



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ
ΕΛΕΓΚΤΗ ΒΗΜΑΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

ΣΥΜΕΩΝΙΔΗΣ ΛΑΖΑΡΟΣ ΦΟΙΒΟΣ, ΑΜ: 6996

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΟΥΛΙΩΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2023

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Πάτρα, Ημερομηνία:

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Γεώργιος Σουλιώτης, Υπογραφή:
2. Λάμπρος Μπισδούνης, Υπογραφή:
3. Ανδρέας Κατσαΐτης , Υπογραφή:

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη εργασία.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Φοίβος Λάζαρος Συμεωνίδης που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία κατασκευάστηκε ένα κύκλωμα για έλεγχο βηματικού κινητήρα. Οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών διότι οδηγούνται από ηλεκτρονικά κυκλώματα τα οποία καθορίζουν τη γωνία και την ταχύτητα περιστροφής τους.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας πραγματοποιείται μια πρώτη γενική περιγραφή των βηματικών κινητήρων και των εφαρμογών τους. Ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο, όπου παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των βηματικών κινητήρων. Ακολουθεί το τρίτο κεφάλαιο, στο οποίο αναλύονται οι διάφοροι τύποι των βηματικών κινητήρων και στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συστήματα και τρόποι οδήγησης των κινητήρων αυτό. Στη συνέχεια, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η δομή και η λειτουργία του υλοποιηθέντος κυκλώματος και τέλος στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται ορισμένες παρατηρήσεις για την λειτουργία του κυκλώματος και προτείνονται μελλοντικές βελτιώσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	II
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	III
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	V
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	V
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	VIII
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	VIII
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Οικιακές συσκευές και άλλες οικιακές εφαρμογές ^[1]	1
1.2 Εμπορικές εφαρμογές ^[1]	2
1.3 Βιομηχανικές εφαρμογές ^[1]	2
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΒΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ^{[2][3][4]}	4
2.1 Βασικά χαρακτηριστικά βηματικού κινητήρα.....	4
2.2 Κατασκευαστικά στοιχεία βηματικού κινητήρα.....	4
2.3 Αρχή λειτουργίας.....	5
2.4 Βασικά χαρακτηριστικά των βηματικών κινητήρων	5
2.5 Έλεγχος βηματικών κινητήρων	9
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 -ΕΙΔΗ ΒΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ^{[5][6][7]}	13
3.1 Τύποι και Κατασκευή Βηματικού κινητήρα.....	13
3.2 Ρότορας.....	13
3.2.1 Ρότορας μόνιμου μαγνήτη	13
3.2.2 Ρότορας μεταβλητής απροθυμίας	14
3.2.3 Υβριδικός ρότορας	14
3.3 Στάτης	15
3.4 Ο αριθμός πόλων και η σημασία του.....	17
3.5 Διαφορές βηματικού κινητήρα και κινητήρα ΣΡ.....	19
3.5.1 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος	19
3.5.2 Βηματικοί κινητήρες.....	21
3.5.3 Σύγκριση κινητήρων συνεχούς ρεύματος και βηματικών κινητήρων.....	22
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΒΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ^{[8][9]}	26
4.1 Κατηγορίες οδηγών βηματικού κινητήρα.....	26
4.1.1 Οδηγοί παλμού εισόδου.....	26
4.1.2 Προγράμματα οδήγησης με ενσωματωμένο ελεγκτή (αποθηκευμένα δεδομένα ή αποθηκευμένο πρόγραμμα).	26
4.2 Αρχή λειτουργίας οδηγού βηματικού κινητήρα	27
4.2.1 Ελεγκτής.....	27
4.3 Τύποι οδηγών βηματικού κινητήρα	28
4.3.1 Με βάση τον τρόπο οδήγησης.....	28
4.3.2 Με βάση τον έλεγχο τάσης ή ρευματος	29
4.3.3 Με βάση το είδος του βηματικού κινητήρα (Μονοπολικό/Διπολικό κινητήρες)	29
4.4 Τεχνικές οδήγησης βηματικού κινητήρα	32

4.5	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Stepper Motors.....	35
4.5.1	Πλεονεκτήματα.....	35
4.5.2	Μειονεκτήματα.....	35
4.6	Χρήσεις και Εφαρμογές Stepper Motor.....	36
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 –ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ	37
5.1	Αρχή λειτουργίας του ελεγκτή που υλοποιήθηκε.....	37
5.2	Κώδικας Gray (Gray code) ^[10]	40
5.2.1	Χρησιμότητα του κώδικα Gray.....	41
5.3	Παρουσίαση του κυκλώματος	44
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ.....	47
7	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	52
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	52

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1	Τυπικό παράδειγμα βηματικού κινητήρα (https://www.pololu.com/product/1207#lightbox-picture0J2283;main-pictures)	6
Εικόνα 2-2	Τα κατασκευαστικά μέρη ενός βηματικού κινητήρα(https://learnmech.com/what-is-stepper-motor-types-application-advantages/)	8
Εικόνα 5-1	Κωδικοποιητής απόλυτης θέσης που χρησιμοποιεί κώδικα Gray (https://acomelectronics.com/forum/viewtopic.php?t=130)	43
Εικόνα 5-2	Η πλακέτα με το καλώδιο τροφοδοσίας και τον βηματικό κινητήρα	44
Εικόνα 5-3	Πλάγια όψη της πλακέτας	44
Εικόνα 5-4	Κάτοψη της πλακέτας	45
Εικόνα 5-5	Παρουσίαση των εξαρτημάτων της πλακέτας	45
Εικόνα 5-6	Παρουσίαση του κωκλώματος	45
Εικόνα 5-7	Παρουσίαση μετρήσεων κυκλώματος	50
Εικόνα 5-8	Παρουσίαση μετρήσεων για 1,32Rpm	51
Εικόνα 5-9	Παρουσίαση μετρήσεων για 4,78Rpm	51
Εικόνα 5-10	Παρουσίαση μετρήσεων για 8,83Rpm	51

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1	Τομή βηματικού κινητήρα (https://electricalgang.com/types-of-stepper-motors/)	4
Σχήμα 2-2	Βήματα βηματικού κινητήρα (https://www.theengineeringprojects.com/2022/04/control-stepper-motor-with-raspberry-pi-4-using-python.html)	5
Σχήμα 2-3	Τομή ενός βηματικού κινητήρα (https://electricalgang.com/types-of-stepper-motors/)	7
Σχήμα 3-1	Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses)	14

Σχήμα 3-2	Υβριδικός	βηματικός	κινητήρας	
(https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses)				15
Σχήμα 3-3	Περιέλιξη	στάτορα	δύο φάσεων (αριστερά),	τριφασική
περιέλιξη στάτορα (δεξιά)				16
Σχήμα 3-4	Στάτης	δύο φάσεων, μονοπολικού ζεύγους (αριστερά) και	δύο φάσεων, ζεύγους	στάτορα (δεξιά). Τα γράμματα δείχνουν το
μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται όταν εφαρμόζεται θετική τάση μεταξύ A+ και A-. (https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses)				16
Σχήμα 3-5	Κίνηση	ρότορα	ενός απλοποιημένου βηματικού	κινητήρα (μονοπολικό)
				18
Σχήμα 3-6	Βασικό	κύκλωμα	για κινητήρες συνεχούς	ρεύματος με ψήκτρα (https://www.linquip.com/blog/series-wound-dc-motor/)
				20
Σχήμα 4-1	Οδηγός	παλμού	εισόδου	
(https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/2-phase-bipolar-drivers.html)				26
Σχήμα 4-2	Οδηγός	με	ενσωματωμένο	ελεγκτή
(https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/2-phase-bipolar-drivers.html)				27
Σχήμα 4-3	Βασικό	διάγραμμα	ελέγχου	κινητήρα
(https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses)				28
Σχήμα 4-4	Κατεύθυνση	του μαγνητικού πεδίου με	βάση την	κατεύθυνση του ρεύματος του πηνίου
(https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses)				29
Σχήμα 4-5	Κύκλωμα	οδήγησης	μονοπολικού βηματικού	κινητήρα (https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses)
				30
Σχήμα 4-6	Κύκλωμα	οδήγησης	διπολικού βηματικού	κινητήρα (https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses)
				31
Σχήμα 4-7	Wave	Mode		
(https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses)				32
Σχήμα 4-8	Βήματα	λειτουργίας	πλήρους	βήματος
(https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses)				33

Σχήμα 4-9	Βήματα	λειτουργίας	μισού	βήματος	
(https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses)					33
Σχήμα 4-10		Microstepping			
(https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses)					35
Σχήμα 5-1	Το διάγραμμα του ελεγκτή που υλοποιήθηκε				38

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2-1 Έλεγχος ταχύτητας βηματικών κινητήρων (https://us.aspina-group.com/en/learning-zone/columns/what-is/003/)..	9
Διάγραμμα 2-2 Προφίλ κίνησης σταθερής ταχύτητας (ορθογώνιο προφίλ κίνησης) (https://us.aspina-group.com/en/learning-zone/columns/what-is/003/)	11
Διάγραμμα 2-3 Προφίλ κίνησης επιτάχυνσης/επιβράδυνσης (τραπεζοειδές προφίλ κίνησης)(https://us.aspina-group.com/en/learning-zone/columns/what-is/003/)	12

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3-1 Σύγκριση βουρτσισμένων κινητήρων έναντι βηματικών κινητήρων.	22
--	----

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως υποδηλώνει το όνομά τους, οι βηματικοί κινητήρες περιστρέφονται σε σταθερά βήματα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές γνωστές οικιακές συσκευές, καθώς και σε πολλές εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή της διάταξης που παρουσιάζεται στο τελευταίο κεφάλαιο, ένας βηματικός κινητήρας και ως εκ τούτου πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στις χρήσεις του, στα είδη του, στις λειτουργίες του και στους τρόπους οδήγησης του.

Οι βηματικοί κινητήρες κινούνται από ηλεκτρικούς παλμούς που καθορίζουν τη γωνία και την ταχύτητα περιστροφής τους. Ελέγχονται χρησιμοποιώντας έναν ελεγκτή ή ταλαντωτή που παράγει αυτούς τους παλμούς. Η γωνία και η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι ανάλογες με τον αριθμό και τον ρυθμό των παλμών εισόδου αντίστοιχα, έτσι με άλλα λόγια, αυτός ο απλός μηχανισμός κίνησης μπορεί να παρέχει ακριβή έλεγχο της θέσης και της ταχύτητας του κινητήρα.

1.1 Οικιακές συσκευές και άλλες οικιακές εφαρμογές^[1]

Οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε μια μεγάλη ποικιλία συσκευών που εκμεταλλεύονται την ακριβή τοποθέτηση που καθίσταται δυνατή λόγω του χαρακτηριστικού τους να περιστρέφονται σε σταθερά βήματα κατά διαστήματα. Τα αναλογικά ρολόγια είναι ένα γνώριμο παράδειγμα, με τον δεύτερο δείκτη του ρολογιού να κινείται από έναν βηματικό κινητήρα που περιστρέφεται σε βήματα 6° , μία φορά κάθε δευτερόλεπτο. Άλλες χρήσεις περιλαμβάνουν τη λειτουργία περσίδων κλιματισμού, την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση βαλβίδων σωλήνων, την οδήγηση ηλεκτρικών κουρτινών και τους μηχανισμούς αυτόματης εστίασης και ζουμ σε ψηφιακές κάμερες ή κάμερες τηλεφώνου. Οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται επίσης σε οικιακούς εκτυπωτές ή σε μηχανήματα φωτοαντιγραφικού που βρίσκονται στα πολυκαταστήματα.

1.2 Εμπορικές εφαρμογές^[1]

Οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως σε εμπορικό εξοπλισμό που συναντάται έξω από το σπίτι. Οι αυτόματοι πωλητές είναι μια τέτοια εφαρμογή. Σε αυτόματους πωλητές γεμίσματος φλιτζανιών, για παράδειγμα, ένας βηματικός κινητήρας λειτουργεί τον μηχανισμό μεταφοράς κυπέλλων. Στα μηχανήματα τραπεζικών ΑΤΜ, οι βηματικοί κινητήρες τροφοδοτούν το χαρτί μέσω του εκτυπωτή αποδείξεων. Στους σιδηροδρομικούς σταθμούς, λειτουργούν τους μηχανισμούς τροφοδοσίας σε μηχανήματα αυτόματης πώλησης εισιτηρίων και επικύρωσης και οδηγούν τις περιστρεφόμενες κάμερες ασφαλείας περιστρέφονται περιοδικά για να επιτηρούν τη γύρω περιοχή. Αυτές είναι μόνο μερικές από τις πολλές εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται βηματικοί κινητήρες.

1.3 Βιομηχανικές εφαρμογές^[1]

Οι βηματικοί κινητήρες έχουν επίσης χρήσεις στη βιομηχανία. Τα κοινά παραδείγματα περιλαμβάνουν ακριβή τοποθέτηση και μετακίνηση αντικειμένου ή μηχανές μεταφορικής ταινίας σε γραμμές παραγωγής που πρέπει να προχωρήσουν με σταθερό ρυθμό. Σε εφαρμογές όπως οι μεταφορικοί μηχανισμοί για τη μεταφορά πλακετών κυκλωμάτων, ημιαγωγών ή άλλων εξαρτημάτων ακριβείας, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την αντιμετώπιση του κινδύνου δόνησης από τον κινητήρα μετάδοσης κίνησης, καθώς μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στα εξαρτήματα που μεταφέρονται. Για να αποφευχθεί αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια κίνηση μικροβημάτων για την ελαχιστοποίηση των κραδασμών από τον βηματικό κινητήρα. Αυτός είναι ένας από τους τρόπους με τους οποίους οι βηματικοί κινητήρες διασφαλίζουν την αξιόπιστη μεταφορά των εξαρτημάτων ακριβείας.

Οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται επίσης για την κίνηση των χεριών ή των αρθρώσεων των βιομηχανικών ρομπότ. Καθώς μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια και ευελιξία στην κίνηση με την προσάρτηση ενός περιστροφικού κωδικοποιητή στον βηματικό κινητήρα και την εκτέλεση σερβοελέγχου στον οδηγό, αναμένεται ότι

αυτοί οι κινητήρες θα διαδραματίσουν όλο και πιο ζωτικό ρόλο στον τομέα της ρομποτικής.

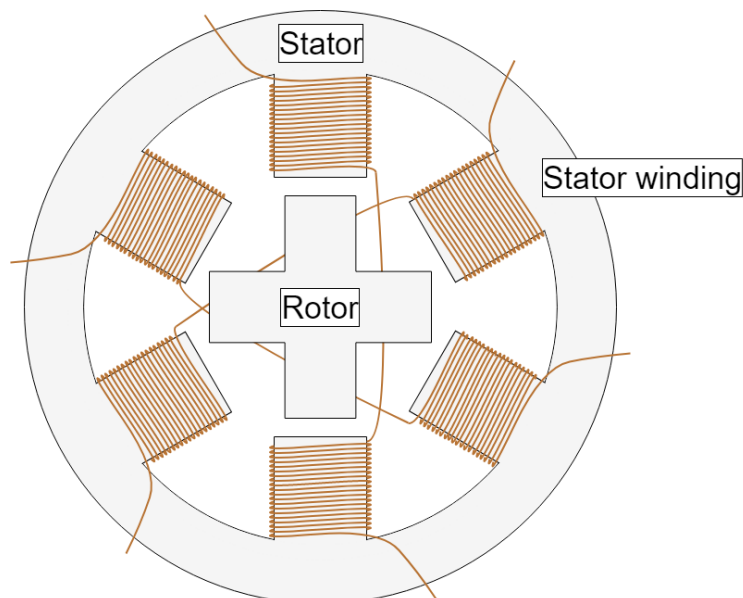
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΒΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ^{[2][3][4][12]}

2.1 Βασικά χαρακτηριστικά βηματικού κινητήρα

Ο βηματικός κινητήρας είναι ένας ηλεκτροκινητήρας του οποίου το κύριο χαρακτηριστικό είναι ότι ο άξονάς του περιστρέφεται εκτελώντας βήματα, δηλαδή κινούμενος κατά μια σταθερή ποσότητα μοιρών. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτυγχάνεται χάρη στην εσωτερική δομή του κινητήρα και μας επιτρέπει να γνωρίζουμε την ακριβή γωνιακή θέση του άξονα μετρώντας απλώς πώς μπορεί να έχουν πραγματοποιηθεί τα βήματα, χωρίς να χρειάζεται αισθητήρας. Αυτό το χαρακτηριστικό τον καθιστά επίσης κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

2.2 Κατασκευαστικά στοιχεία βηματικού κινητήρα

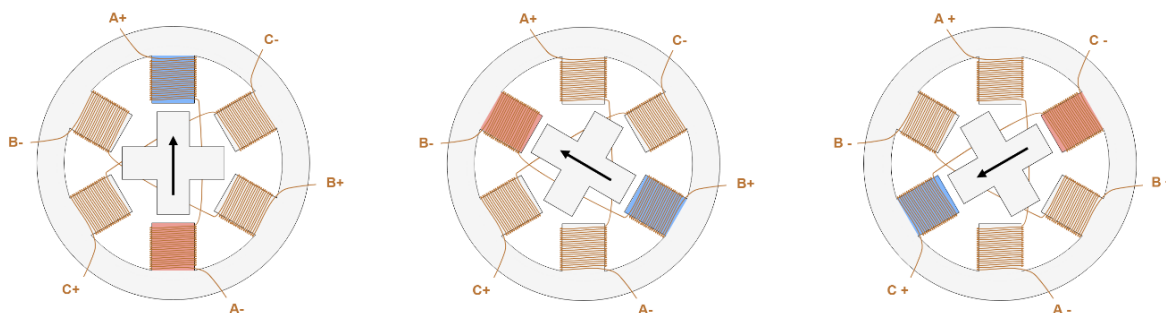
Όπως όλοι οι ηλεκτρικοί κινητήρες, οι βηματικοί κινητήρες έχουν ένα σταθερό μέρος (τον στάτορα) και ένα κινούμενο μέρος (το ρότορα). Στον στάτορα, υπάρχουν δόντια στα οποία είναι καλωδιωμένα τα πηνία, ενώ ο ρότορας είναι είτε μόνιμος μαγνήτης είτε ένας πυρήνας σιδήρου μεταβλητής απροθυμίας. Το Σχήμα 2-1 δείχνει ένα σχέδιο που αντιπροσωπεύει το τμήμα του κινητήρα που φαίνεται, όπου ο ρότορας είναι ένας πυρήνας σιδήρου μεταβλητής απροθυμίας.



