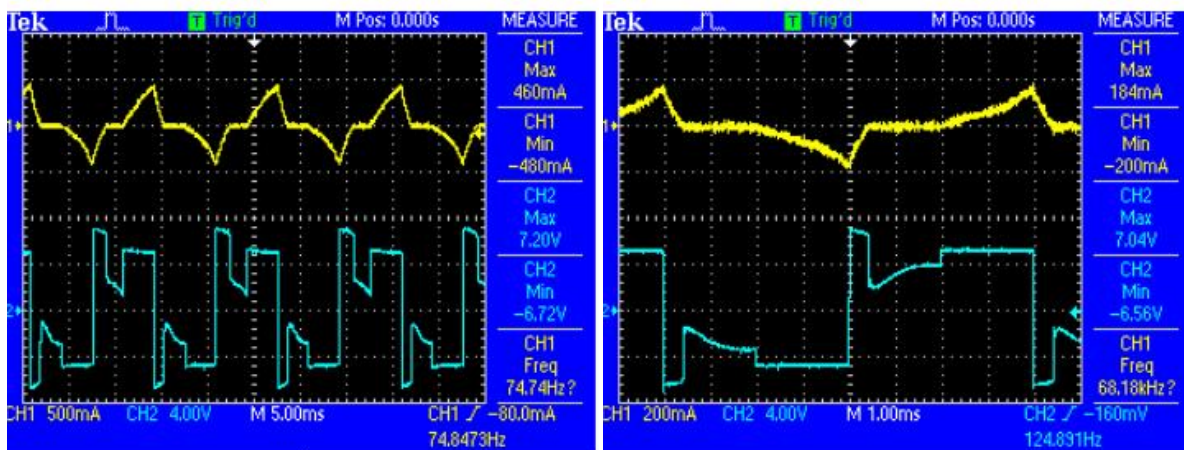
### 5.4.2 Παλμογραφήματα κινητήρα KM56KM2

Σε αυτή την ομάδα μετρήσεων ο κινητήρας KM56KM2 οδηγείται από το σύστημα με τους τρεις διαθέσιμους τρόπους βηματισμού. Όπως και στον προηγούμενο κινητήρα παρατηρούνται τα ίδια φαινόμενα ως προς τον τρόπο λειτουργίας των βηματικών κινητήρων. Οι τιμές της συχνότητας οδήγησης και σε αυτή την περίπτωση είναι ενδεικτικές για την απόκριση του κινητήρα.



α)

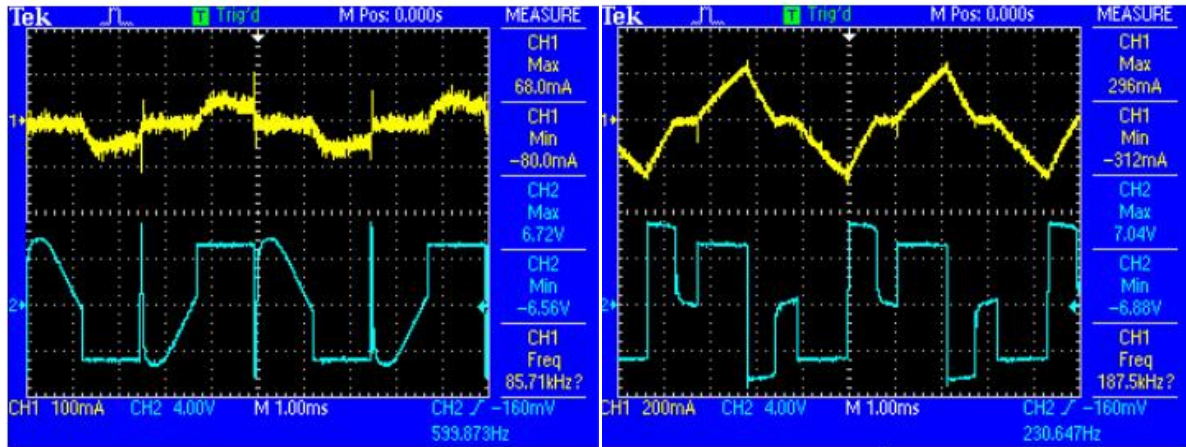
β)



γ)

δ)