Σχήμα 2-1 Τομή βηματικού κινητήρα
(<https://electricalgang.com/types-of-stepper-motors/>)

2.3 Αρχή λειτουργίας

Η βασική αρχή λειτουργίας του βηματικού κινητήρα είναι η εξής: Ενεργοποιώντας μία ή περισσότερες από τις φάσεις του στάτη, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο από το ρεύμα που ρέει στο πηνίο και ο ρότορας ευθυγραμμίζεται με αυτό το πεδίο. Με την παροχή διαφορετικών φάσεων στη σειρά, ο ρότορας μπορεί να περιστραφεί κατά μια συγκεκριμένη ποσότητα για να φτάσει στην επιθυμητή τελική θέση. Το Σχήμα 2-2 δείχνει μια αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας. Στην αρχή, το πηνίο A ενεργοποιείται και ο ρότορας ευθυγραμμίζεται με το μαγνητικό πεδίο που παράγει. Όταν το πηνίο B ενεργοποιείται, ο ρότορας περιστρέφεται δεξιόστροφα κατά 60 για να ευθυγραμμιστεί με το νέο μαγνητικό πεδίο. Το ίδιο συμβαίνει όταν το πηνίο C ενεργοποιείται. Στις εικόνες, τα χρώματα των δοντιών του στάτορα υποδεικνύουν την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από την περιέλιξη του στάτορα.



Σχήμα 2-2 Βήματα βηματικού κινητήρα
(<https://www.theengineeringprojects.com/2022/04/control-stepper-motor-with-raspberry-pi-4-using-python.html>)

2.4 Βασικά χαρακτηριστικά των βηματικών κινητήρων

Οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε συσκευές στις οποίες βασική απαίτηση είναι ο ακριβής έλεγχος της θέσης ενός περιστρεφόμενου άξονα, χωρίς την ύπαρξη αισθητήρα θέσης.

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά των βηματικών κινητήρων είναι:

- Η οδήγησή τους πραγματοποιείται με κατάλληλους παλμούς τάσης. Κάθε παλμός αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη γωνία στροφής

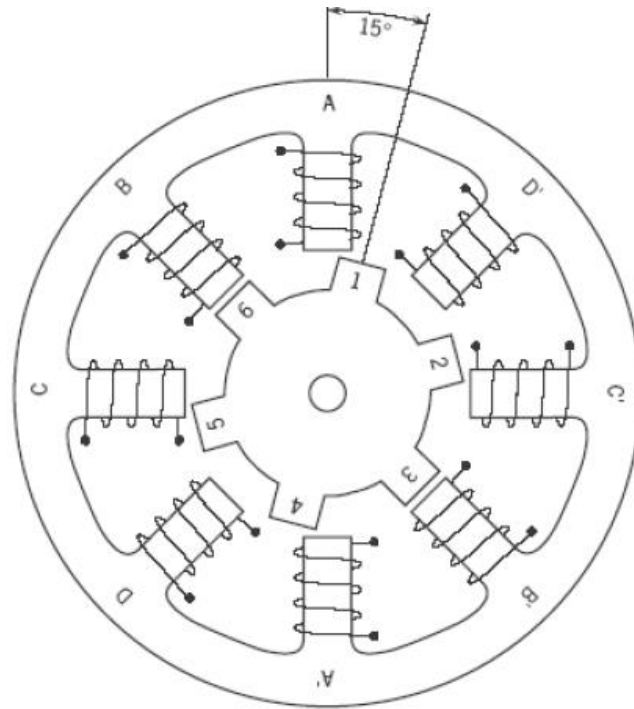
του δρομέα, η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Έτσι καθίσταται δυνατός ο έλεγχος της θέσης του δρομέα χωρίς την ανάγκη αισθητήρων, παρά μόνο με τον απαραίτητο αριθμό παλμών.

- Σε χαμηλές ταχύτητες λειτουργίας αναπτύσσονται μεγάλες τιμές ροπής
- Με κατάλληλη παλμοδότηση είναι δυνατό να επιτευχθεί η αναγκαία ροπή συγκράτησης (ροπή σε ακινησία), ιδιότητα πολύ χρήσιμη για εφαρμογές όπως π.χ. οι ρομποτικοί βραχίονες.

Η ουσιώδης ιδιότητα του βηματικού κινητήρα είναι η ικανότητά του να μεταφράζει την αλλαγή της διέγερσης σε καθορισμένες αλλαγές της θέσης του ρότορα ('βήματα'). Οι βηματικοί κινητήρες έχουν πόλους από μαγνητικά διαπερατό υλικό τόσο στο σταθερό μέρος (στον «στάτη») όσο και στο περιστρεφόμενο τμήμα (στο «ρότορα»).



Εικόνα 2-1 Τυπικό παράδειγμα βηματικού κινητήρα
(<https://www.pololu.com/product/1207#lightbox-picture0J2283;main-pictures>)

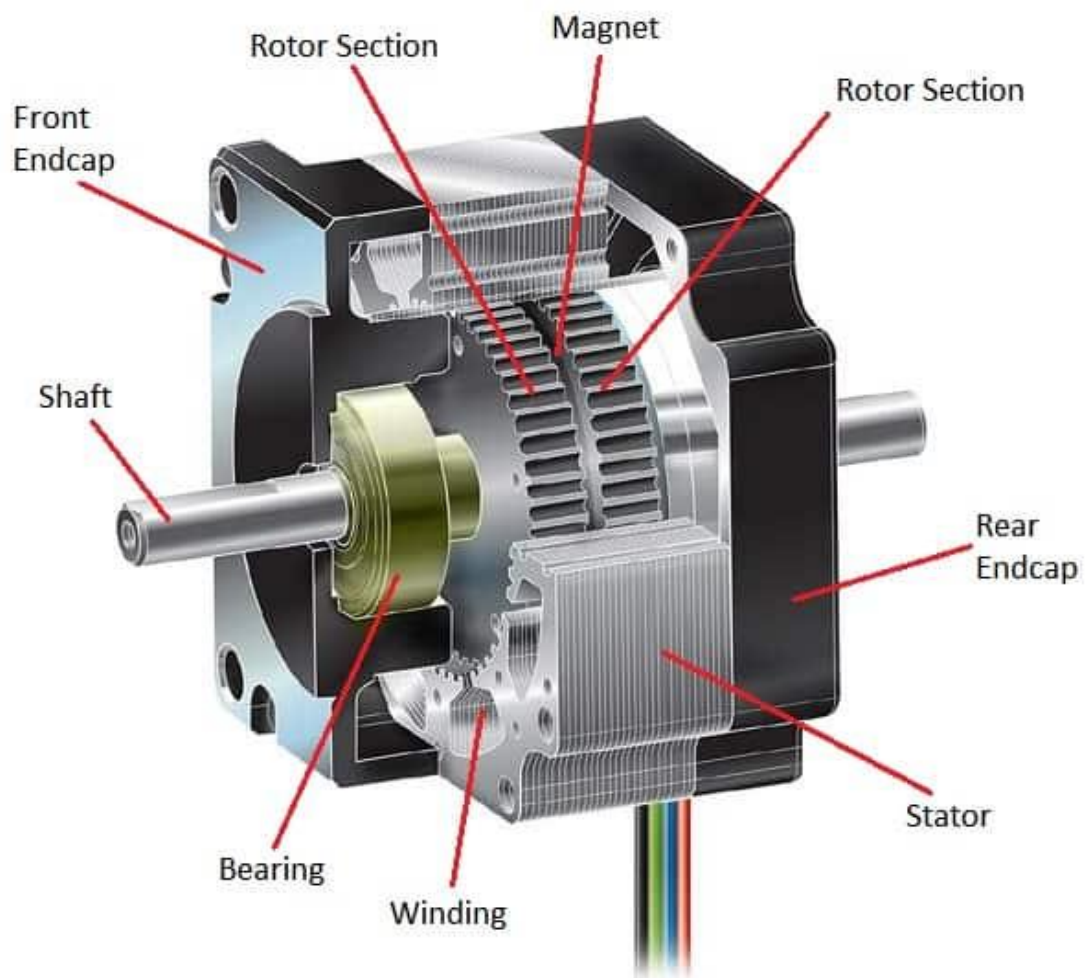


Σχήμα 2-3 Τομή ενός βηματικού κινητήρα
(<https://electricalgang.com/types-of-stepper-motors/>)

Οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούν συνδυασμό ηλεκτρικών παλμών για την κίνησή τους. Στο Σχήμα 2-3 παρουσιάζεται η τομή ενός βηματικού κινητήρα. Ο κινητήρας αυτός αποτελείται από έναν ρότορα μαλακού σιδήρου με οδοντώσεις και έναν στάτορα με τέσσερα ζεύγη ηλεκτρομαγνητών: A και A', B και B', C και C', D και D'. Για να κινηθεί ο ρότορας εφαρμόζεται διαδοχικά σε κάθε ένα από τα παραπάνω ζεύγη μια τάση ηλεκτρικού ρεύματος. Όταν το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται από το ένα ζεύγος ηλεκτρομαγνητών στο διπλανό του ο ρότορας μετατοπίζεται κατά 15° λόγω των μαγνητικών δυνάμεων που εφαρμόζονται σε αυτόν. Η γωνία αυτή ονομάζεται βήμα του κινητήρα..

Πιο αναλυτικά, στο στιγμιότυπο του παραπάνω σχήματος βλέπουμε τη θέση του κινητήρα όταν το ηλεκτρικό ρεύμα εφαρμόζεται στο ζεύγος B και B'. Τότε οι οδοντώσεις 6 και 3 ευθυγραμμίζονται, λόγω της μαγνητικής έλξης, με τους ηλεκτρομαγνήτες B και B' αντίστοιχα. Στην συνέχεια εάν πάψει η εφαρμογή του ρεύματος στο ζεύγος B, B' και μεταφερθεί στο C και C' τότε το αποτέλεσμα θα είναι η ευθυγράμμιση

των οδοντώσεων 5 και 2 με τα C και C' και έτσι ο ρότορας στρέφεται 15ο κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Εάν στη συνέχεια το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφερθεί στο ζεύγος D και D' τότε τα πηνία αυτά θα ευθυγραμμιστούν με τις οδοντώσεις 4 και 1 αντίστοιχα και ο ρότορας θα περιστραφεί κατά 15ο ακόμη. Για τη συνεχή κίνηση του κινητήρα αρκεί η ανάλογη εναλλαγή της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος σε 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 σειρά με την οποία εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση στα ζεύγη των ηλεκτρομαγνητών.



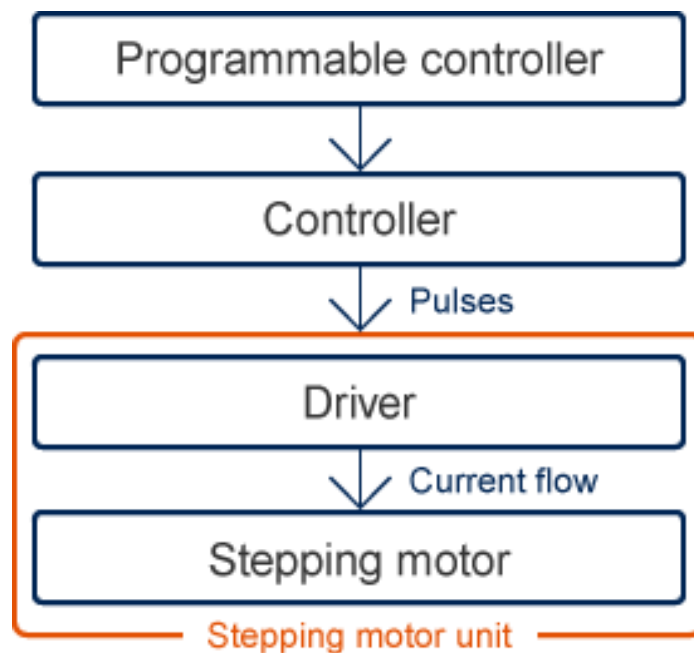
Εικόνα 2-2 Τα κατασκευαστικά μέρη ενός βηματικού κινητήρα(<https://learnmech.com/what-is-stepper-motor-types-application-advantages/>)

2.5 Έλεγχος βηματικών κινητήρων

Οι βηματικοί κινητήρες ελέγχονται με ανοιχτό βρόχο. Αυτό σημαίνει ότι ο έλεγχος πραγματοποιείται με τη μονόδρομη διέλευση των σημάτων εντολής από τον ελεγκτή υψηλότερου επιπέδου στον κινητήρα. Αυτό κάνει τον έλεγχο βηματικού κινητήρα πολύ απλό, εξαλείφοντας την ανάγκη για αισθητήρες και ανάδραση.

Όταν χρησιμοποιείται η τυπική τεχνική έλεγχου σειράς παλμών, ο βηματικός κινητήρας λειτουργεί έχοντας έναν προγραμματιζόμενο ελεγκτή (γεννήτρια παλμών) να παράγει παλμούς που εισάγονται σε έναν οδηγό, ο οποίος με τη σειρά του παρέχει το ρεύμα κίνησης στον κινητήρα.

Εάν δεν απαιτείται προηγμένος έλεγχος, είναι επίσης δυνατό η λειτουργία του ελεγκτή (παραγωγή παλμών) να ενσωματωθεί στο πρόγραμμα οδήγησης. Σε αυτήν την περίπτωση, ένας προγραμματιζόμενος ελεγκτής με τη δική του μονάδα I/O χρησιμοποιείται για την αποστολή εντολών έναρξης και διακοπής στο πρόγραμμα οδήγησης. Στη συνέχεια, ο οδηγός ελέγχει την παροχή ρεύματος κίνησης στον βηματικό κινητήρα με βάση αυτές τις εντολές.



Διάγραμμα 2-1 Έλεγχος ταχύτητας βηματικών κινητήρων
(<https://us.aspina-group.com/en/learning-zone/columns/what-is/003/>)

Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, οι βηματικοί κινητήρες ελέγχονται από την είσοδο ηλεκτρικών παλμών. Οι παλμοί έχουν συχνότητα, με τον αριθμό των παλμών ανά δευτερόλεπτο (pps) να ονομάζεται «ρυθμός παλμού». Η περιστροφή του βηματικού κινητήρα είναι ανάλογη με τον αριθμό των παλμών εισόδου και αυτό επιτρέπει την ακριβή τοποθέτηση. Αυτή η περιστροφή του κινητήρα (γωνία) μπορεί να υπολογιστεί ως εξής.

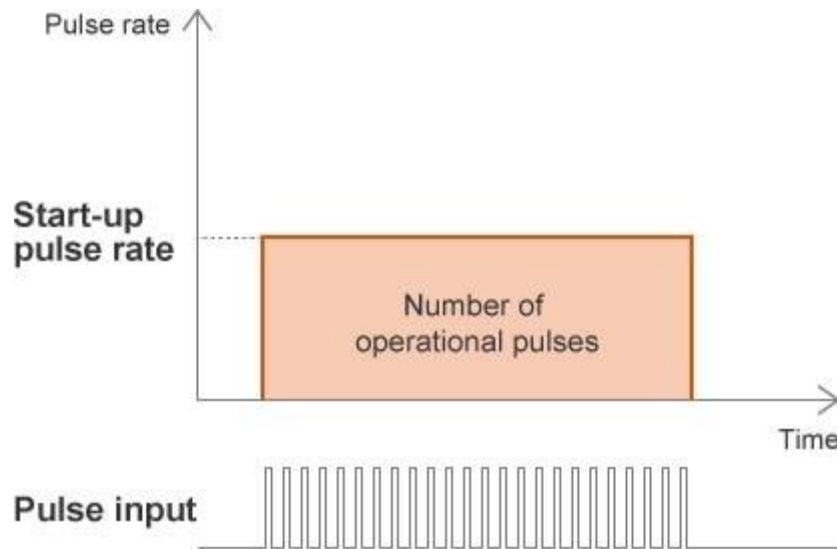
Περιστροφή κινητήρα = γωνία βήματος × αριθμός παλμών

Ομοίως, η ταχύτητα ενός βηματικού κινητήρα είναι ανάλογη του ρυθμού των παλμών εισόδου. Ένας υψηλότερος ρυθμός παλμού (υψηλότερη συχνότητα παλμού) προκαλεί αναλογική αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του βηματικού κινητήρα. Αυτή η ταχύτητα κινητήρα (στροφές ανά λεπτό, r/min, rpm) μπορεί να υπολογιστεί ως εξής.

Ταχύτητα κινητήρα (r/min) = γωνία βήματος ÷ 360° × συχνότητα (Hz) × 60

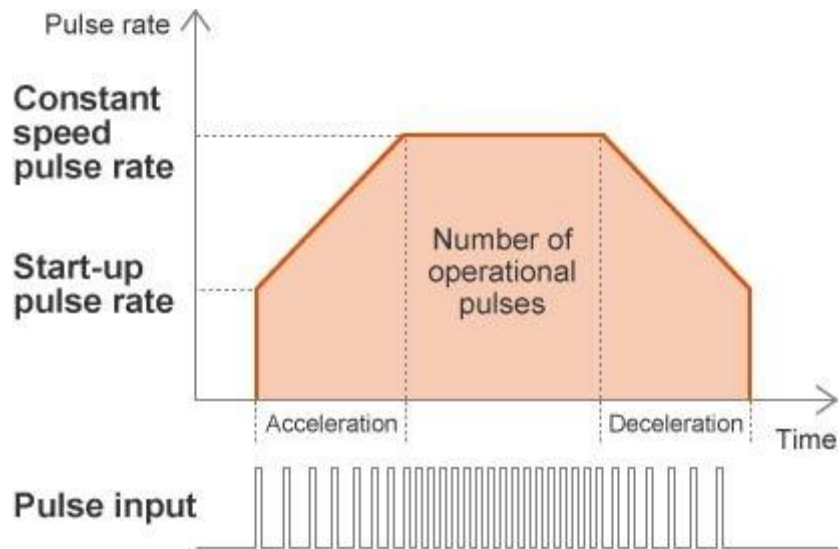
Αυτό το χαρακτηριστικό της περιστροφής του κινητήρα που είναι τέλεια συγχρονισμένος με τον ρυθμό παλμού είναι αυτό που κάνει τους βηματικούς κινητήρες ελκυστικούς. Από την άλλη πλευρά, η απώλεια συγχρονισμού μεταξύ των παλμών εισόδου και της περιστροφής του κινητήρα μπορεί να συμβεί λόγω υπερφόρτωσης ή ξαφνικών αλλαγών στην ταχύτητα.

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας για βηματικούς κινητήρες, που ονομάζονται προφίλ κίνησης σταθερής ταχύτητας και προφίλ κίνησης επιτάχυνσης/επιβράδυνσης. Το πρώτο αλλάζει αμέσως την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Ονομάζεται επίσης προφίλ ορθογώνιας κίνησης, αυτός ο τρόπος λειτουργίας περιορίζεται στο εύρος λειτουργίας εντός του οποίου ο κινητήρας μπορεί να αυτοεκκινηθεί (να ανεβάσει ταχύτητα αμέσως). Εάν είναι διαθέσιμη επαρκής ροπή για αυτήν την επιτάχυνση, αυτή η λειτουργία είναι πολύ απλή με σταθερό ρυθμό παλμών.



Διάγραμμα 2-2 Προφίλ κίνησης σταθερής ταχύτητας
(ορθογώνιο προφίλ κίνησης) (<https://us.aspina-group.com/en/learning-zone/columns/what-is/003/>)

Εάν, ωστόσο, δεν μπορεί να δημιουργηθεί επαρκής ροπή επιτάχυνσης, το αποτέλεσμα είναι απώλεια συγχρονισμού. Σε αυτήν την περίπτωση, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα προφίλ κίνησης επιτάχυνσης/επιβράδυνσης. Αυτό περιλαμβάνει τη σταδιακή αλλαγή του παλμού για να παρέχει χρόνο για επιτάχυνση και επιβράδυνση. Ονομάζεται επίσης τραπεζοειδές προφίλ κίνησης, αυτή η λειτουργία επεκτείνει το εύρος λειτουργίας πέρα από το οποίο ο κινητήρας μπορεί να αυτοεκκινηθεί. Ωστόσο, επειδή με την ξαφνική επιτάχυνση ή επιβράδυνση κινδυνεύει να χάσει τον συγχρονισμό, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα κατά τον καθορισμό του τρόπου αλλαγής της ταχύτητας του κινητήρα (ρυθμός παλμού) προς τα πάνω και προς τα κάτω.



Διάγραμμα 2-3 Προφίλ κίνησης επιτάχυνσης/επιβράδυνσης (τραπεζοειδές προφίλ κίνησης) (<https://us.aspina-group.com/en/learning-zone/columns/what-is/003/>)

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 -ΕΙΔΗ ΒΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ^{[5][6][7][11][12][13]}

3.1 Τύποι και Κατασκευή Βηματικού κινητήρα

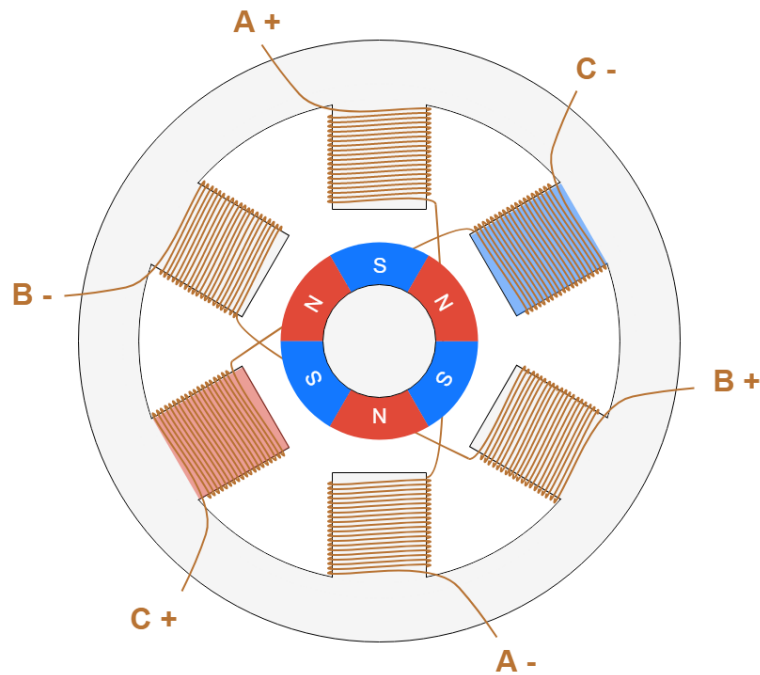
Η απόδοση ενός βηματικού κινητήρα - τόσο από την άποψη της ανάλυσης (ή του μεγέθους του βήματος), της ταχύτητας και της ροπής-επηρεάζεται από τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες, οι οποίες ταυτόχρονα μπορεί επίσης να επηρεάσουν τον τρόπο ελέγχου του κινητήρα. Στην πραγματικότητα, δεν έχουν όλοι οι βηματικοί κινητήρες την ίδια εσωτερική δομή (ή κατασκευή), καθώς υπάρχουν διαφορετικές διαμορφώσεις ρότορα και στάτη.

3.2 Ρότορας

Για έναν βηματικό κινητήρα, υπάρχουν βασικά τρεις τύποι ρότορα:

3.2.1 Ρότορας μόνιμου μαγνήτη

Ο ρότορας είναι ένας μόνιμος μαγνήτης που ευθυγραμμίζεται με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το κύκλωμα του στάτορα. Αυτή η λύση εγγυάται καλή ροπή και επίσης συγκρατημένη ροπή. Αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας θα αντισταθεί, ακόμη και αν όχι πολύ ισχυρά, σε αλλαγή θέσης ανεξάρτητα από το εάν ένα πηνίο είναι ενεργοποιημένο. Τα μειονεκτήματα αυτής της λύσης είναι ότι έχει χαμηλότερη ταχύτητα και χαμηλότερη ανάλυση σε σύγκριση με τους άλλους τύπους. Το Σχήμα 3-1 δείχνει μια αναπαράσταση ενός τμήματος ενός βηματικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη.



Σχήμα 3-1 Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη
 (<https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>)

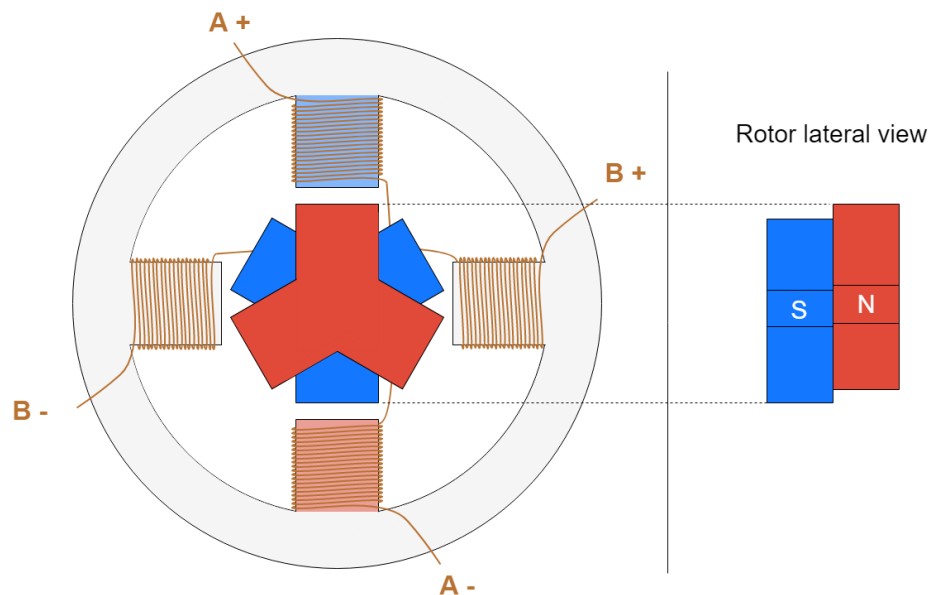
3.2.2 Ρότορας μεταβλητής απροθυμίας

Ο ρότορας είναι κατασκευασμένος από πυρήνα σιδήρου και έχει ένα συγκεκριμένο σχήμα που του επιτρέπει να ευθυγραμμίζεται με το μαγνητικό πεδίο (βλ. Σχήμα 3-1). Με αυτή τη λύση είναι ευκολότερο να φτάσετε σε υψηλότερη ταχύτητα και ανάλυση, αλλά η ροπή που αναπτύσσει είναι συχνά χαμηλότερη και δεν έχει περιοριστική ροπή.

3.2.3 Υβριδικός ρότορας

Αυτό το είδος ρότορα έχει συγκεκριμένη κατασκευή και είναι ένα υβρίδιο μεταξύ εκδόσεων μόνιμου μαγνήτη και μεταβλητής απροθυμίας. Ο ρότορας έχει δύο πώματα με εναλλασσόμενα δόντια και μαγνητίζεται αξονικά. Αυτή η διαμόρφωση επιτρέπει στον κινητήρα να έχει τα πλεονεκτήματα τόσο της έκδοσης μόνιμου μαγνήτη όσο και της έκδοσης μεταβλητής απροθυμίας, ειδικά υψηλής ανάλυσης, ταχύτητας και ροπής. Αυτή η υψηλότερη απόδοση απαιτεί μια πιο σύνθετη κατασκευή και επομένως

υψηλότερο κόστος. Το Σχήμα 3-2 δείχνει ένα απλοποιημένο παράδειγμα της δομής αυτού του κινητήρα. Όταν το πηνίο A ενεργοποιείται, ένα δόντι του μαγνητισμένου καλύμματος N ευθυγραμμίζεται με το δόντι που έχει μαγνητιστεί με S του στάτορα. Ταυτόχρονα, λόγω της δομής του ρότορα, το δόντι που έχει μαγνητιστεί με S ευθυγραμμίζεται με το μαγνητισμένο με N δόντι του στάτορα. Οι πραγματικοί κινητήρες έχουν πιο σύνθετη δομή, με μεγαλύτερο αριθμό δοντιών από αυτόν που φαίνεται στο Σχήμα 3-2, αν και η αρχή λειτουργίας του βηματικού κινητήρα είναι η ίδια. Ο μεγάλος αριθμός δοντιών επιτρέπει στον κινητήρα να επιτύχει μικρό μέγεθος βήματος, έως και $0,9^\circ$.

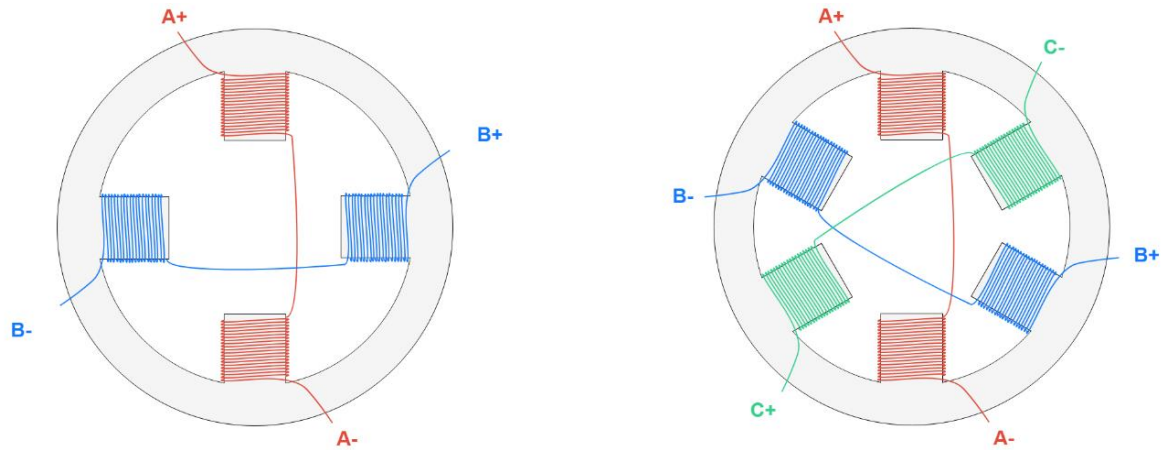


Σχήμα 3-2 Υβριδικός βηματικός κινητήρας
(<https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>)

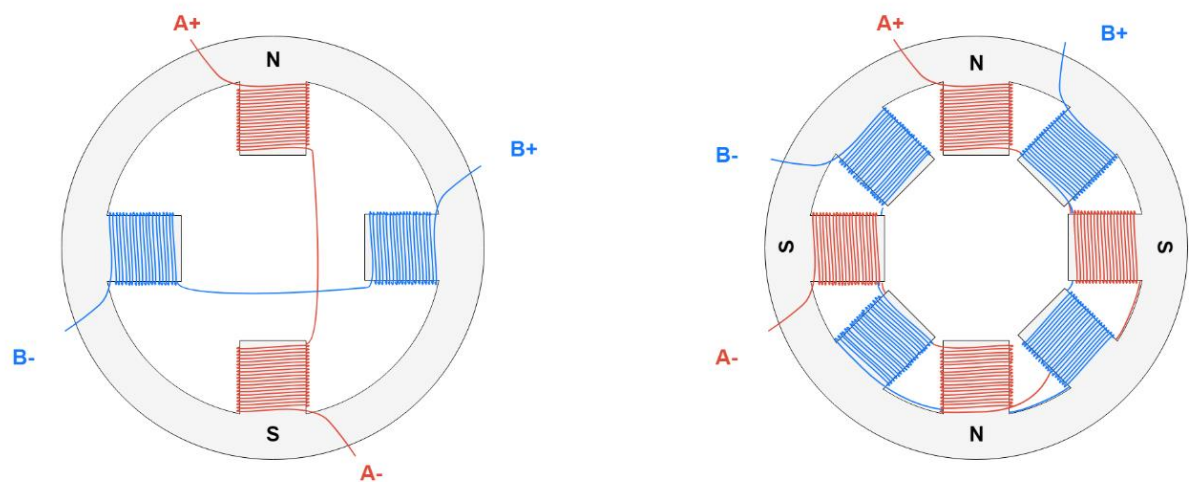
3.3 Στάτης

Ο στάτορας είναι το τμήμα του κινητήρα που είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου με το οποίο ο ρότορας πρόκειται να ευθυγραμμιστεί. Τα κύρια χαρακτηριστικά του κυκλώματος του στάτορα περιλαμβάνουν τον αριθμό των φάσεων και των ζευγών πόλων του, καθώς και τη διαμόρφωση των καλωδίων. Ο αριθμός των φάσεων είναι ο αριθμός των ανεξάρτητων πηνίων, ενώ ο αριθμός των ζευγών πόλων δείχνει πώς καταλαμβάνονται τα κύρια ζεύγη δοντιών από κάθε

φάση. Οι διφασικοί βηματικοί κινητήρες είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι, ενώ οι τριφασικοί και οι πενταφασικοί κινητήρες είναι λιγότερο συνηθισμένοι (βλ. Σχήμα 3-3 και Σχήμα 3-4).



Σχήμα 3-3 Περιέλιξη στάτορα δύο φάσεων (αριστερά), τριφασική περιέλιξη στάτορα (δεξιά)



Σχήμα 3-4 Στάτης δύο φάσεων, μονοπολικού ζεύγους (αριστερά) και δύο φάσεων, ζεύγους στάτορα (δεξιά). Τα γράμματα δείχνουν το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται όταν εφαρμόζεται θετική τάση μεταξύ A+ και A-
 .(<https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>)

Η κατασκευή του στάτη σε όλα τα είδη των βηματικών κινητήρων είναι κοινή. Ο στάτης αποτελείται από μια συστοιχία ατσάλινων ελασμάτων (συνήθως κράμα χάλυβα με πυρίτιο) με προεξέχοντα τμήματα στα οποία είναι ισομερώς κατανεμημένα τα πεδία των πόλων, συνήθως δύο,

τριών ή τεσσάρων ζευγών πόλων. Σε κάθε ζεύγος ο ένας πόλος δρα σαν βόρειος και το άλλο σαν νότιος πόλος.

3.4 Ο αριθμός πόλων και η σημασία του

Με απλά λόγια, ένας πόλος είναι ένα μαγνητικό πεδίο δύναμης Βορρά ή Νότου που παράγεται από έναν μόνιμο μαγνήτη ή από ρεύμα που διέρχεται από ένα πηνίο. Ωστόσο, για τους βηματικούς κινητήρες, αυτός ο ορισμός δεν μεταφράζεται απαραίτητα σε έναν απλό ορισμό του αριθμού πόλων. Διαφορετικοί κατασκευαστές χρησιμοποιούν διαφορετικά ονόματα για να αναφερθούν στους πόλους τους και διάφοροι τύποι βηματικών κινητήρων έχουν διαφορετικά είδη και αριθμούς πόλων.

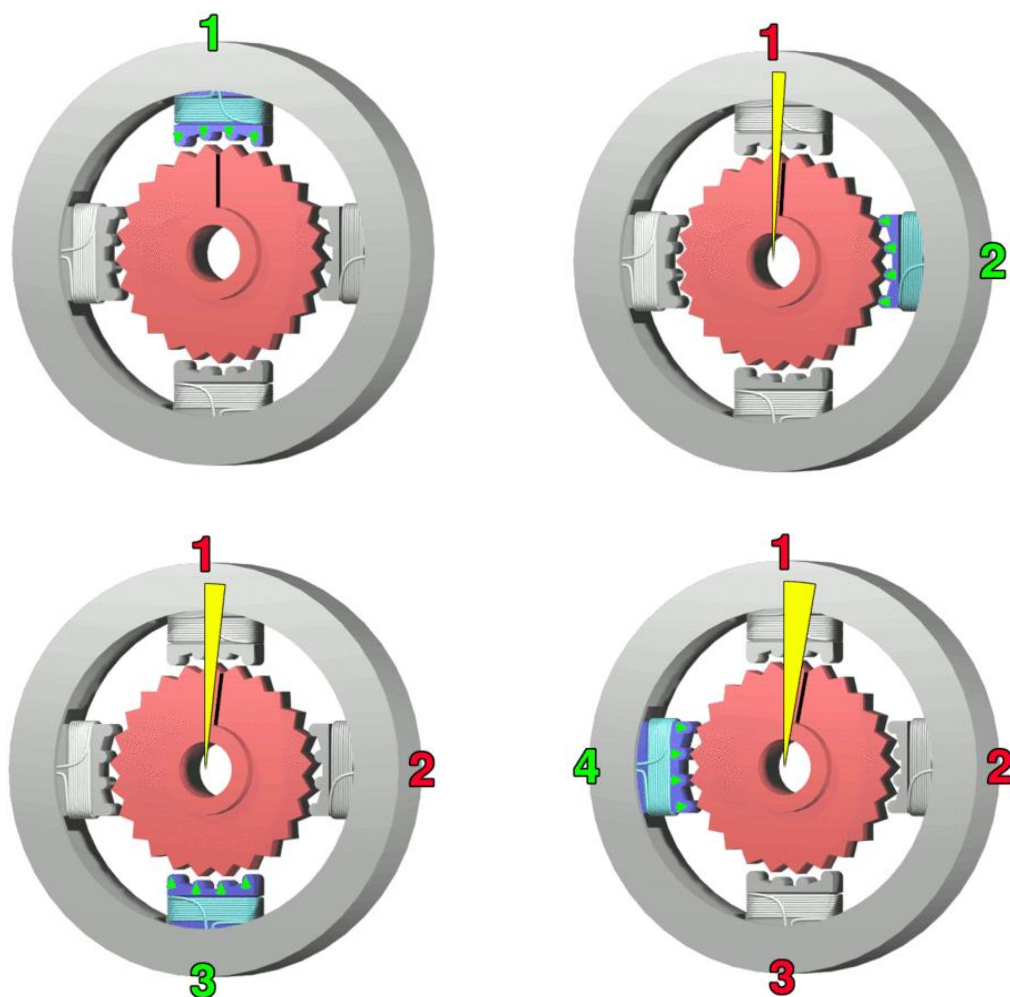
Οι βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη είναι οι απλούστεροι. Οι κατασκευαστές καθορίζουν τον αριθμό πόλων τους με τον αριθμό των ζευγών πόλων ή των περιελίξεων στάτη. Η αύξηση του αριθμού των ζευγών πόλων στον ίδιο τον ρότορα (ή την προσθήκη περισσότερων φάσεων στάτη) αυξάνει την ανάλυση. Τα περισσότερα σκαλοπάτια μόνιμου μαγνήτη έχουν ανάλυση 30° έως 3° ανά βήμα.