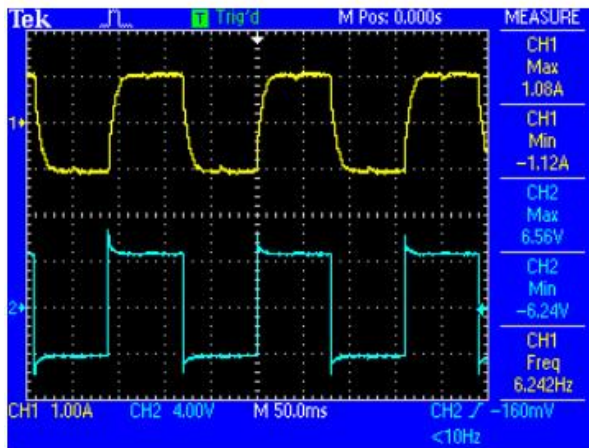




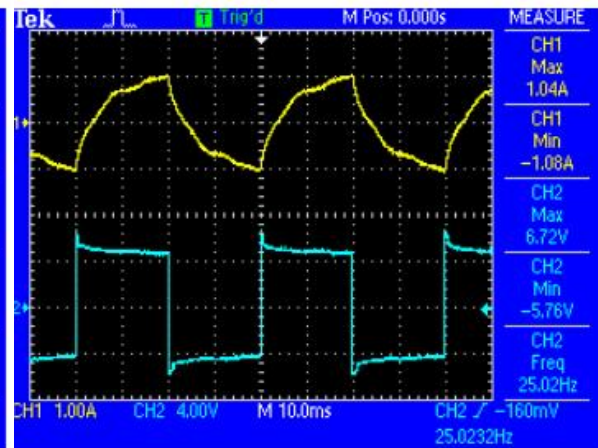
ε)

ζ)

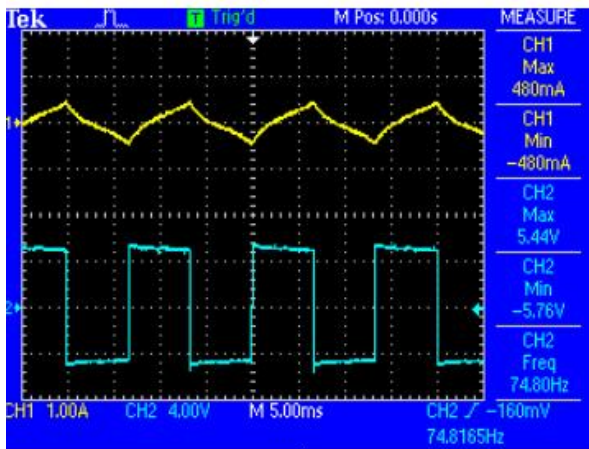
Σχήμα 5.10 Παλμογραφήματα ρεύματος (κίτρινο) και τάσης (μπλε) στο ένα τυλίγμα του κινητήρα KE56KM2 σε βηματισμό ολόκληρου βήματος με διέγερση ενός τυλίγματος τη φορά.  
 α)25rps β)100rps γ)300rps δ)500rps ε)800rps ζ)925rps απασυγχρονισμός.



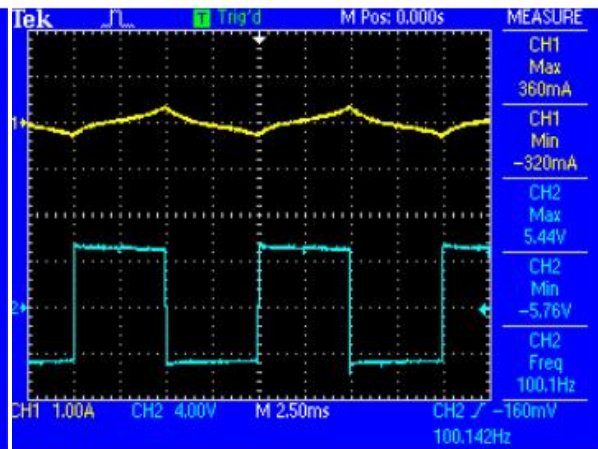
α)



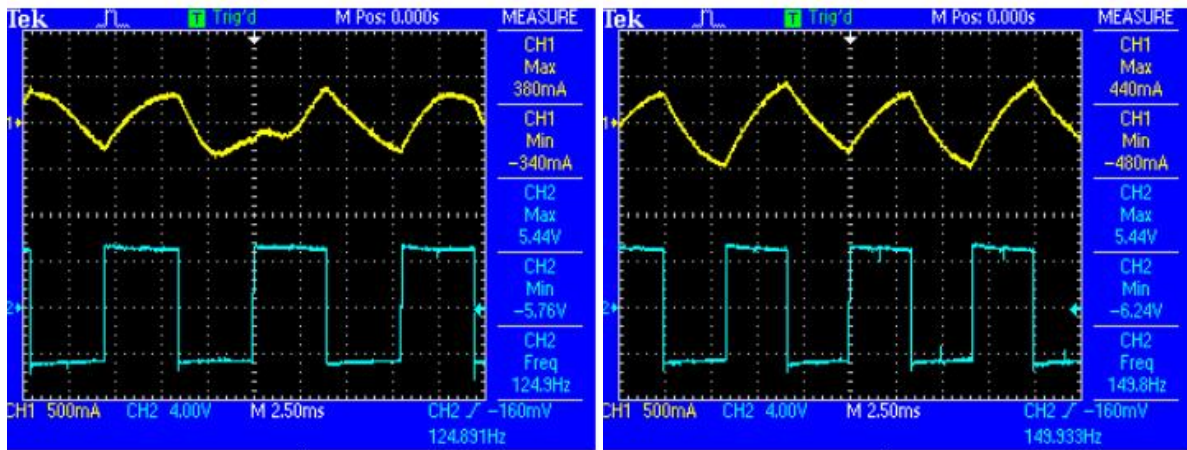
β)



γ)



δ)

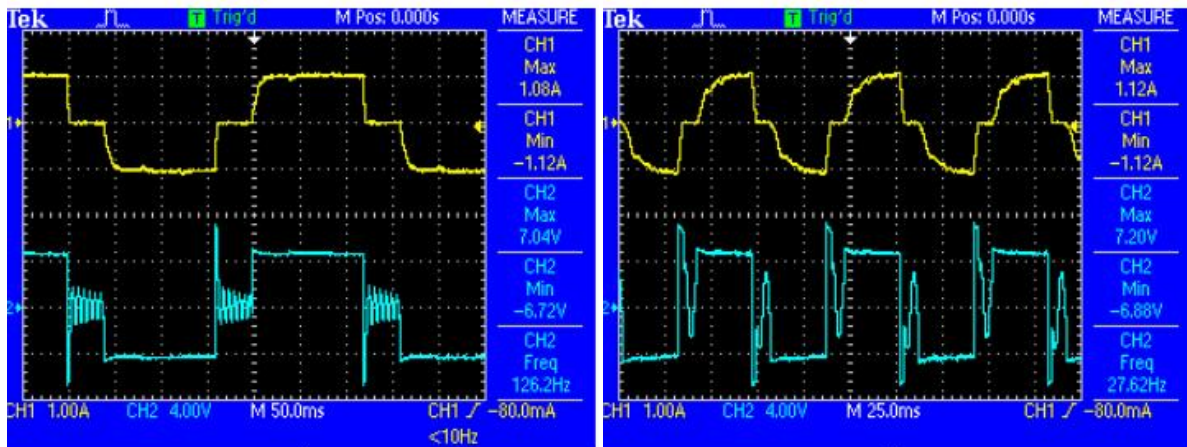


ε)

ζ)

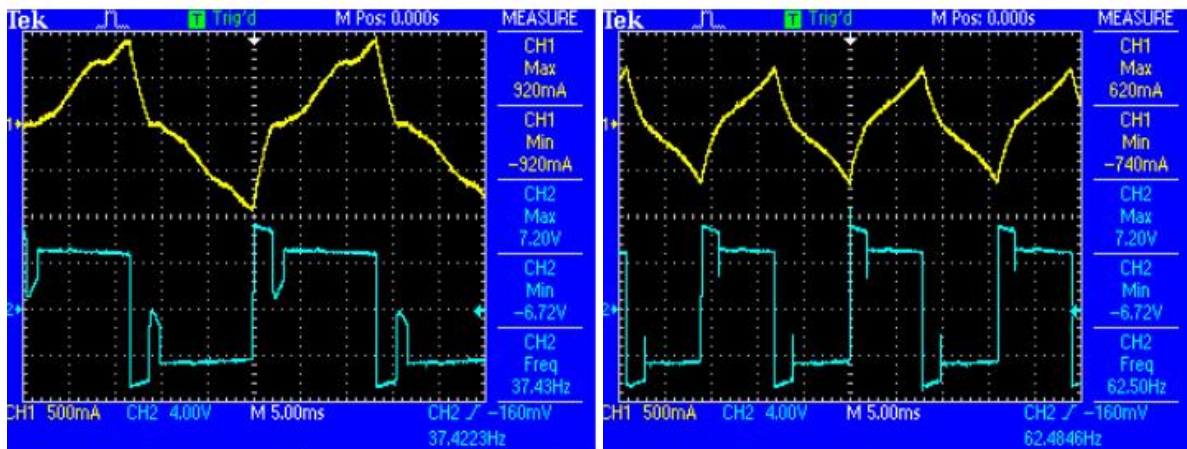
Σχήμα 5.11 Παλμογραφήματα ρεύματος (κίτρινο) και τάσης (μπλε) στο ένα τύλιγμα του κινητήρα KE56KM2 σε βηματισμό ολόκληρου βήματος με διέγερση δύο τυλιγμάτων τη φορά.

α)25pps β)100pps γ)300pps δ)400pps ε)500pps απώλεια βημάτων ζ)600pps  
 αποσυγχρονισμός.