Οι κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης και οι υβριδικοί, έχουν δόντια στους ρότορες τους και οι στάτες καθορίζουν τον αριθμό πόλων. Αυτοί οι τύποι βηματικών κινητήρων κινούνται $1,8^\circ$ ή λιγότερο ανά βήμα.

Για τον κινητήρα μεταβλητής απροθυμίας, όσο περισσότερα δόντια, τόσο μεγαλύτερος αριθμός πόλων, τόσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση. Η γωνία του βήματος περιστροφής είναι μισή από εκείνη ενός βηματικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη με τον ίδιο αριθμό περιελίξεων στάτορα.

Αντίθετα, οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες έχουν ρότορες που καλύπτονται από δύο ακτινικά τμήματα (κύπελλα) μαγνητισμένων δοντιών, με κενό μεταξύ τους. Τα δύο ποτήρια έχουν δόντια που αντισταθμίζονται από το ένα δόντι σε σχέση με το άλλο. Και εδώ, όσο μεγαλύτερος αριθμός δοντιών, τόσο μεγαλύτερος αριθμός πόλων, τόσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση και τόσο μικρότερα τα βήματα. Αυτό

σημαίνει ότι μπορεί να περιστρέψει μια πολύ μικρή ποσότητα λόγω του αριθμού πόλων του.



Σχήμα 3-5 Κίνηση ρότορα ενός απλοποιημένου βηματικού κινητήρα (μονοπολικό)

Πλαίσιο 1: Ο επάνω ηλεκτρομαγνήτης (1) είναι ενεργοποιημένος, προσελκύνοντας τα πλησιέστερα δόντια του σιδερένιου ρότορα σε σχήμα γριναζιού. Με τα δόντια ευθυγραμμισμένα με τον ηλεκτρομαγνήτη 1, θα είναι ελαφρώς μετατοπισμένα από τον δεξιό ηλεκτρομαγνήτη (2).

Πλαίσιο 2: Ο επάνω ηλεκτρομαγνήτης (1) απενεργοποιείται και ο δεξιός ηλεκτρομαγνήτης (2) ενεργοποιείται, τραβώντας τα δόντια σε ευθυγράμμιση με αυτόν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια περιστροφή $3,6^\circ$ σε αυτό το παράδειγμα.

Πλαίσιο 3: Ο κάτω ηλεκτρομαγνήτης (3) ενεργοποιείται. εμφανίζεται μια άλλη περιστροφή $3,6^\circ$.

Πλαίσιο 4: Ο αριστερός ηλεκτρομαγνήτης (4) ενεργοποιείται, περιστρέφοντας ξανά κατά $3,6^\circ$. Όταν ο επάνω ηλεκτρομαγνήτης (1) ενεργοποιηθεί ξανά, ο ρότορας θα έχει περιστραφεί κατά μία θέση

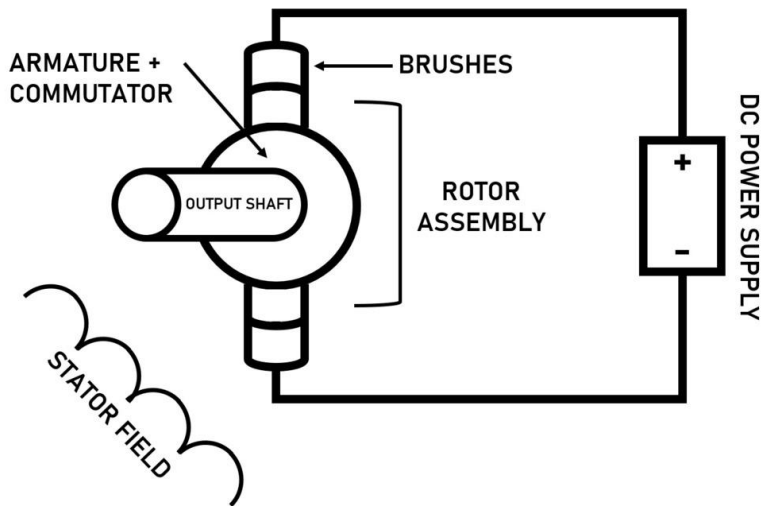
δοντιού. Εφόσον υπάρχουν 25 δόντια, θα χρειαστούν 100 βήματα για να γίνει μια πλήρης περιστροφή σε αυτό το παράδειγμα. (<https://www.amci.com/industrial-automation-resources/plc-automation-tutorials/stepper-vs-servo/>)

Όσο περισσότεροι είναι οι πόλοι, τόσο ακριβέστερα μια μονάδα δίσκου μπορεί να ελέγξει την έξοδο ενός βηματικού κινητήρα. Πέρα από αυτό το απλό γεγονός, οι κατασκευαστές προσφέρουν ποικίλες ρυθμίσεις και αριθμό πόλων και δοντιών στάτη. Οι σχεδιαστές πρέπει να λάβουν υπόψη την απαιτούμενη ακρίβεια, τον αριθμό πόλων και δοντιών της εφαρμογής, την ταχύτητα σχεδίασης, τη ροπή, την επιτάχυνση και άλλες παραμέτρους. Επειδή ο αριθμός πόλων επηρεάζει επίσης τη ροπή, μπορεί να οδηγήσει και σε αποφάσεις σχεδιασμού που σχετίζονται με την αντιστοίχιση αδράνειας. Επειδή η γωνία του βήματος επηρεάζει τις δονήσεις και το θόρυβο του κινητήρα, οι σχεδιαστές θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και αυτά τα χαρακτηριστικά του κινητήρα κατά τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τον αριθμό πόλων.

3.5 Διαφορές βηματικού κινητήρα και κινητήρα ΣΡ

3.5.1 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος

Ενώ και τα δύο είδη κινητήρων λειτουργούν με συνεχές ρεύματος, η δομή και η αρχή λειτουργία τους είναι διαφορετικές. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, όπως υποδηλώνει το όνομά τους, χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα (όπως από μπαταρίες ή άλλες μη εναλλασσόμενες παροχές) για να δημιουργήσουν περιστροφή εξόδου. Αυτή η κατηγορία κινητήρων χωρίζεται σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες και κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες. Ο κοινός κινητήρας συνεχούς ρεύματος έχει ισοδύναμο κύκλωμα που φαίνεται στο **Σχήμα 3-6** και δείχνει πώς συνδέονται τα βασικά εξαρτήματα μεταξύ τους:



Σχήμα 3-6 Βασικό κύκλωμα για κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρα (<https://www.linquip.com/blog/series-wound-dc-motor/>)

Όπως φαίνεται παραπάνω, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος τροφοδοτούνται από ένα τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος συνδεδεμένο στο συγκρότημα του ρότορα μέσω ψηκτρών άνθρακα. Αυτός ο ρότορας βρίσκεται μέσα σε έναν στάτορα ή σε ένα σταθερό περίβλημα που περιέχει ένα μόνιμο μαγνητικό πεδίο, που δημιουργείται είτε από ένα μαγνητικό μέταλλο είτε από κάποιο είδος ηλεκτρομαγνήτη (που φαίνεται στο Σχήμα 3-6 ως το πηνίο με την ένδειξη «πεδίο στάτορα»). Το συγκρότημα του ρότορα περιέχει τον οπλισμό που είναι ένα συρμάτινο πηνίο μονωμένο από μεταλλικά ελάσματα, καθώς και τον άξονα εξόδου. Οι δακτύλιοι του μεταγωγέα συνδέονται με τα άκρα ακροδεκτών του πηνίου οπλισμού, αλλά δεν αγγίζουν απευθείας τις ψήκτρες ή τον άξονα εξόδου όταν ο κινητήρας είναι απενεργοποιημένος. Οι ψήκτρες συμπιέζουν τους δακτυλίους του μεταγωγέα μεταξύ τους όταν τίθεται σε λειτουργία ο κινητήρας, επιτρέποντας έτσι την παροχή συνεχούς ρεύματος μέσω των ψηκτρών, μέσω των δακτυλίων του μεταγωγέα και στην περιέλιξη του οπλισμού. Όταν το ρεύμα διέρχεται από τον οπλισμό, παράγεται ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο αντιτίθεται στο πεδίο του στάτορα. Το συγκρότημα ρότορα, επομένως, περιστρέφεται λόγω αυτής της αντίθεσης και

αναγκάζει τον κινητήρα να παράγει χρήσιμη μηχανική ενέργεια και ροπή.

Αυτοί οι κινητήρες υπάρχουν από τη δεκαετία του 1830 και έτσι έχουν χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες εφαρμογές. Είναι σχετικά φθηνοί τόσο για αγορά όσο και για εγκατάσταση, είναι αξιόπιστοι και ελεγχόμενοι και διατίθενται σε εκατοντάδες μεγέθη. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε ηλεκτρικά εργαλεία, συσκευές κουζίνας, smartphone, υπολογιστές και πολλά άλλα.

3.5.2 Βηματικοί κινητήρες

Οι βηματικοί κινητήρες, ενώ εξακολουθούν να τροφοδοτούνται από συνεχές ρεύμα, δεν χρησιμοποιούν τις ψήκτρες και τους μηχανικούς μεταγωγείς που υπάρχουν στους τυπικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Αντίθετα, είναι ένας τύπος κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες όπου ο στάτορας τους περιέχει πολλές ομοιόμορφα καταναμημένες περιελίξεις που λειτουργούν ως μαγνητικοί πόλοι όταν τροφοδοτούνται και ο ρότορας τους αποτελείται από ζεύγη μόνιμων μαγνητών σε σχήμα γριναζιού. Ένας ηλεκτρονικός ελεγκτής κινητήρα αλλάζει το ρεύμα σε κάθε διαδοχικό πηνίο στάτορα για να οδηγήσει μαγνητικά τον ρότορα από τον έναν πόλο στον άλλο. Ο λόγος που αυτοί οι κινητήρες είναι γνωστοί ως κινητήρες βηματικοί είναι επειδή οι χειριστές μπορούν να ελέγχουν σε ποιον πόλο πηδά ο ρότορας, επιτρέποντας ουσιαστικά ακριβείς, σταδιακές περιστροφικές κινήσεις. Δεδομένου ότι υπάρχουν συνήθως 40+ πόλοι σε έναν βηματικό κινητήρα, μπορούν να προσεγγίσουν τη συνεχή κίνηση με πολύ μικρές αυξήσεις περιστροφής (360 μοίρες περιστροφής διαιρούμενες με 40 πόλους = 9 μοίρες περιστροφής ανά πόλο). Επειδή ο ρότορας μετακινείται από τον έναν πόλο στον επόμενο, η θέση ενός βηματικού κινητήρα μπορεί να προσδιοριστεί ανά πάσα στιγμή, χωρίς να χρειάζεται διόρθωση. Αν και δεν είναι πραγματικά συνεχείς κινητήρες, οι βηματικοί κινητήρες προσφέρουν ακριβή τοποθέτηση όταν συνδυάζονται με βηματικό ελεγκτή.

Οι βηματικοί κινητήρες μπορούν επίσης να παρέχουν ροπή συγκράτησης (θετική τιμή ροπής σε μηδενική ταχύτητα), η οποία είναι ιδανική για ρομποτική και άλλες εφαρμογές εντοπισμού θέσης. Αυτά τα μηχανήματα, ενώ γενικά είναι λιγότερο αποδοτικά από έναν κοινό κινητήρα συνεχούς ρεύματος, παρέχουν εξαιρετική επαναλαμβανόμενη κίνηση που είναι ταυτόχρονα αναστρέψιμη και εξαιρετικά ελεγχόμενη. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε σκληρούς δίσκους, συστήματα ελέγχου, εκτυπωτές, στρατιωτικό εξοπλισμό και άλλα.

3.5.3 Σύγκριση κινητήρων συνεχούς ρεύματος και βηματικών κινητήρων

Τόσο οι βηματικοί κινητήρες όσο και οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος λειτουργούν σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας, επομένως οι διαφορές τους μπορεί να προκαλέσουν σύγχυση στην κατανόηση. Αυτό το άρθρο συγκρίνει ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά κινητήρα μεταξύ αυτών των δύο σχεδίων, που φαίνονται παρακάτω στον Πίνακα 1. Στη συνέχεια θα ακολουθήσει μια σύντομη εξήγηση για κάθε χαρακτηριστικό, η οποία θα τονίσει το πλεονέκτημα ενός κινητήρα έναντι του άλλου από κάθε άποψη.

Πίνακας 3-1 Σύγκριση βουρτσισμένων κινητήρων έναντι βηματικών κινητήρων.

Χαρακτηριστικά	Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες	Βηματικός Κινητήρας
Χαρακτηριστικά ελέγχου	Απλός; δεν χρειάζονται έξτρα	Απλός; απαιτείται μικροελεγκτής
Εύρος Ταχύτητας	Μέτρια (εξαρτάται από τον τύπο)	Χαμηλό (200-2000 σ.α.λ.)
Αξιοπιστία	Μέτριος	Υψηλός
Αποδοτικότητα	Μέση τιμή	Χαμηλός
Χαρακτηριστικά ροπής/ταχύτητας	Υψηλή ροπή σε χαμηλές στροφές	Μέγιστη ροπή σε χαμηλές στροφές
Κόστος	Χαμηλός	Χαμηλός

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες κερδίζουν τους βηματικούς κινητήρες όσον αφορά τη δυνατότητα ελέγχου. Αν και είναι εύκολος ο έλεγχος και των δύο μηχανών, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος απαιτούν απλώς μια τάση εισόδου στους δύο ακροδέκτες

τους. Η ρύθμιση της τάσης εισόδου θα αλλάξει την ταχύτητα του κινητήρα και η αντιστροφή των καλωδίων θα προκαλέσει τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος να αντιστρέψει τις κατευθύνσεις. Οι βηματικοί κινητήρες είναι επίσης πολύ εύκολοι στη χρήση, αλλά απαιτούν κάποια μορφή μικροελεγκτή για να βοηθήσει στο συγχρονισμό του ρότορά τους από τον έναν πόλο στον άλλο.

Το εύρος στροφών των βηματικών κινητήρων είναι συνήθως κάτω από 2000 RPM, καθώς η ροπή τους μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα. Επίσης, δεν προορίζονται για συνεχή χρήση, καθώς οι βηματικοί κινητήρες τείνουν να λειτουργούν ζεστοί όταν τροφοδοτούνται για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος διατίθενται σε διάφορες μορφές, προσφέροντας ως αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερο εύρος στροφών. Μπορούν επίσης να λειτουργούν συνεχώς χωρίς πολλά προβλήματα, αν και πρέπει να γίνεται συνεχής συντήρηση της βούρτσας σε αυτούς τους κινητήρες για να γίνει αυτό.

Τόσο ο βηματικός κινητήρας όσο και ο κοινός κινητήρας συνεχούς ρεύματος είναι αξιόπιστοι, με προειδοποιήσεις. Όταν οι βηματικοί κινητήρες δεν λειτουργούν συνεχώς, μπορούν εύκολα να φτάσουν τις 10.000 ώρες ωφέλιμης ζωής ή σχεδόν τα 5 χρόνια χρήσης. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος μπορούν επίσης να λειτουργήσουν τόσο πολύ ανάλογα με τον επιλεγμένο τύπο, αλλά απαιτούν συνεχή συντήρηση για την αποφυγή αστοχίας.

Δεδομένου ότι οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι μια ώριμη τεχνολογία, η απόδοσή τους έχει βελτιστοποιηθεί σε περίπου 85%, κάτι που είναι αρκετά καλό για έναν τόσο απλό κινητήρα. Οι βηματικοί κινητήρες καταναλώνουν ρεύμα στο μέγιστο φορτίο κάθε φορά που ενεργοποιούνται οι πόλοι του στάτη, μειώνοντας την ενεργειακή απόδοση και αυξάνοντας τις απώλειες λόγω θερμότητας. Επομένως, οι βηματικοί κινητήρες δεν είναι οι καλύτεροι κινητήρες εάν η απόδοση είναι ανησυχητική.

Οι βηματικοί κινητήρες παρέχουν τη μέγιστη ροπή τους σε χαμηλές ταχύτητες, γεγονός που τους καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμους σε υψηλή

ακρίβεια, συγκρατώντας εφαρμογές όπως η ρομποτική και οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές. Μερικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράγουν επίσης υψηλές ροπές σε χαμηλές ταχύτητες, αλλά είναι πιο κατάλληλοι για συνεχείς χρήσεις, καθώς η ροπή τους είναι σταθερή στο εύρος στροφών τους. Η κύρια διαφορά είναι ότι, ενώ οι βηματικοί κινητήρες μπορούν να πιέσουν περισσότερο από την ηρεμία, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος τείνουν να έχουν πιο παρατεταμένη απόδοση.

Τέλος, και οι δύο αυτοί τύποι κινητήρων είναι φθηνοί, επομένως η τιμή αγοράς δεν προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος και οι βηματικοί κινητήρες είναι χρήσιμοι για εφαρμογές όπου η τιμή πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, καθώς μπορούν να αγοραστούν για κάτω από \$100 και μερικές φορές ακόμη και κάτω από \$10. Κάνουν μια λογική δουλειά στα περισσότερα εύρη τιμών και είναι μια φθηνότερη εναλλακτική σε σχέση με πιο ακριβούς κινητήρες όπως κινητήρες χωρίς ψήκτρες, κινητήρες επαγωγής κ.λπ.