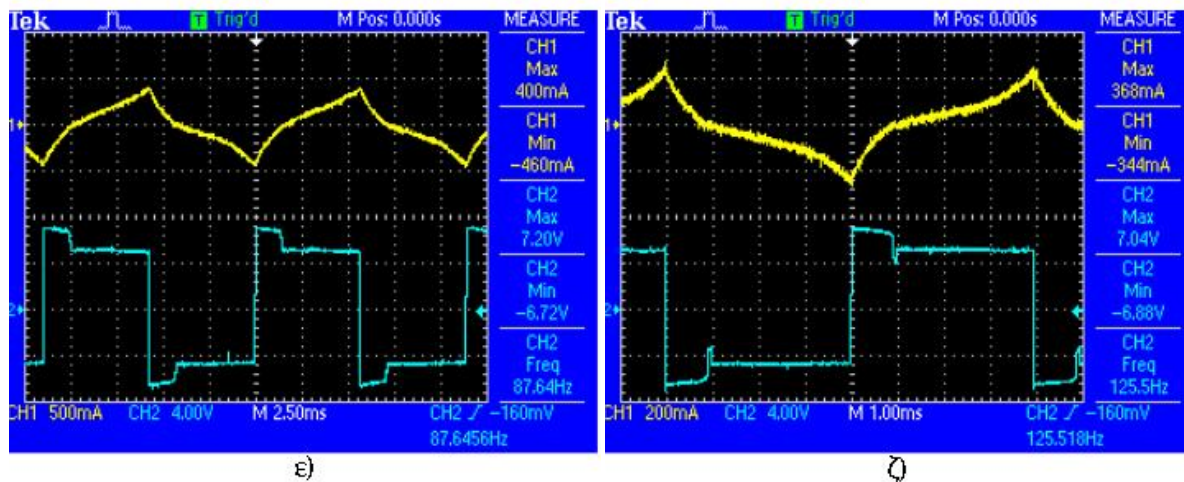
α)

β)



γ)

δ)



Σχήμα 5.12 Παλμογραφήματα ρεύματος (κίτρινο) και τάσης (μπλε) στο ένα τυλίγμα του κινητήρα KE56KM2 σε βηματισμό μισού βήματος. α)25pps β)100pps γ)300pps δ)500pps ε)700pps ζ)1000pps.

## 5.5 Συμπεράσματα

Γενικά η διάταξη που κατασκευάστηκε ανταποκρίνεται αρκετά ικανοποιητικά πληρώνοντας τις αρχικές προδιαγραφές που τεθήκαν. Ο μικροελεγκτής προγραμματίστηκε κατάλληλα ώστε ο πλήρης έλεγχος του βηματικού κινητήρα να επιτυγχάνεται αρκετά εύκολα, μέσω των τριών πλήκτρων χειρισμού και τις αναγραφόμενες στην οθόνη της διάταξης επιλογές. Οι μετρήσεις αποδεικνύουν την ακρίβεια των παραγόμενων παλμών ελέγχου, που οδηγούν απροβλημάτιστα τις δύο πλήρως ελεγχόμενες γέφυρες. Το κύκλωμα χρονικής καθυστέρησης ανερχομένου μετώπου παλμού, που ενσωματώθηκε στη διάταξη, εξασφαλίζει την ασφαλή μετάβαση κατάστασης λειτουργίας στις δύο γέφυρες αποτρέποντας πιθανά βραχυκυκλώματα. Κάθε μια διπολική έξοδος είναι ικανή να τροφοδοτήσει τα τυλίγματα του κινητήρα με τάση 5 V και με μέγιστη τιμή ρεύματος τα 2.5 A. Η τάση της εξόδου του συστήματος στα ονομαστικά μεγέθη του κινητήρα δημιουργεί το μοναδικό μειονέκτημα που εντοπίζεται στη κατασκευή αυτή, χωρίς βέβαια να την επηρεάζει αρνητικά καθώς ο σκοπός της υλοποίησης της είναι η επίδειξη του τρόπου λειτουργίας και ελέγχου των βηματικών κινητήρων, που είναι η μικρή σχετικά ταχύτητα περιστροφής που επιτυγχάνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί για να περιστραφούν οι βηματικοί κινητήρες σε μεγάλες ταχύτητες διατηρώντας αξιόλογη ροπή, θα πρέπει

η αποκατάσταση του ρεύματος στα τυλίγματα τους να γίνεται σε χρόνο μικρότερο της σταθεράς χρόνου  $RL$  του κινητήρα. Αυτό επιτυγχάνεται τροφοδοτώντας τα τυλίγματα με τάση πολλαπλάσια της ονομαστικής και διατηρώντας το ρεύμα στην ονομαστική του τιμή.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Takashi Kenjo, Stepping motors and their microprocessor controls, Clarendon Press, 1984.
- [2] Myke Predko, Programming and customizing the PIC 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw-Hill, 2007.
- [3] Robert H. Bishop, The Mechatronics Handbook 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Press, 2008.
- [4] Κ. Ζ. Πεκμεστζή, Συστήματα Μικροϋπολογιστών ΙΙ, Συμμετρία, 2009.
- [5] Roger L. Tokheim, Ψηφιακά Ηλεκτρονικά 5<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Α. Τζιόλα Ε. 2002.
- [6] Sendra S. Adel / Smith C. Kenneth, Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1994.
- [7] Β. Σ. Βασιλάτος / Ε. Κ. Τατάκης, Μελέτη και κατασκευή διάταξης ελέγχου βηματικού κινητήρα με υπολογιστή, ερευνητική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2006.
- [8] <http://homepage.cs.uiowa.edu/~jones/step/> , 14/09/2012
- [9] <https://www.microchip.com/> , 14/09/2012
- [10] <http://www.mikroe.com/> , 14/09/2012
- [11] <http://www.ni.com/> , 14/09/2012
- [12] <http://www.shinano.com/> , 14/09/2012
- [13] <http://www.labcenter.com/index.cfm> , 14/09/2012
- [14] <http://www.nidec-servo.com/en/> , 14/09/2012
- [15] <http://www.nmbtc.com/> , 14/09/2012

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

```

1: program FINAL BIBLIOY
2:
3:
4:           ' BIPOLAR STEPPER CONTROLLER
5:           ' THEODORE SOTIROPOULOS
6:
7:
8:
9: Dim freq,i as word
10: Dim check1,check2,full1,full2 as byte
11: dim step2 as byte
12: Dim freq1 as string[6]
13:
14:
15:
16: sub procedure interrupt
17:     if INTCON.RBIF = 1 then           ' Changes on RB4-RB7 ?
18:         if button (PORTB,6,10,1) then
19:
20:             check2 =1
21:
22:         end if
23:
24:         if button(PORTB,5,10,1) then
25:
26:             if freq >=1000 then      ' Maximum value for freq set to
27:                 freq = 1000         ' 1000 steps/sec
28:
29:             else
30:
31:                 freq = freq + i
32:
33:             end if
34:
35:             check1 = 1
36:
37:         end if
38:
39:         if button(PORTB,4,10,1) then
40:
41:             if freq <= 25 then      ' Minimum value for freq set to
42:                 freq = 25         ' 25 steps/sec
43:
44:             else
45:
46:                 freq = freq - i
47:
48:             end if
49:
50:             check1 = 1
51:
52:         end if
53:
54:         INTCON.RBIF = 0
55:     else if INTCON.INTF = 1 then    ' External interrupt (RB0 pin) ?
56:         INTCON.INTF = 0
57:
58:     else if INTCON.T0IF = 1 then    ' TMR0 interrupt occurred ?
59:         INTCON.T0IF = 0
60:
61:     else if INTCON.EEIF = 1 then    ' Is EEPROM write cycle finished ?
62:

```

```

63:             INTCON.BEIF = 0
64:
65:                 end if
66:             end if
67:         end if
68:     end if
69:
70: end sub
71: sub procedure step_step
72:     Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
73:     Lcd_Out(1,3,"Step to Step")
74:     Lcd_Out(3,-3,"Clock   C.Clock")
75:     Lcd_Out(4,-3,"wise     Wise")
76:
77:     step2 = 8
78:     while true
79:         if portb.6 = 1 then
80:             break
81:         end if
82:
83:         if portb.4 = 1 then
84:             step2 = step2 << 1
85:             if step2 = 16 then
86:                 step2 = 1
87:             end if
88:             porta = step2
89:             Lcd_Out(2,7,">>>>")
90:             delay_ms(500)
91:             Porta = $0
92:             Lcd_Out(2,7,"   ")
93:         end if
94:
95:         if portb.5 = 1 then
96:             step2 = step2 >> 1
97:             if step2 = 0 then
98:                 step2 = 3
99:             end if
100:            porta = step2
101:            Lcd_Out(2,7,"<<<<")
102:            delay_ms(500)
103:            porta = $0
104:            Lcd_Out(2,7,"   ")
105:        end if
106:    wend
107: end sub
108: sub procedure lcd
109:     lcd_out(3,-3,"Steps/sec:   Hz")
110:     lcd_out(4,-3," - speed   + ")
111: end sub
112: sub procedure delay500
113:     delay_ms(500)
114: end sub
115: sub procedure delay2000
116:     delay_ms(2000)
117: end sub
118:
119: sub procedure fs
120:     Lcd_out(1,4,"Full step")
121: end sub
122: sub procedure hs
123:     Lcd_out(1,4,"Half step")
124: end sub