Από αυτή τη σύγκριση, είναι σαφές ότι και οι δύο κινητήρες εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς. Αν και είναι και οι δύο φθηνοί και εύκολα ελεγχόμενοι, οι βηματικοί κινητήρες προσφέρουν το μεγαλύτερο μέρος του οφέλους τους όταν χρησιμοποιούνται ως μηχανή ακριβείας. Βρίσκονται συχνά χρησιμοποιούμενα σε τρισδιάστατους εκτυπωτές, μηχανές CNC, μηχανήματα ιατρικών εικόνων, εκτυπωτές, κάμερες ασφαλείας και άλλες επακριβώς ελεγχόμενες εφαρμογές. Εν ολίγοις, παρέχουν τον έλεγχο ως πλεονέκτημα έναντι της παραγωγής μηχανικής ενέργειας και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται εάν η ακρίβεια είναι πρωταρχικό μέλημα.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, ενώ συχνά επισκιάζονται από τον νεότερο κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες λόγω των βελτιωμένων χαρακτηριστικών λειτουργίας τους, εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται καλύτερα σε εφαρμογές που απαιτούν σταθερή ροπή σε όλο το εύρος στροφών του κινητήρα. Αυτές οι χρήσεις περιλαμβάνουν δονητές τηλεφώνου, ηλεκτρικά εργαλεία, παράθυρα αυτοκινήτου, γερανούς, μεταφορείς και πολλές άλλες εφαρμογές που

δίνουν προτεραιότητα τόσο στη σταθερή ισχύ εξόδου όσο και στην τιμή. Αν και δεν είναι τόσο ακριβείς όσο οι βηματικοί κινητήρες, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι ένα δοκιμασμένο και αληθινό δυναμικό της βιομηχανίας με τόσο τη δύναμη όσο και την αντοχή για να εξακολουθεί να ανταγωνίζεται τους σύγχρονους κινητήρες.

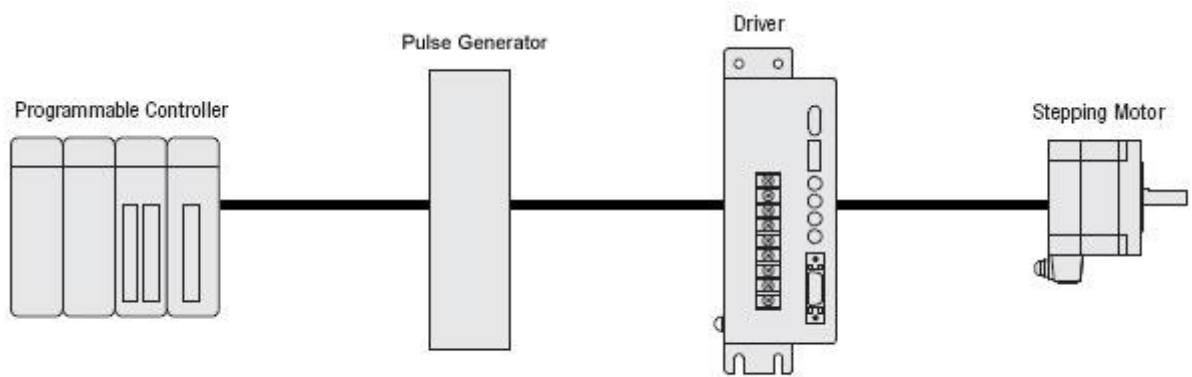
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΒΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ^{[8][9][11][12][13]}

4.1 Κατηγορίες οδηγών βηματικού κινητήρα

Υπάρχουν προγράμματα οδήγησης που λειτουργούν σε λειτουργία εισόδου παλμού και λειτουργία ενσωματωμένου ελεγκτή.

4.1.1 Οδηγοί παλμού εισόδου

Ο βηματικός κινητήρας μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας μια γεννήτρια παλμών που παρέχεται από τον χρήστη. Τα δεδομένα λειτουργίας εισάγονται εκ των προτέρων στη γεννήτρια παλμών. Στη συνέχεια, ο χρήστης επιλέγει τα δεδομένα λειτουργίας στον προγραμματιζόμενο ελεγκτή κεντρικού υπολογιστή και κατόπιν εισάγει την εντολή λειτουργίας.

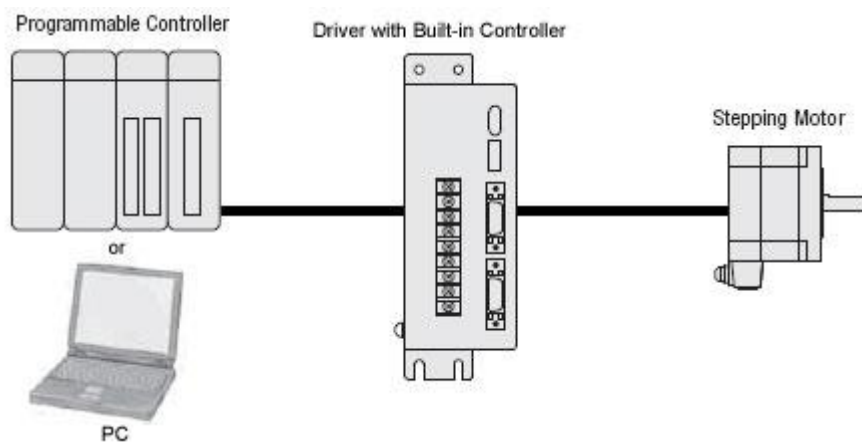


Σχήμα 4-1 Οδηγός παλμού εισόδου
(<https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/2-phase-bipolar-drivers.html>)

4.1.2 Προγράμματα οδήγησης με ενσωματωμένο ελεγκτή (αποθηκευμένα δεδομένα ή αποθηκευμένο πρόγραμμα).

Η ενσωματωμένη λειτουργία δημιουργίας παλμών επιτρέπει στον κινητήρα να κινείται μέσω απευθείας συνδεδεμένου προσωπικού υπολογιστή ή προγραμματιζόμενου ελεγκτή. Δεδομένου ότι δεν

απαιτείται ξεχωριστή γεννήτρια παλμών, οι οδηγοί αυτού του τύπου εξοικονομούν χώρο και απλοποιούν την καλωδίωση.



Σχήμα 4-2 Οδηγός με ενσωματωμένο ελεγκτή
(<https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/2-phase-bipolar-drivers.html>)

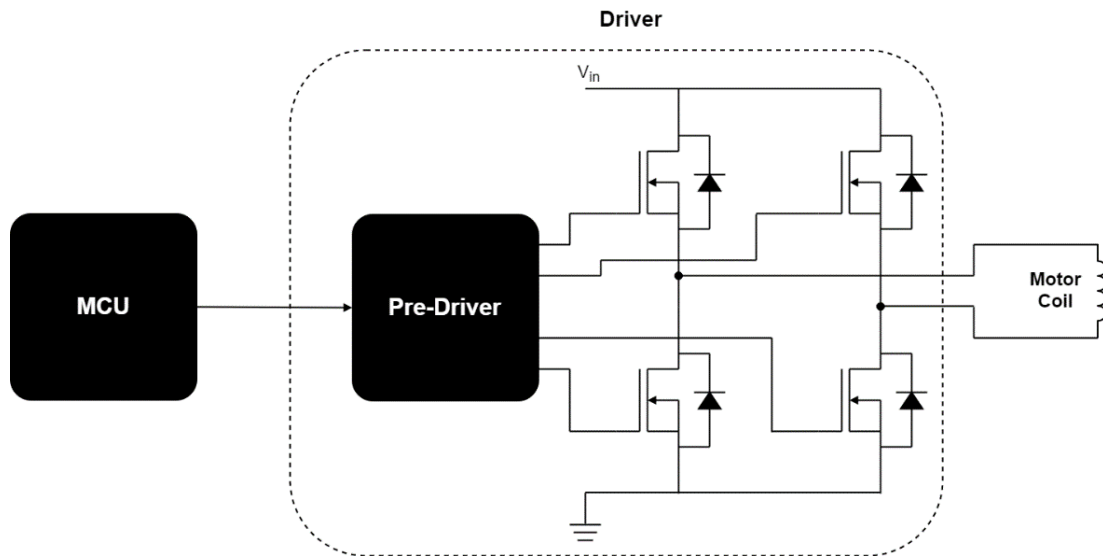
4.2 Αρχή λειτουργίας οδηγού βηματικού κινητήρα

Η αρχή λειτουργίας αυτού του κυκλώματος οδήγησης είναι να ελέγχει τη λειτουργία ενός βηματικού κινητήρα στέλνοντας ρεύμα σε παλμούς προς την κατεύθυνση του κινητήρα. Οι σχεδιαστές δεν χρησιμοποιούσαν συχνά την τεχνική κυματικής οδήγησης για λόγους όπως ότι παρέχει μικρή ροπή και είναι αναποτελεσματική επειδή απλά 1-φάση του κινητήρα χρησιμοποιείται κάθε φορά.

Τα βασικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για την κίνηση του βηματικού κινητήρα είναι ελεγκτές όπως ένας μικροεπεξεργαστής/μικροελεγκτής, ένα IC οδηγού και ένα PSU (μονάδα τροφοδοσίας) και άλλα εξαρτήματα όπως διακόπτες, ποτενσιόμετρα, ψύκτρα και καλώδια σύνδεσης.

4.2.1 Ελεγκτής

Το Σχήμα 4-3 δείχνει μια απλή αναπαράσταση ενός σχήματος ελέγχου βηματικού κινητήρα. Ο προ-οδηγός και η γέφυρα τρανζίστορ μπορεί να περιέχονται σε μια ενιαία συσκευή, που ονομάζεται **οδηγός**.



Σχήμα 4-3 Βασικό διάγραμμα ελέγχου κινητήρα
<https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>

4.3 Τύποι οδηγών βηματικού κινητήρα

4.3.1 Με βάση τον τρόπο οδήγησης

Υπάρχουν διαφορετικοί οδηγοί βηματικού κινητήρα που διατίθενται στην αγορά, οι οποίοι παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά για συγκεκριμένες εφαρμογές. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν τη διεπαφή εισόδου. Οι πιο συνηθισμένες επιλογές είναι:

- Βήμα/Κατεύθυνση– Στέλνοντας έναν παλμό στον πείρο βήματος, ο οδηγός αλλάζει την έξοδο του έτσι ώστε ο κινητήρας να εκτελέσει ένα βήμα, η κατεύθυνση του οποίου καθορίζεται από το επίπεδο στον πείρο κατεύθυνσης.
- Phase/Enable– Κάθε φάση περιέλιξης στάτορα, καθορίζει την τρέχουσα κατεύθυνση και ενεργοποιεί το Enable εάν η φάση είναι ενεργοποιημένη.
- PWM – Ελέγχει άμεσα τα σήματα πύλης των FET χαμηλής και υψηλής πλευράς και παράγει παλμούς οδήγησης

4.3.2 Με βάση τον έλεγχο τάσης ή ρευματος

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός οδηγού βηματικού κινητήρα είναι εάν μπορεί να ελέγχει μόνο την τάση στην περιέλιξη ή επίσης το ρεύμα που ρέει μέσα από αυτό:

- Με τον έλεγχο τάσης, ο οδηγός ρυθμίζει μόνο την τάση στην περιέλιξη. Η ροπή που αναπτύσσεται και η ταχύτητα με την οποία εκτελούνται τα βήματα εξαρτώνται μόνο από τα χαρακτηριστικά του κινητήρα και του φορτίου.
- Οι οδηγοί ελέγχου ρεύματος είναι πιο προηγμένοι, καθώς ρυθμίζουν το ρεύμα που διαρρέει το ενεργό πηνίο για να έχουν καλύτερο έλεγχο της παραγόμενης ροπής και επομένως της δυναμικής συμπεριφοράς ολόκληρου του συστήματος.

4.3.3 Με βάση το είδος του βηματικού κινητήρα (Μονοπολικοί/Διπολικοί κινητήρες)

Ένα άλλο χαρακτηριστικό του κινητήρα που επηρεάζει επίσης τον έλεγχο είναι η διάταξη των πηνίων του στάτορα που καθορίζουν πώς αλλάζει η κατεύθυνση του ρεύματος. Για να επιτευχθεί η κίνηση του ρότορα, είναι απαραίτητο όχι μόνο να ενεργοποιηθούν τα πηνία, αλλά και να ελέγχεται η κατεύθυνση του ρεύματος, η οποία καθορίζει την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από το ίδιο το πηνίο (βλ. Σχήμα 4-4). Στους βηματικούς κινητήρες, το ζήτημα του ελέγχου της κατεύθυνσης ρεύματος επιλύεται με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις.

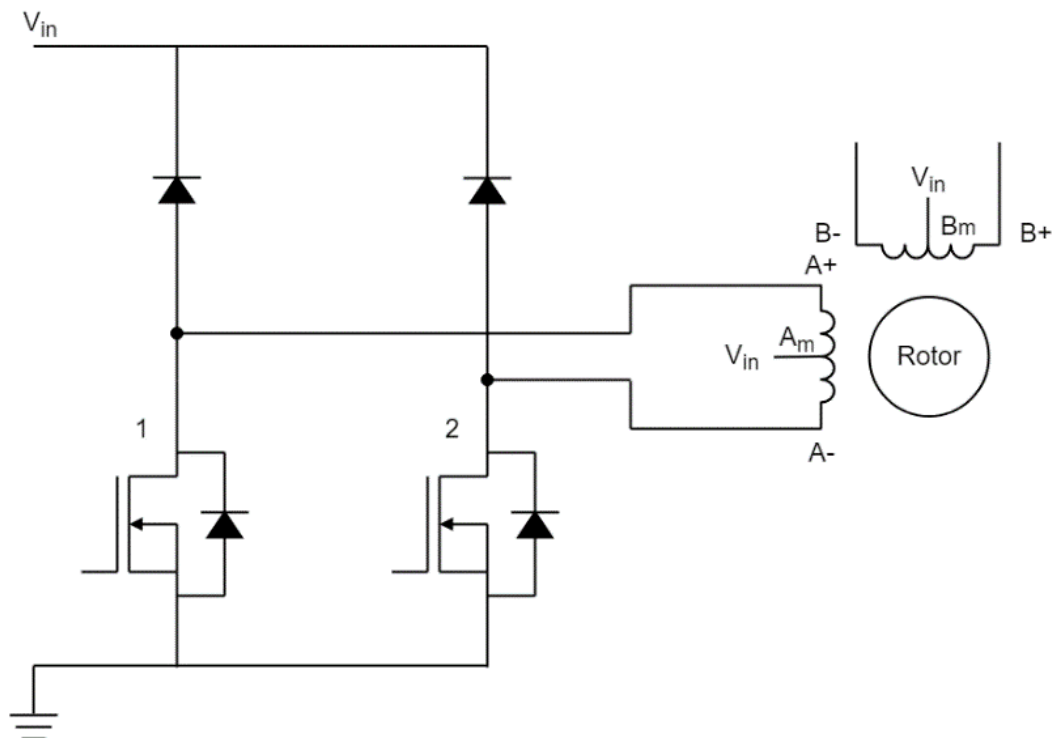


Σχήμα 4-4

Κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου με βάση την κατεύθυνση του ρεύματος του πηνίου

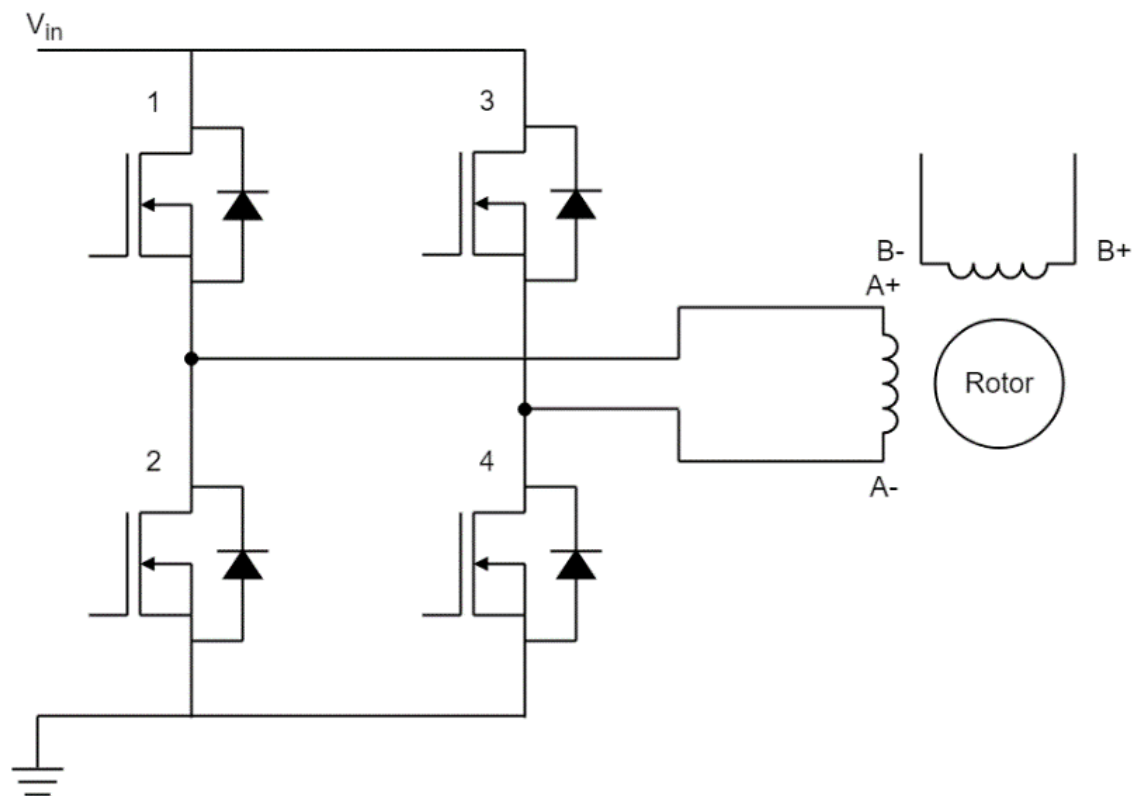
(<https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>)

Στους μονοπολικούς βηματικούς κινητήρες, ένα από τα καλώδια συνδέεται στο κεντρικό σημείο του πηνίου (βλ. Σχήμα 4-5). Αυτό επιτρέπει τον έλεγχο της κατεύθυνσης του ρεύματος χρησιμοποιώντας σχετικά απλό κύκλωμα και εξαρτήματα. Το κεντρικό καλώδιο (A_M) είναι συνδεδεμένο στην τάση εισόδου V_{IN} . Εάν το MOSFET 1 είναι ενεργό, το ρεύμα ρέει από το A_M στο $A+$. Εάν το MOSFET 2 είναι ενεργό, το ρεύμα ρέει από το A_M σε $A-$, δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο προς την αντίθετη κατεύθυνση. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αυτή η προσέγγιση επιτρέπει ένα απλούστερο κύκλωμα οδήγησης (απαιτούνται μόνο δύο ημιαγωγοί), αλλά το μειονέκτημα είναι ότι μόνο ο μισός χαλκός που χρησιμοποιείται στον κινητήρα χρησιμοποιείται κάθε φορά, αυτό σημαίνει ότι για το ίδιο ρεύμα που ρέει στο πηνίο, το μαγνητικό πεδίο έχει τη μισή ένταση σε σύγκριση με το αν χρησιμοποιήθηκε όλος ο χαλκός. Επιπλέον, αυτοί οι κινητήρες είναι πιο δύσκολο να κατασκευαστούν, καθώς πρέπει να διατίθενται περισσότερα καλώδια ως είσοδοι κινητήρα.