```



```
125: sub procedure cw
126:     Lcd_out(2,4,"Clockwise")
127: end sub
128: sub procedure ccw
129:     Lcd_out(2,3,"C.Clockwise")
130: end sub
131: sub procedure selected
132:     Lcd_out(2,4,"selected")
133:     delay2000
134: end sub
135: sub procedure initial
136:     Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
137:     Lcd_out(1,1,"Bipolar Stepper")
138:     Lcd_out(2,4,"Controller")
139:     delay ms(3000)
140:     Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
141:     Lcd_Out(1,3,"Sotiroopoulos")
142:     Lcd_Out(2,5,"Theodore")
143:     Lcd_Out(3,3,"2012")
144:     delay ms(4000)
145:
146:
147: end sub
148:
149: sub procedure freque
150:
151:     if freq = 25 then
152:         delay_ms(40)
153:     end if
154:     if freq = 50 then
155:         delay_ms(20)
156:     end if
157:     if freq = 75 then
158:         delay_ms(13)
159:         delay_us(333)
160:     end if
161:     if freq = 100 then
162:         delay_ms(10)
163:     end if
164:     if freq = 125 then
165:         delay_ms(8)
166:     end if
167:     if freq = 150 then
168:         delay_ms(6)
169:         delay_us(666)
170:     end if
171:     if freq = 175 then
172:         delay_ms(5)
173:         delay_us(714)
174:     end if
175:     if freq = 200 then
176:         delay_ms(5)
177:     end if
178:     if freq = 225 then
179:         delay_ms(4)
180:         delay_us(444)
181:     end if
182:     if freq = 250 then
183:         delay_ms(4)
184:     end if
185:     if freq = 275 then
186:         delay_ms(3)
```

```
187:         delay_us(636)
188:     end if
189:     if freq = 300 then
190:         delay_ms(3)
191:         delay_us(333)
192:     end if
193:     if freq = 325 then
194:         delay_ms(3)
195:         delay_us(77)
196:     end if
197:     if freq = 350 then
198:         delay_ms(2)
199:         delay_us(257)
200:     end if
201:     if freq = 375 then
202:         delay_ms(2)
203:         delay_us(666)
204:     end if
205:     if freq = 400 then
206:         delay_ms(2)
207:         delay_us(500)
208:     end if
209:     if freq = 425 then
210:         delay_ms(2)
211:         delay_us(353)
212:     end if
213:     if freq = 450 then
214:         delay_ms(2)
215:         delay_us(222)
216:     end if
217:     if freq = 475 then
218:         delay_ms(2)
219:         delay_us(105)
220:     end if
221:     if freq = 500 then
222:         delay_ms(2)
223:     end if
224:     if freq = 525 then
225:         delay_ms(1)
226:         delay_us(905)
227:     end if
228:     if freq = 550 then
229:         delay_ms(1)
230:         delay_us(818)
231:     end if
232:     if freq = 575 then
233:         delay_ms(1)
234:         delay_us(739)
235:     end if
236:     if freq = 600 then
237:         delay_ms(1)
238:         delay_us(667)
239:     end if
240:     if freq = 625 then
241:         delay_ms(1)
242:         delay_us(600)
243:     end if
244:     if freq = 650 then
245:         delay_ms(1)
246:         delay_us(538)
247:     end if
248:     if freq = 675 then
```

```
249:             delay_ms(1)
250:             delay_us(481)
251:     end if
252:     if freq = 700 then
253:         delay_ms(1)
254:         delay_us(429)
255:     end if
256:     if freq = 725 then
257:         delay_ms(1)
258:         delay_us(379)
259:     end if
260:     if freq = 750 then
261:         delay_ms(1)
262:         delay_us(333)
263:     end if
264:     if freq = 775 then
265:         delay_ms(1)
266:         delay_us(290)
267:     end if
268:     if freq = 800 then
269:         delay_ms(1)
270:         delay_us(250)
271:     end if
272:     if freq = 825 then
273:         delay_ms(1)
274:         delay_us(212)
275:     end if
276:     if freq = 850 then
277:         delay_ms(1)
278:         delay_us(176)
279:     end if
280:     if freq = 875 then
281:         delay_ms(1)
282:         delay_us(143)
283:     end if
284:     if freq = 900 then
285:         delay_ms(1)
286:         delay_us(111)
287:     end if
288:     if freq = 925 then
289:         delay_ms(1)
290:         delay_us(81)
291:     end if
292:     if freq = 950 then
293:         delay_ms(1)
294:         delay_us(53)
295:     end if
296:     if freq = 975 then
297:         delay_ms(1)
298:         delay_us(25)
299:     end if
300:     if freq = 1000 then
301:         delay_ms(1)
302:     end if
303:
304: end sub
305:
306: main:
307:     trisb = %01110000
308:     trisa = %00000000
309:     trisd = %00000000
310:     trisc = %00000000
```

```

311:         trise = %00000000
312:         PORTa = $0           ' Output 0 to PORT A
313:         PORTc = $0
314:         portd = $0
315:         PORTE = $0
316:         freq = 25
317:
318:         i = 25               ' Value for fluctuation
319:         Lcd_config(PORTd,3,2,1,0,   ' LCD ports configuration
320:                   PORTd,4,5,5)
321:         Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)        ' send command to LCD "clear display"
322:         Lcd_Cmd(LCD_CURSOR_OFF)  ' send command cursor off
323:
324:         INITIAL                ' call initial procedure
325:
326: type_select:
327:
328:         porta = $0
329:         intcon = %00000000
330:         Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
331:         Lcd_Out(1,3,"Select type")
332:         Lcd_Out(2,3,"of rotation")
333:         Lcd_Out(4,-3,"Continuous Step")
334:         delay500
335:         while true
336:             if portb.4 = 1 then
337:                 Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
338:                 Lcd_Out(1,4,"Continuous")
339:                 Lcd_Out(2,5,"rotation")
340:                 Lcd_Out(3,1,"Selected")
341:             delay2000
342:             goto step_select
343:             end if
344:             if portb.5 = 1 then
345:                 Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
346:                 Lcd_Out(1,3,"Step to Step")
347:                 Lcd_Out(2,7,"mode")
348:                 Lcd_Out(3,1,"Selected")
349:             delay2000
350:             goto step_step
351:             end if
352:         wend
353:
354:
355: step_step:
356: step_step
357: goto type_select
358: step_select:
359:
360:         PORTA = $0
361:         intcon = %00000000
362:         Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
363:         Lcd_Out(1,3,"Select type")   ' print txt to LCD, 1st row, 1st
column
364:         Lcd_Out(2,5,"of step")
365:         Lcd_Out(4,-3,"Full Half")
366:         delay500
367:         While true                 ' Loop until something is
pressed
368:             if PORTB.5 = 1 then
369:                 Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
370:                 hs

```

```

371:         selected
372:
373:         full1 = 0
374:         full2 = 0
375:         goto rotation_select
376:     end if
377:     if PORTB.4 = 1 then
378:         Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
379:         fs
380:         selected
381:
382:         full1 = 1
383:         full2 = 0
384:         goto full_step2           'rotation_select
385:
386:     end if
387:     if portb.6 = 1 then
388:         goto type_select
389:     end if
390: Wend
391: full_step2:
392: PORTA = $0
393:     intcon = %00000000
394:         Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
395:         Lcd_out(1,3,"Select type")
396:         Lcd_out(2,2,"of full step")
397:         Lcd_out(3,-3,"coil's' per step")
398:         Lcd_out(4,-3,"One           Two")
399:     delay500
400: while true
401: if PORTB.4 = 1 then
402:     full2 = 0
403:         Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
404:         lcd_out(1,5,"One coil")
405:         lcd_out(2,5,"per step")
406:         lcd_out(3,1,"energised")
407:         delay2000
408:         goto rotation_select
409: end if
410: if portB.5 = 1 then
411:     full2 = 1
412:         Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
413:         lcd_out(1,5,"Two coils")
414:         lcd_out(2,5,"per step")
415:         lcd_out(3,1,"energised")
416:         delay2000
417:         goto rotation_select
418: end if
419: if portB.6 = 1 then
420: goto step_select
421: end if
422: wend
423: rotation_select:
424:     intcon = %00000000
425:     Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
426:     Lcd_out(1,1,"Select  Rotation")
427:     Lcd_Out(3,-3,"Clock   C.Clock")
428:     Lcd_Out(4,-3,"wise     Wise")
429:     check1 = 1
430:     PORTA = $0
431:
432:     delay500

```

```

433: while true
434:     if portb.5 = 1 then
435:         Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
436:         if full1 = 1 then
437:             if full2 = 0 then
438:                 fs
439:                 ccw
440:                 lcd
441:                 INTCON = %10001000 ' Enable external interrupts
442:                 goto full_step_ccw 'full step 1 coil counter
clockwise
443:             end if
444:             if full2 = 1 then
445:                 fs
446:                 ccw
447:                 lcd
448:                 INTCON = %10001000 'Enable external interrupts
449:                 goto full_step2_ccw 'full step 2 coil counter clockwise
450:             end if
451:         else
452:             hs
453:             ccw
454:             lcd
455:             INTCON = %10001000 'Enable external interrupts
456:             goto half_step_ccw 'half step counter counter
clockwise
457:         end if
458:     end if
459:     if portb.4 = 1 then
460:         Lcd_Cmd(LCD_CLEAR)
461:         if full1 = 1 then
462:             if full2 = 0 then
463:                 fs
464:                 cw
465:                 lcd
466:                 INTCON = %10001000 'Enable external interrupts
467:                 goto full_step_cw 'full step 1 coil clockwise
468:             end if
469:             if full2 = 1 then
470:                 fs
471:                 cw
472:                 lcd
473:                 INTCON = %10001000 'Enable external interrupts
474:                 goto full_step2_cw 'full step 2 coil clockwise
475:             end if fs
476:         else
477:             hs
478:             cw
479:             lcd
480:             INTCON = %10001000 ' Enable external interrupts
481:             goto half_step
482:         end if
483:     end if
484:     if portb.6 = 1 then
485:         if full1 = 1 then
486:             goto full_step2
487:         else
488:             goto step_select
489:         end if
490:     end if
491: Wend
492: full_step_cw: ' Full step clockwise sequence