Σχήμα 4-5 Κύκλωμα οδήγησης μονοπολικού βηματικού κινητήρα (<https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>)

Στους διπολικούς βηματικούς κινητήρες, κάθε πηνίο έχει μόνο δύο διαθέσιμα καλώδια και για να ελέγξετε την κατεύθυνση είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσετε μια γέφυρα H (βλ. Σχήμα 4-6). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6, εάν τα MOSFET 1 και 4 είναι ενεργά, το ρεύμα ρέει από το A+ στο A-, ενώ εάν τα MOSFET 2 και 3 είναι ενεργά, το ρεύμα ρέει από το A- στο A+, δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτή η λύση απαιτεί ένα πιο περίπλοκο κύκλωμα οδήγησης, αλλά επιτρέπει στον κινητήρα να επιτύχει τη μέγιστη ροπή για την ποσότητα χαλκού που χρησιμοποιείται.



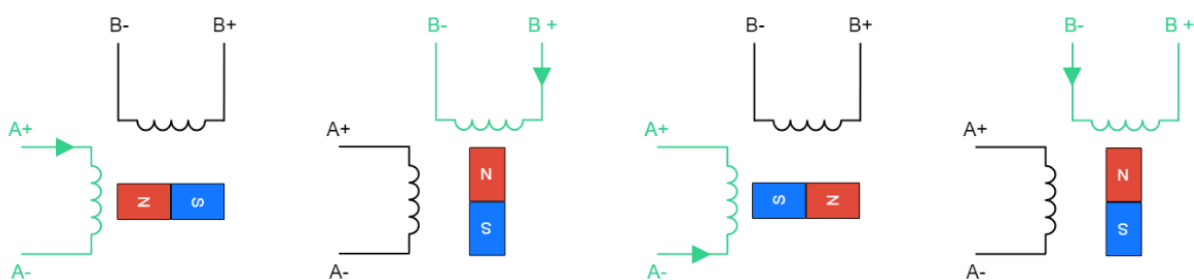
Σχήμα 4-6 **Κύκλωμα οδήγησης διπολικού βηματικού κινητήρα** (<https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>)

Με την πρόοδο της τεχνολογίας, τα πλεονεκτήματα του μονοπολικού γίνονται λιγότερο σημαντικά και τα διπολικά stepper είναι αυτή τη στιγμή τα πιο δημοφιλή.

4.4 Τεχνικές οδήγησης βηματικού κινητήρα

Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές τεχνικές οδήγησης για έναν βηματικό κινητήρα:

- Στη **λειτουργία κυμάτων**, ενεργοποιείται μόνο μία φάση τη φορά (βλ. Σχήμα 4-7). Για λόγους απλότητας, θα πούμε ότι το ρεύμα ρέει σε θετική κατεύθυνση εάν πηγαίνει από το + στο αγωγό - μια φάση (π.χ. από το A+ στο A-). διαφορετικά, η κατεύθυνση είναι αρνητική. Ξεκινώντας από τα αριστερά, το ρεύμα ρέει μόνο στη φάση A στη θετική κατεύθυνση και ο ρότορας, που αντιπροσωπεύεται από έναν μαγνήτη, είναι ευθυγραμμισμένος με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από αυτόν. Στο επόμενο βήμα, ρέει μόνο στη φάση B στη θετική κατεύθυνση και ο ρότορας περιστρέφεται 90° δεξιόστροφα για να ευθυγραμμιστεί με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τη φάση B. Αργότερα, η φάση A ενεργοποιείται ξανά, αλλά το ρεύμα ρέει προς την αρνητική κατεύθυνση, και ο ρότορας περιστρέφεται ξανά κατά 90° . Στο τελευταίο βήμα, το ρεύμα ρέει αρνητικά στη φάση B και ο ρότορας περιστρέφεται ξανά κατά 90° .

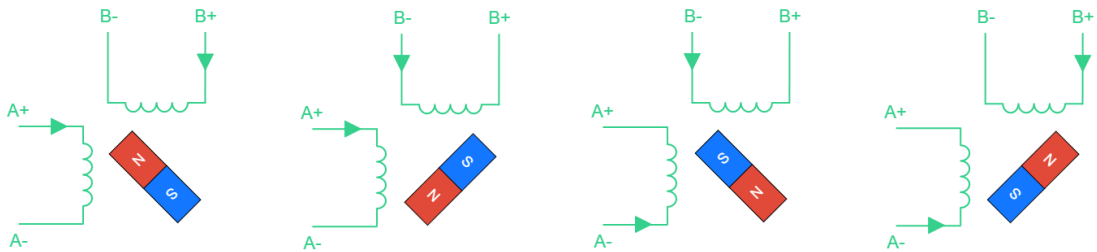


Σχήμα 4-7 Wave Mode

(<https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>)

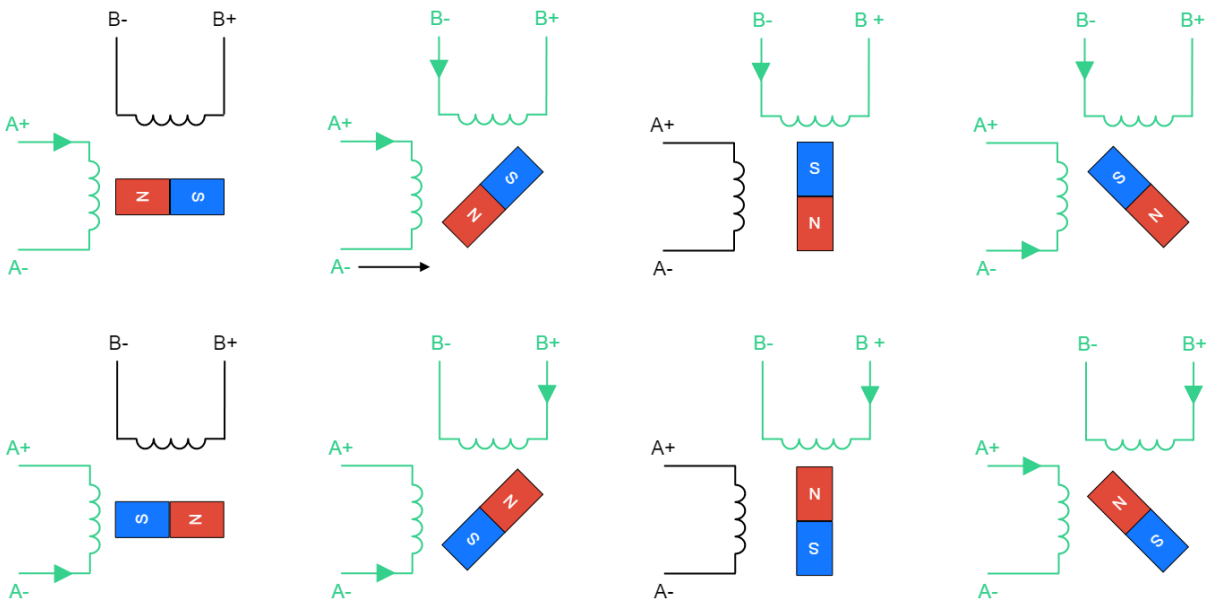
- Στη **λειτουργία πλήρους βήματος**, δύο φάσεις ενεργοποιούνται πάντα ταυτόχρονα. Το Σχήμα 4-8 δείχνει τα διαφορετικά βήματα αυτής της λειτουργίας οδήγησης. Τα βήματα είναι παρόμοια με αυτά της λειτουργίας κυματικής λειτουργίας, η

πιο σημαντική διαφορά είναι ότι με αυτήν τη λειτουργία, ο κινητήρας μπορεί να παράγει υψηλότερη ροπή, καθώς ρέει περισσότερο ρεύμα στον κινητήρα και δημιουργείται ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο.



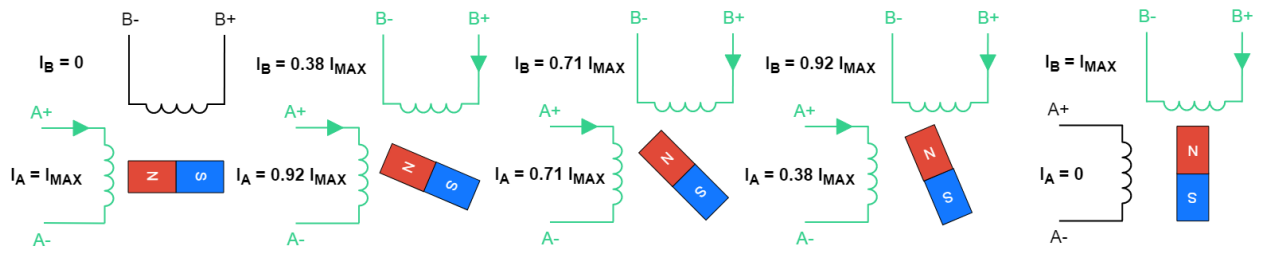
Σχήμα 4-8 Βήματα λειτουργίας πλήρους βήματος
<https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>

- Η λειτουργία μισού βήματος είναι ένας συνδυασμός τρόπων λειτουργίας κυμάτων και πλήρους βήματος (βλ. Σχήμα 4-9). Η χρήση αυτού του συνδυασμού επιτρέπει τη μείωση του μεγέθους του βήματος στο μισό (στην περίπτωση αυτή, 45° αντί για 90°). Το μόνο μειονέκτημα είναι ότι η ροπή που παράγεται από τον κινητήρα δεν είναι σταθερή, καθώς είναι μεγαλύτερη όταν ενεργοποιούνται και οι δύο φάσεις και ασθενέστερη όταν ενεργοποιείται μόνο μία φάση.



Σχήμα 4-9 Βήματα λειτουργίας μισού βήματος
<https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>

- Το Microstepping μπορεί να θεωρηθεί ως μια περαιτέρω βελτίωση της λειτουργίας μισού βήματος, επειδή επιτρέπει να μειώσετε ακόμη περισσότερο το μέγεθος του βήματος και να έχετε σταθερή έξοδο ροπής. Αυτό επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της έντασης του ρεύματος που ρέει σε κάθε φάση. Η χρήση αυτής της λειτουργίας απαιτεί έναν πιο περίπλοκο οδηγό κινητήρα σε σύγκριση με τις προηγούμενες λύσεις. Το Σχήμα 4-10 δείχνει πώς λειτουργεί το microstepping. Αν I_{MAX} είναι το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να ρέει σε μια φάση, ξεκινώντας από τα αριστερά, στο πρώτο σχήμα $I_A = I_{MAX}$ και $I_B = 0$. Στο επόμενο βήμα, τα ρεύματα ελέγχονται για να επιτευχθεί $I_A = 0,92 \times I_{MAX}$ και $I_B = 0,38 \times I_{MAX}$, το οποίο δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που περιστρέφεται κατά $22,5^\circ$ δεξιόστροφα σε σύγκριση με το προηγούμενο. Αυτό το βήμα επαναλαμβάνεται με διαφορετικές τιμές ρεύματος για να φτάσει τις θέσεις 45° , $67,5^\circ$ και 90° . Αυτό παρέχει τη δυνατότητα μείωσης κατά το ήμισυ του μεγέθους του βήματος, σε σύγκριση με τη λειτουργία μισού βήματος. αλλά είναι δυνατό να προχωρήσουμε ακόμη περισσότερο. Η χρήση του microstepping βοηθά στην επίτευξη πολύ υψηλής ανάλυσης θέσης, αλλά αυτό το πλεονέκτημα έχει το κόστος μιας πιο περίπλοκης συσκευής για τον έλεγχο του κινητήρα και μιας μικρότερης ροπής που παράγεται σε κάθε βήμα. Πράγματι, η ροπή είναι ανάλογη με το ημίτονο της γωνίας μεταξύ του μαγνητικού πεδίου του στάτορα και του μαγνητικού πεδίου του δρομέα. Επομένως, όταν τα βήματα είναι μικρότερα, η ροπή είναι μικρότερη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ορισμένων βημάτων, που σημαίνει ότι η θέση του ρότορα δεν αλλάζει ακόμα κι αν το ρεύμα στην περιέλιξη του στάτορα έχει αλλάξει.



Σχήμα 4-10 Microstepping
<https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>

4.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Stepper Motors

Τώρα που κατανοήσαμε τις αρχές λειτουργίας των βηματικών κινητήρων, είναι χρήσιμο να συνοψίσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους σε σύγκριση με άλλους τύπους κινητήρων.

4.5.1 Πλεονεκτήματα

- Λόγω της εσωτερικής τους δομής, οι βηματικοί κινητήρες δεν απαιτούν αισθητήρα για την ανίχνευση της θέσης του κινητήρα. Εφόσον ο κινητήρας κινείται εκτελώντας «βήματα», απλά μετρώντας αυτά τα βήματα, μπορείτε να λάβετε τη θέση του κινητήρα σε μια δεδομένη στιγμή.
- Επιπλέον, ο έλεγχος βηματικού κινητήρα είναι αρκετά απλός. Ο κινητήρας χρειάζεται οδηγό, αλλά δεν χρειάζεται πολύπλοκους υπολογισμούς ή ρύθμιση για να λειτουργήσει σωστά. Γενικά, η προσπάθεια ελέγχου είναι μικρότερη σε σύγκριση με άλλους κινητήρες. Με το microstepping, μπορείτε να φτάσετε σε υψηλή ακρίβεια θέσης, έως περίπου $0,007^\circ$.
- Οι βηματικοί κινητήρες προσφέρουν καλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες, είναι ιδανικοί για τη θέση συγκράτησης και τείνουν επίσης να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής.

4.5.2 Μειονεκτήματα

- Μπορεί να χάσουν ένα βήμα εάν η ροπή του φορτίου είναι πολύ υψηλή. Αυτό επηρεάζει αρνητικά τον έλεγχο, καθώς δεν υπάρχει τρόπος να γνωρίζουμε την πραγματική θέση του κινητήρα. Η

χρήση microstepping κάνει τους βηματικούς κινητήρες ακόμη πιο πιθανό να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα.

- Αυτοί οι κινητήρες αποστραγγίζουν πάντα το μέγιστο ρεύμα ακόμα και όταν είναι ακίνητοι, γεγονός που επιδεινώνει την απόδοση και μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση.
- Οι βηματικοί κινητήρες έχουν χαμηλή ροπή και γίνονται αρκετά θορυβώδεις στις υψηλές ταχύτητες.

Τέλος, οι βηματικοί κινητήρες έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και χαμηλό λόγο ροπής προς αδράνεια.

4.6 Χρήσεις και Εφαρμογές Stepper Motor

Λόγω των ιδιοτήτων τους, οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές όπου απαιτείται ένας απλός έλεγχος θέσης και η δυνατότητα συγκράτησης μιας θέσης, όπως:

- Εκτυπωτές: Κεφαλές εκτύπωσης, Τροφοδοσία χαρτιού, Γραμμή σάρωσης
- Εκτυπωτές 3D: XY Table Drive, Media Drive
- Robots: Arms, End Effectors
- Κάμερες DSLR: Κανονισμός διαφράγματος/εστίασης
- Κάμερες βίντεο: Pan, Tilt, Zoom, Focus
- Μηχανές Χαρακτικής: XY Table Motion
- Μηχανές ATM: Κίνηση Λογαριασμών, Ανελκυστήρες Δίσκων

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 –ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ

5.1 Αρχή λειτουργίας του ελεγκτή που υλοποιήθηκε

Οι βηματικοί κινητήρες διατίθενται σε διάφορες εκδόσεις και μεγέθη με ποικίλες τάσεις λειτουργίας. Το πλεονέκτημα αυτού του ελεγκτή γενικής χρήσης είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ένα ευρύ φάσμα τάσεων λειτουργίας, από περίπου 5 V έως 18 V. Μπορεί να οδηγήσει τον κινητήρα με τάση αιχμής ίση με το μισό της τάσης τροφοδοσίας, ώστε να μπορεί εύκολα να χειριστεί βηματικούς κινητήρες σχεδιασμένους για τάσεις μεταξύ 2,5 V και 9 V.

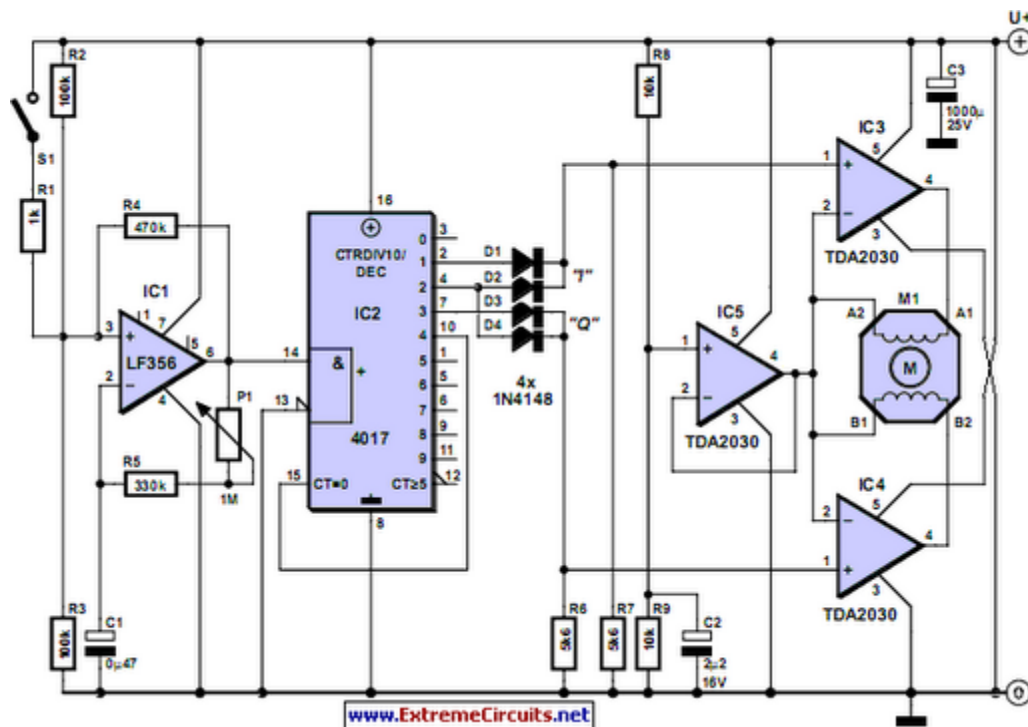
Το κύκλωμα μπορεί επίσης να παρέχει ρεύματα κινητήρα έως και 3,5 A, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την οδήγηση σχετικά μεγάλων κινητήρων. Το κύκλωμα είναι επίσης ανθεκτικό σε βραχυκύκλωμα και έχει ενσωματωμένη προστασία έναντι της θερμοκρασίας. Απαιτούνται δύο σήματα για την οδήγηση ενός βηματικού κινητήρα. Με λογικούς όρους, αποτελούν έναν κώδικα Gray, που σημαίνει ότι είναι δύο σήματα τετραγωνικού κύματος με την ίδια συχνότητα αλλά σταθερή διαφορά φάσης 90 μοιρών. Η φιλοσοφία και η χρησιμότητα του κώδικα Gray αναλύονται στην επόμενη παράγραφο.