```

```

493:     while true
494:         PORTA = %00000001
495:         freque
496:         PORTA = %00000010
497:         freque
498:         PORTA = %00000100
499:         freque
500:         PORTA = %00001000
501:         freque
502:             gosub check
503:     wend
504: full_step2_cw:
505: while true
506:     PORTA = %00000011
507:     freque
508:     PORTA = %00000110
509:     freque
510:     PORTA = %00001100
511:     freque
512:     PORTA = %00001001
513:     freque
514:         gosub check
515: wend
516: full_step_cw: * Full step counter clock sequence
517:     while true
518:         PORTA = %00001000
519:         freque
520:         PORTA = %00000100
521:         freque
522:         PORTA = %00000010
523:         freque
524:         PORTA = %00000001
525:         freque
526:             gosub check
527:     wend
528: full_step2_ccw:
529:     while true
530:         PORTA = %00001100
531:         freque
532:         PORTA = %00000110
533:         freque
534:         PORTA = %00000011
535:         freque
536:         PORTA = %00001001
537:         freque
538:             gosub check
539:     wend
540: half_step: * Half step clock sequence
541:     while true
542:         PORTA = %00000001
543:         freque
544:         PORTA = %00000011
545:         freque
546:         PORTA = %00000010
547:         freque
548:         PORTA = %00000110
549:         freque
550:         PORTA = %00000100
551:         freque
552:         PORTA = %00001100
553:         freque
554:         PORTA = %00001000

```

```

355:         freque
356:         PORTA = %00001001
357:         freque
358:
359:         gosub  check
360:     wend
361: half_step_ccw:                                ' Half step counter clock sequence
362:     while true
363:         PORTA = %00001000
364:         freque
365:         PORTA = %00001100
366:         freque
367:         PORTA = %00000100
368:         freque
369:         PORTA = %00000110
370:         freque
371:         PORTA = %00000010
372:         freque
373:         PORTA = %00000011
374:         freque
375:         PORTA = %00000001
376:         freque
377:         PORTA = %00001001
378:         freque
379:         gosub  check
380:     wend
381: check:
382:         intcon = %00000000                    ' Disable external interrupts
383:         if check2 = 1 then                    ' If pressed go back to selection
384:             check2 = 0
385:             goto rotation_select
386:         end if
387:         if check1 = 1 then
388:             wordToStr(freq,freq1)            'Convert integer to string for LCD
389:             Print
390:             lcd_out(3,6,freq1)
391:             check1 = 0
392:         end if
393:         INTCON = %10001000                    ' Enable external interrupts
394:         return
395:     end.
396:
397:
398:
399:
400: end.

```

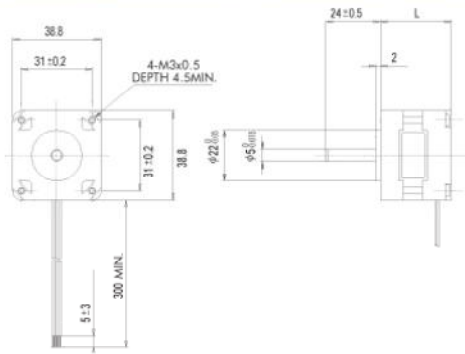


# Stepper Motor Series SST40C

Size 17



6 Lead Wire  
31mm, 37mm L  
0.9° step

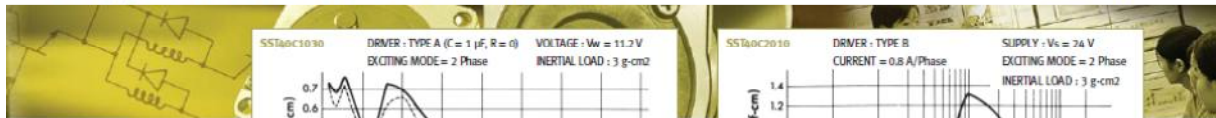


MODEL		STEP ANGLE	VOLTAGE	CURRENT	RESISTANCE	INDUCTANCE	HOLDING TORQUE	ROTOR INERTIA	NUMBER OF LEADS	WEIGHT	DIMENSION
SINGLE SHAFT	DOUBLE SHAFT	DEG.	V	A/Phase	Ω/Phase	mH/Phase	kg-cm	g-cm <sup>2</sup>	LEAD	kg	L
SST40C1010	SST40C1011	0.9	4	0.8	5	5	1.15	17	6	0.17	31
SST40C1020	SST40C1021	0.9	9.6	0.4	24	26	1.20	17	6	0.17	31
SST40C1030	SST40C1031	0.9	11.2	0.3	37.5	37.7	1.25	17	6	0.17	31
SST40C2010	SST40C2011	0.9	6	0.8	7.5	11	1.85	27	6	0.2	37
SST40C2020	SST40C2021	0.9	8.6	0.56	15	23	1.79	27	6	0.2	37
SST40C2030	SST40C2031	0.9	12	0.4	30	44	1.67	27	6	0.2	37

RoHS compliant

# Stepper Motor Series SST40C, SST41D

Size 17



6 Lead Wire  
31mm, 37mm L  
0.9° step