Το IC₁ παράγει ένα σήμα τετραγωνικού κύματος με συχνότητα που μπορεί να ρυθμιστεί χρησιμοποιώντας το ποτενσιόμετρο P₁. Αυτή η συχνότητα καθορίζει τις στροφές του βηματικού κινητήρα. Ο κώδικας Gray δημιουργείται από έναν δεκαδικό μετρητή. Οι έξοδοι Q₀–Q₉ του μετρητή παίρνουν διαδοχικά την τιμή 1, ως απόκριση στις ανερχόμενες άκρες του σήματος ρολογιού. Ο κώδικας Gray μπορεί να δημιουργηθεί από τις εξόδους χρησιμοποιώντας δύο πύλες OR, οι οποίες σχηματίζονται εδώ χρησιμοποιώντας δύο διόδους και μια αντίσταση για κάθε πύλη, για την παραγωγή των σημάτων I και Q.

Εδώ το "I" σημαίνει "in-phase" και το "Q" για το "quadrature", που σημαίνει ότι έχει μετατόπιση φάσης 90 μοιρών από το σήμα I. Είναι κοινή πρακτική η οδήγηση των περιελίξεων ενός βηματικού κινητήρα χρησιμοποιώντας ένα ζεύγος κυκλωμάτων ώθησης-έλξης για κάθε

τύλιγμα, το οποίο ονομάζεται «γέφυρα H». Αυτό καθιστά δυνατή την αντιστροφή της κατεύθυνσης του ρεύματος μέσω κάθε περιέλιξης, η οποία είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία ενός διπολικού κινητήρα.

Φυσικά, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη σωστή οδήγηση ενός μονοπολικού κινητήρα. Αντί να χρησιμοποιήσουμε ένα κύκλωμα push-pull αυτού του είδους, αποφασίσαμε εδώ να χρησιμοποιήσουμε IC ενισχυτή ήχου (τύπου TDA2030), παρόλο που αυτό μπορεί να ακούγεται κάπως περίεργο. Σε λειτουργικούς όρους, το TDA2030 είναι στην πραγματικότητα ένα είδος ενισχυτή ισχύος. Έχει έναν ενισχυτή διαφοράς στην είσοδο και ένα στάδιο οδήγησης push-pull στην έξοδο.



Σχήμα 5-1 Το διάγραμμα του ελεγκτή που υλοποιήθηκε

Τα IC₃, IC₄ και IC₅ είναι όλα αυτού του τύπου. Εδώ τα IC₃ και IC₄ είναι καλωδιωμένα ως συγκριτές. Οι μη ανάστροφες εισοδοί τους οδηγούνται από τα προαναφερθέντα σήματα I και Q, με τις εισόδους αναστροφής να έχουν ρυθμιστεί σε δυναμικό ίσο με το ήμισυ της τάσης τροφοδοσίας. Αυτό το δυναμικό παρέχεται από το τρίτο TDA2030. Οι

έξοδοι των IC₃ και IC₄ παρακολουθούν έτσι τις μη ανάστροφες εισόδους τους και καθεμία από αυτές κινεί μία περιέλιξη κινητήρα.

Τα άλλα άκρα των περιελίξεων συνδέονται με τη σειρά τους στο μισό της τάσης τροφοδοσίας, που παρέχεται από το IC₅. Καθώς το ένα άκρο κάθε περιέλιξης συνδέεται με ένα σήμα τετραγωνικού κύματος που εναλλάσσεται μεταξύ 0 V και δυναμικού κοντά στην τάση τροφοδοσίας, ενώ το άλλο άκρο είναι στο μισό της τάσης τροφοδοσίας, εφαρμόζεται πάντα μια τάση ίση με το μισό της τάσης τροφοδοσίας σε κάθε περιέλιξη, αλλά εναλλάσσεται σε πολικότητα σύμφωνα με τις καταστάσεις των σημάτων I και Q.

Αυτό ακριβώς θέλουμε για την οδήγηση ενός διπολικού βηματικού κινητήρα. Οι στροφές ανά λεπτό μπορούν να μεταβληθούν χρησιμοποιώντας το ποτενσιόμετρο P₁, αλλά η πραγματική ταχύτητα είναι διαφορετική για κάθε τύπο κινητήρα, επειδή εξαρτάται από τον αριθμό των βημάτων ανά περιστροφή. Ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε στο πρωτότυπο προχωρούσε κατά περίπου 9° ανά βήμα και η ταχύτητά του μπορούσε να ρυθμιστεί σε ένα εύρος περίπου 2 έως 10 δευτερολέπτων ανά περιστροφή.

Κατ' αρχήν, οποιαδήποτε επιθυμητή ταχύτητα μπορεί να επιτευχθεί ρυθμίζοντας την τιμή του C₁, αρκεί ο κινητήρας να τη χειριστεί. Το εύρος ρύθμισης του P₁ μπορεί να αυξηθεί μειώνοντας την τιμή της αντίστασης R₅. Το εύρος ρύθμισης είναι 1:(1000 + R₅)/R₅, όπου το R₅ δίνεται σε kΩ. Εάν ένας βηματικός κινητήρας απενεργοποιηθεί αφαιρώντας την τάση τροφοδοσίας από το κύκλωμα, είναι πιθανό ο κινητήρας να συνεχίσει να περιστρέφεται για λίγο ακόμα, λόγω της δικής του αδράνειας ή του μηχανικού φορτίου στον κινητήρα (φαινόμενο σφονδύλου). Το φαινόμενο σφονδύλου είναι η συνέχιση των ταλαντώσεων μετά την αφαίρεση του ερεθίσματος ελέγχου. Αυτό συνήθως προκαλείται από την αλληλεπίδραση επαγωγικών και χωρητικών στοιχείων στον ταλαντωτή.

Είναι επίσης πιθανό η θέση του κινητήρα να διαφωνεί με τις καταστάσεις των σημάτων I και Q όταν εφαρμόζεται για πρώτη φορά

ισχύς στο κύκλωμα. Ως αποτέλεσμα, ο κινητήρας μπορεί μερικές φορές να «μπερδεύεται» κατά την εκκίνηση, με αποτέλεσμα να κάνει ένα βήμα προς τη λάθος κατεύθυνση πριν αρχίσει να κινείται προς την κατεύθυνση που ορίζεται από τα σήματα κίνησης. Αυτά τα φαινόμενα μπορούν να αποφευχθούν προσθέτοντας τον προαιρετικό διακόπτη S₁ και μια αντίσταση 1-kΩ, η οποία μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την εκκίνηση και τη διακοπή του κινητήρα. Όταν το S₁ είναι κλειστό, το σήμα ρολογιού σταματά αλλά το IC₂ διατηρεί τα επίπεδα εξόδου του εκείνη τη στιγμή, έτσι τα συνεχή ρεύματα μέσω των περιελίξεων του κινητήρα «κλειδώνουν» μαγνητικά τον ρότορα στη θέση του.

Το TDA2030 διαθέτει εσωτερική προστασία έναντι της θερμοκρασίας, επομένως το ρεύμα εξόδου θα μειωθεί αυτόματα εάν το IC γίνει πολύ ζεστό. Για το λόγο αυτό, συνιστάται η τοποθέτηση των IC₃, IC₄ και IC₅ σε μια ψύκτρα (πιθανώς μια κοινόχρηστη ψύκτρα) όταν χρησιμοποιείται κινητήρας σχετικά υψηλής ισχύος. Η γλωττίδα της θήκης TO220 είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένη με τον ακροδέκτη αρνητικής τάσης τροφοδοσίας, έτσι ώστε τα IC να μπορούν να συνδεθούν σε μια κοινόχρηστη ψύκτρα χωρίς τη χρήση μονωτικών ροδέλων.

5.2 Κώδικας Gray (Gray code)^[10]

Ο κώδικας "Gray" είναι δυαδικό σύστημα αρίθμησης με βασικό χαρακτηριστικό την μεταβολή ενός ψηφίου (bit) σε διαδοχικούς αριθμούς. Σε αντίθεση με την κανονική δυαδική αρίθμηση, κάθε ψηφίο δεν έχει σταθερή "αξία". Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται συγκριτικά η αρίθμηση σε δεκαεξαδικό, δυαδικό και gray code:

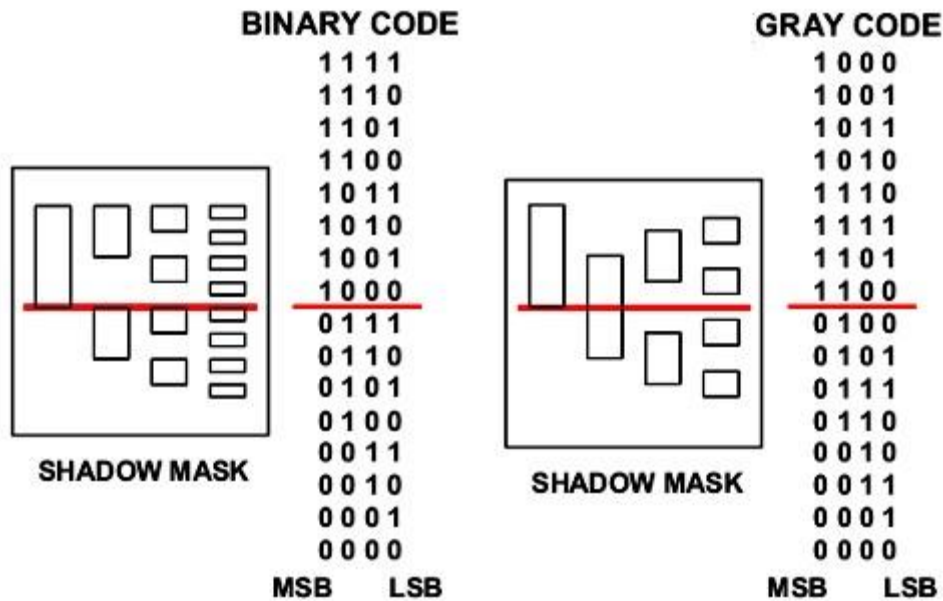
HEX Δυαδικό Gray Code

0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010

4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
A	1010	1111
B	1011	1110
C	1100	1010
D	1101	1011
E	1110	1001
F	1111	1000

5.2.1 Χρησιμότητα του κώδικα Gray

Ο κώδικας Gray επινοήθηκε για ελαχιστοποίηση σφάλματος σε αισθητήρια θέσης όπου μια μηχανική ασάφεια μπορεί να "δείχνει" τη διπλανή θέση επειδή άργησε να κλείσει η επαφή ενός ψηφίου. Με τον κανονικό δυαδικό αριθμό, αν η επαφή ενός bit συνδεθεί πριν αποσυνδεθούν όλες οι άλλες, το "παίξιμο" μεταξύ "0111" και "1000" μπορεί να δώσει "1111" δείχνοντας πολύ διαφορετική θέση. Στον κώδικα Gray, η αλλαγή αφορά μόνο 1 bit και το σφάλμα θα μείνει μεταξύ δύο διαδοχικών θέσεων. Στο παρακάτω Σχήμα 5-2 φαίνεται αυτή η περίπτωση



Σχήμα 5-2 Σκιασμένη επιφάνεια για κωδικοποίηση Gray (<https://acomelectronics.com/forum/viewtopic.php?t=130>)

Η κόκκινη γραμμή είναι η δέσμη φωτός του κωδικοποιητή που θα περάσει μέσα από τα κενά της σκιασμένης επιφάνειας και θα "δείξει" τη θέση στα αντίστοιχα δυαδικά ψηφία. Στην κλασική δυαδική κωδικοποίηση, αν περάσει φως από τα κενά της επόμενης θέσης πριν "σβήσει" το πρώτο ψηφίο, ο κωδικοποιητής θα δείξει την αρχή, δηλαδή σφάλμα 50%. Στην κωδικοποίηση Gray, το σφάλμα περιορίζεται +/- 1 θέση, δηλαδή "όσο πρέπει".

Τα ψηφία ενός κωδικοποιητή θέσης κατασκευάζονται από ηλεκτρικές, μαγνητικές ή οπτικές "επαφές". Στην Εικόνα 5-1, φαίνεται πως είναι μέσα ένας κωδικοποιητής απόλυτης θέσης που χρησιμοποιεί κώδικα Gray

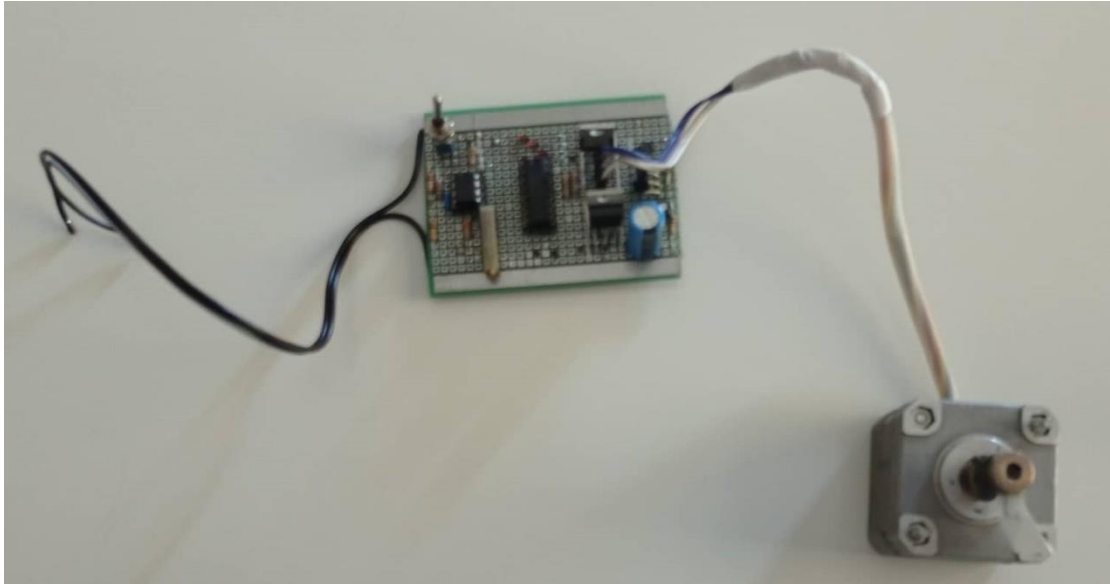


Εικόνα 5-1 Κωδικοποιητής απόλυτης θέσης που χρησιμοποιεί κώδικα Gray (<https://acomelectronics.com/forum/viewtopic.php?t=130>)

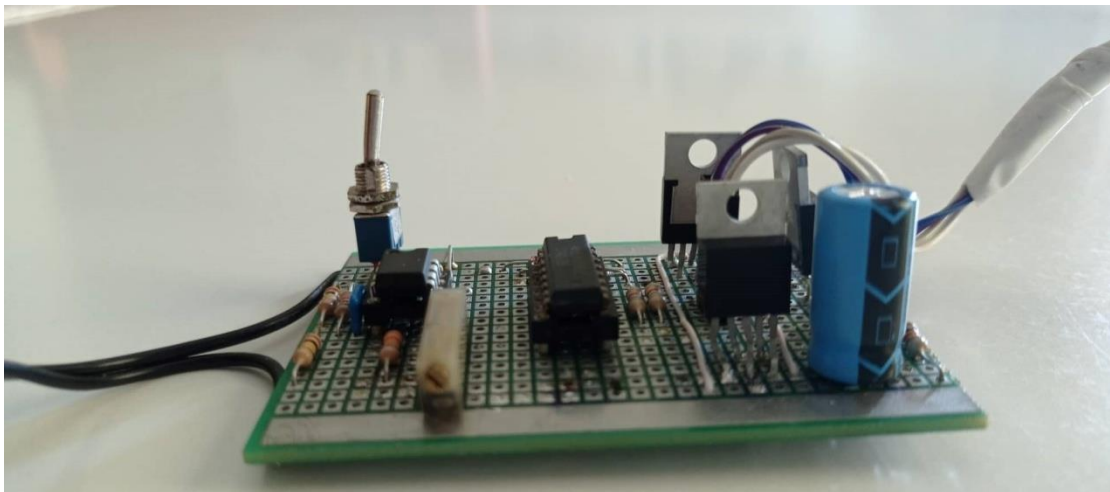
Αξίζει να αναφερθεί ότι παραλλαγές του κώδικα Gray χρησιμοποιούνται και στις ψηφιακές επικοινωνίες για μείωση των σφαλμάτων μετάδοσης.

5.3 Παρουσίαση του κυκλώματος

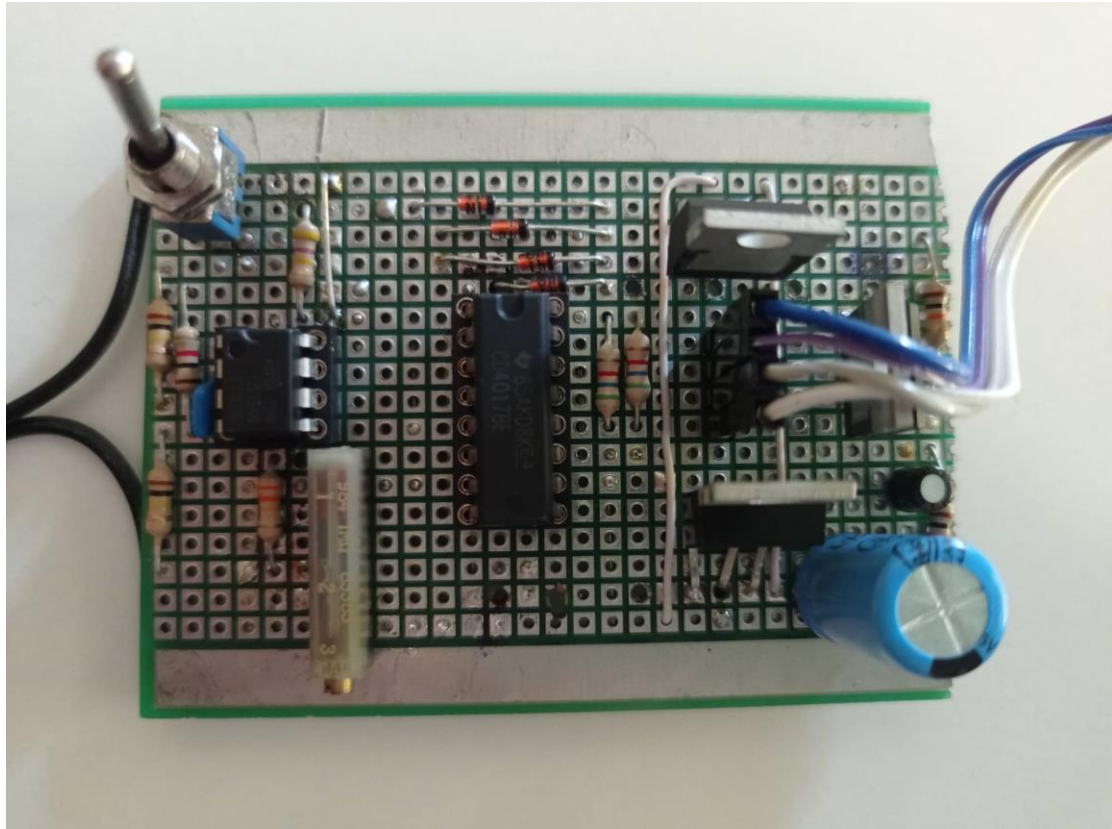
Η πλακέτα του σχήματος 5-1 μαζί με το καλώδιο τροφοδοσίας και τον βηματικό κινητήρα συνδεδεμένο φαίνεται στην εικόνα 5-2



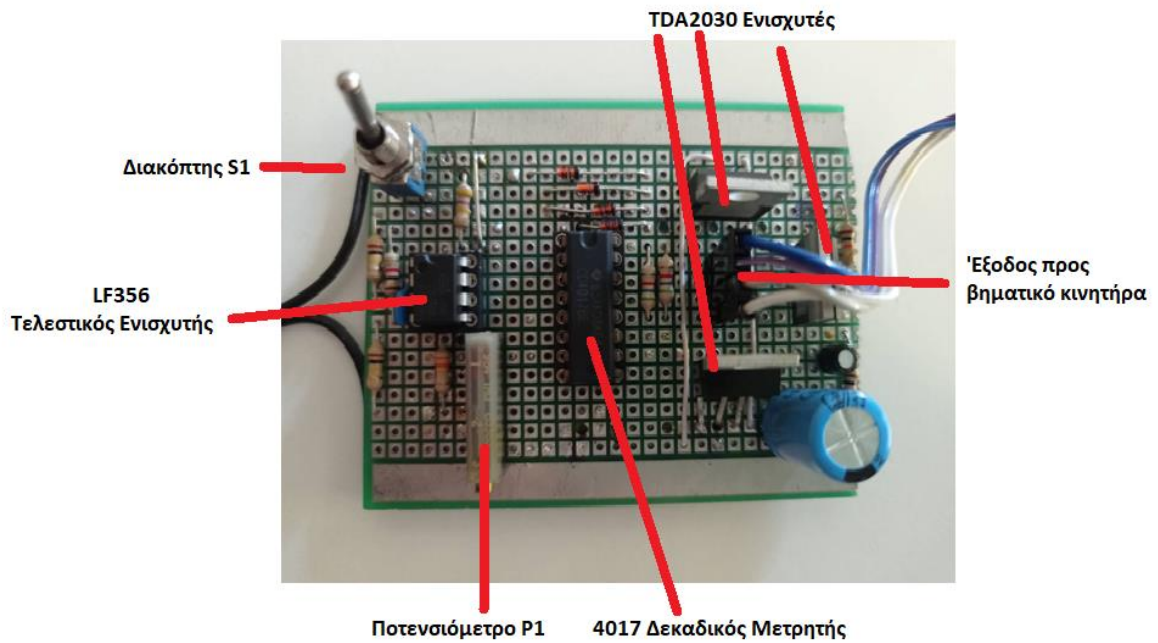
Εικόνα 5-2 Η πλακέτα με το καλώδιο τροφοδοσίας και τον βηματικό κινητήρα



Εικόνα 5-3 Πλάγια όψη της πλακέτας



Εικόνα 5-4 Κάτοψη της πλακέτας



Εικόνα 5-5 Παρουσίαση των εξαρτημάτων της πλακέτας

Η πορεία της συναρμολόγησης περιείχε τα παρακάτω στάδια

1. Αγορά και έλεγχος των εξαρτημάτων (μέτρηση των αντιστάσεων, των πυκνωτών, του διακόπτη)
2. Διασύνδεση των εξαρτημάτων εκτός της πλακέτας για να διαπιστωθεί η ορθή λειτουργία του όλου κυκλώματος
3. Κόλληση της πλακέτας

6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ

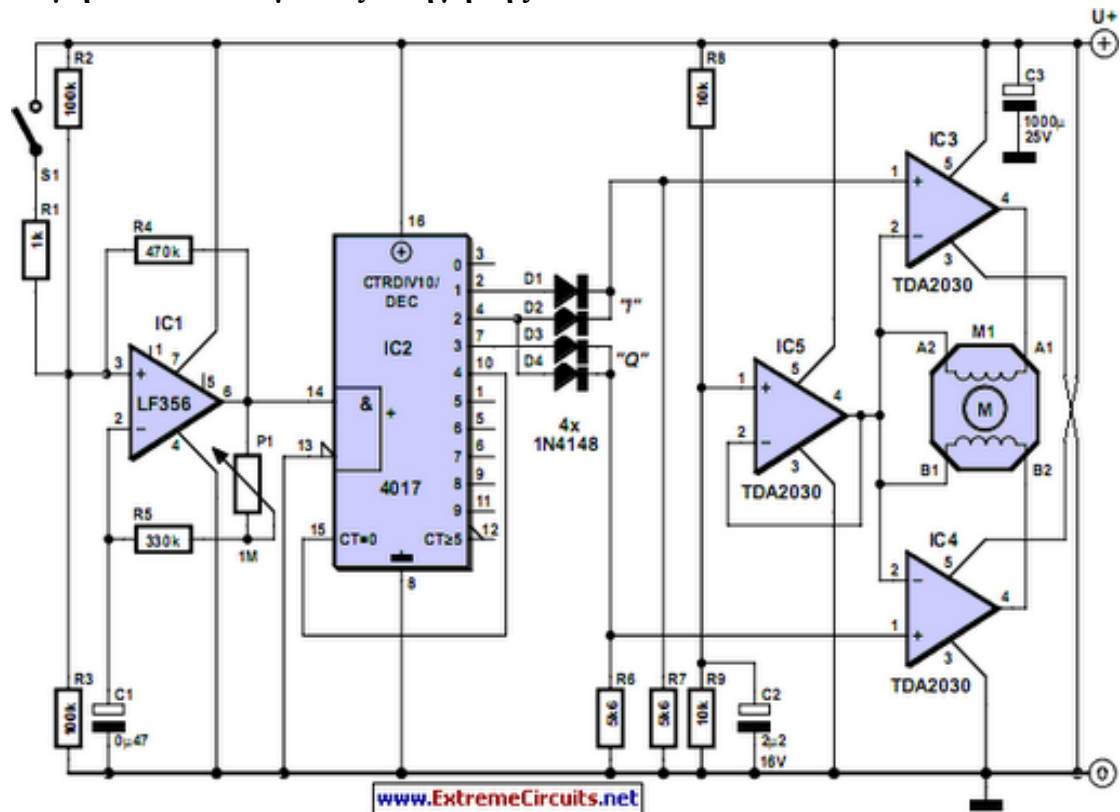
Στη διάταξη ελέγχου του βηματικού κινητήρα που κατασκευάστηκε, οι παλμοί δημιουργούνται από το IC₁ και μπορούν να ρυθμιστούν από τον ποτενσιόμετρο P₁. Η διάταξη αυτή θα μπορούσε μελλοντικά να αντικατασταθεί με έναν μικροϋπολογιστή προκειμένου να παράγονται παλμοί και πιο γρήγορα και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Αυτό συνεπάγεται και καλύτερο έλεγχο στην περιστροφή και στην ταχύτητα του κινητήρα στην έξοδο.

Επίσης ο μετρητής 4017, δηλαδή το IC₂ θα μπορούσε να αντικατασταθεί με μικροϋπολογιστή για τους ίδιους λόγους

Περαιτέρω, θα μπορούσε να υπάρξει μια προσθήκη στο κύκλωμα για δυνατότητα δεξιόστροφης και αριστερόστροφης κίνησης

7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Δομή του κυκλώματος οδήγησης



Εικόνα 7-6 Παρουσίαση του κυκλώματος οδήγησης

- ❑ Μπορεί εύκολα να χειριστεί βηματικούς κινητήρες σχεδιασμένους για τάσεις μεταξύ 2,5 V και 9 V.
- ❑ Το κύκλωμα μπορεί επίσης να παρέχει ρεύματα κινητήρα έως και 3,5 A, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την οδήγηση σχετικά μεγάλων κινητήρων.
- ❑ Το κύκλωμα είναι επίσης ανθεκτικό σε βραχυκύκλωμα και έχει ενσωματωμένη προστασία έναντι της θερμοκρασίας.

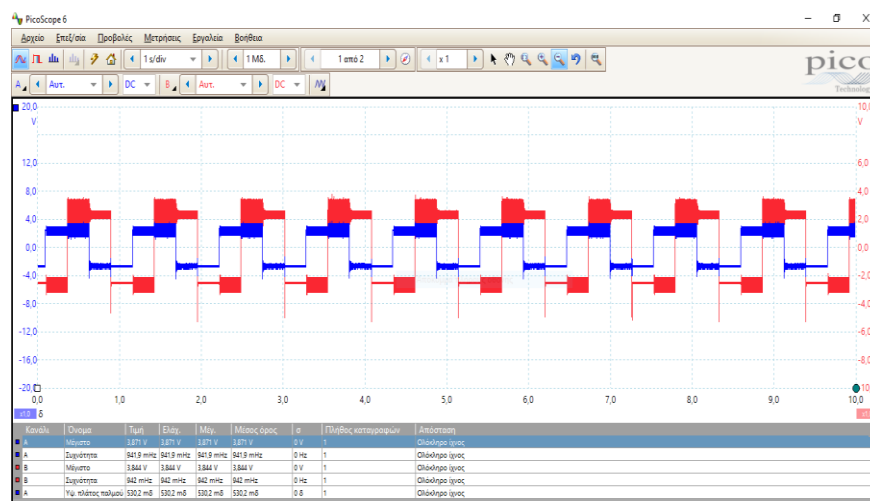
7.1 Αρχή λειτουργίας του κυκλώματος οδήγησης

- Το **IC₁** παράγει ένα σήμα τετραγωνικού κύματος με συχνότητα που μπορεί να ρυθμιστεί χρησιμοποιώντας το ποτενσιόμετρο **P₁**. Αυτή η συχνότητα καθορίζει τις στροφές του βηματικού κινητήρα
- Οι έξοδοι **Q₀–Q₉** του **μετρητή 4017** παίρνουν διαδοχικά την τιμή 1, για την παραγωγή των σημάτων **I** και **Q**. Εδώ το "**I**" σημαίνει "in-phase" και το "**Q**" για το "quadrature", που σημαίνει ότι έχει μετατόπιση φάσης 90 μοιρών από το σήμα **I**. Έτσι πραγματοποιείται η οδήγηση των περιελίξεων ενός βηματικού κινητήρα χρησιμοποιώντας ένα ζεύγος κυκλωμάτων ώθησης-έλξης για κάθε τύλιγμα.
- Το **TDA2030** είναι ένα είδος ενισχυτή ισχύος. Έχει έναν ενισχυτή διαφοράς στην είσοδο και ένα στάδιο οδήγησης push-pull στην έξοδο..
- Τα **IC₃** και **IC₄** είναι καλωδιωμένα ως συγκριτές. Οι μη ανάστροφες εισοδοί τους οδηγούνται από τα προαναφερθέντα σήματα **I** και **Q**, με τις εισόδους αναστροφής να έχουν ρυθμιστεί σε δυναμικό ίσο με το ήμισυ της τάσης τροφοδοσίας. Αυτό το δυναμικό παρέχεται από το τρίτο **TDA2030**. Οι έξοδοι των **IC₃** και **IC₄** παρακολουθούν έτσι τις μη ανάστροφες εισόδους τους και καθεμία από αυτές κινεί μία περιέλιξη κινητήρα

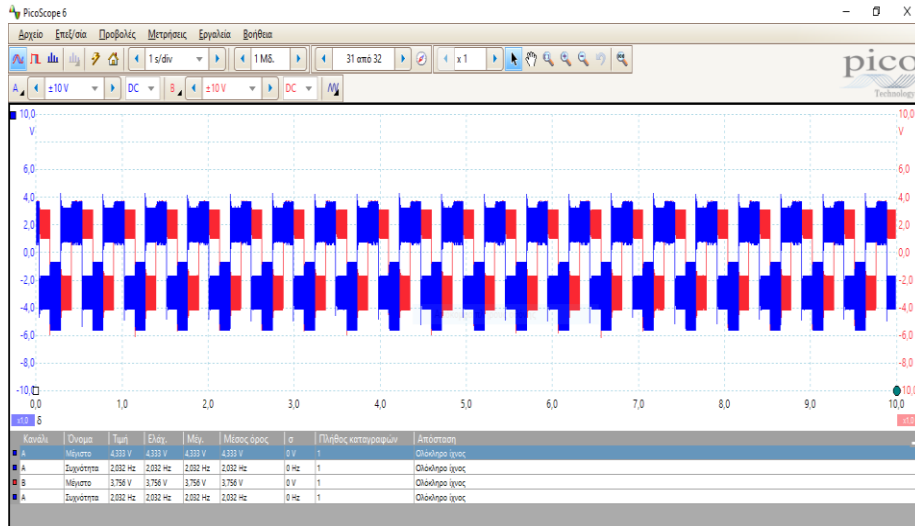
7.2 Εργαστηριακές μετρήσεις του κυκλώματος

V _{in} (V)	V _α (V)	V _β (V)	F _a (Hz)	F _β (Hz)	Rποτενσιομ.	Rpm stepper
8	3.871	3.844	941,9mHz	941,9mHz	0.2Ω	1,32
8	4.237	4,28	1.006	1.006	100k	1,82
8	3.928	3.931	1.102	1.102	200k	2,55
8	4.245	3.752	1.221	1.221	300k	2,74
8	4,33	3.844	1.351	1.351	400k	3,15
8	4,33	3.756	1.527	1.527	500k	3,67
8	4,33	3.844	1.734	1.734	600k	3,86
8	4,33	3.756	2.032	2.032	700k	4,78
8	4,33	3.756	2.405	2.405	800k	5,39
8	4,33	3.756	2.992	2.992	900k	7,05
8	4.421	3.844	3,73	3,73	976k	8,83

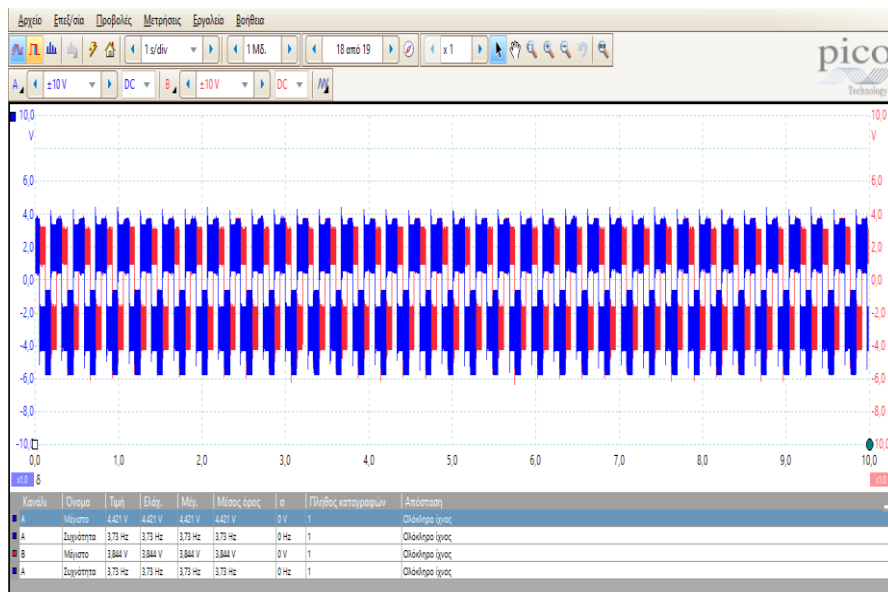
Εικόνα 7-7 Οι μετρήσεις του κυκλώματος



Εικόνα 7-8 Οι μετρήσεις του κυκλώματος για 1,32Rpm



Εικόνα 7-9 Οι μετρήσεις του κυκλώματος για 4,78Rpm



Εικόνα 7-10 Οι μετρήσεις του κυκλώματος για 8,83Rpm

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <https://us.aspina-group.com/en/learning-zone/columns/what-is/015/>
- [2] <https://www.elprocus.com/stepper-motor-types-advantages-applications/>
- [3] <https://electricalgang.com/types-of-stepper-motors/>
- [4] <https://www.theengineeringprojects.com/2022/04/control-stepper-motor-with-raspberry-pi-4-using-python.html>
- [5] <https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>
- [6] <https://www.amci.com/industrial-automation-resources/plc-automation-tutorials/stepper-vs-servo/>
- [7] <https://www.linquip.com/blog/series-wound-dc-motor/>
- [8] <https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/2-phase-bipolar-drivers.html>
- [9] <https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>
- [10] <https://acomelectronics.com/forum/viewtopic.php?t=130>

- [11] Hubert P.E. Charles I. (2008). Ηλεκτρικές Μηχανές: Θεωρία. Λειτουργία, Εφαρμογές. Ρυθμίσεις & Έλεγχος. Αθήνα. Εκδόσεις ΙΩΝ
- [12] Takashi Kenjo. Stepping Motors and Their Microprocessor Control. Oxford. Clarendon Press
- [13] Sen P.C.(1997) Principles of Electric Machines and Power Electronics (1997).New York. John Wiley & Sons