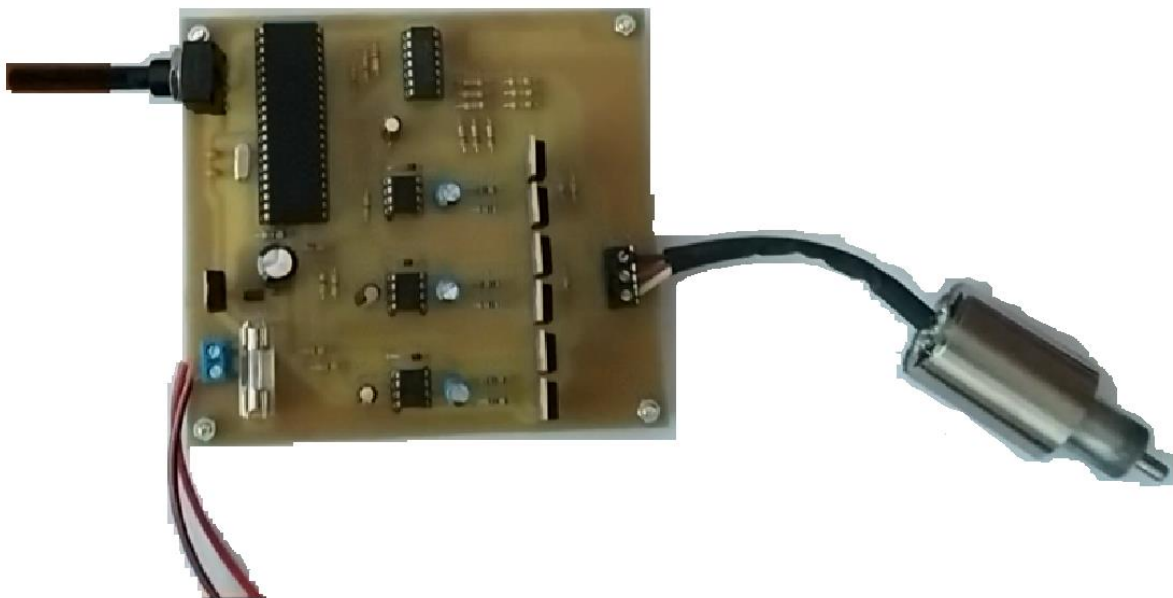


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ BLDC
ΧΩΡΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ PIC »



Του φοιτητή

Δόλλα Μηνά

Αρ. Μητρώου: 515028

Επιβλέπων

Ονοματεπώνυμο Άγγελος Γιακουμής

Βαθμίδα Λέκτορας

Ημερομηνία 22/6/2020

Τίτλος Π.Ε.: Μελέτη και κατασκευή κυκλώματος οδήγησης κινητήρα bldc χωρίς αισθητήρα ελέγχου με μικροελεγκτή pic

Κωδικός Π.Ε.: 19121M

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Μηνάς Δόλλας

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Άγγελος Γιακουμής

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 28/3/2019

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 22/6/2020

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Δι.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Μηνά Δόλλα που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία ασχολείται με κινητήρες DC χωρίς ψύκτρες και χωρίς αισθητήρες. Αρχικά, γίνεται αναφορά στους δύο τύπους κινητήρων, DC και AC, στα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα τους καθώς και στις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας των dc κινητήρων χωρίς ψύκτρες και χωρίς αισθητήρες και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών, καθώς και σε ποιες εφαρμογές προτιμώνται. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος, αναλύεται η λειτουργία του κυκλώματος, ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή PIC18f4550 που απαιτείται και η κατασκευή του κυκλώματος πάνω στην πλακέτα.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της αύξησης που παρατηρείται στην κατασκευή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, όλο και περισσότερο χρησιμοποιούνται διάφορων ειδών κινητήρες. Σε διάφορες έρευνες που έχουν γίνει αναφέρεται ότι, οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, όπως της μεγάλης απόδοσης που έχουν, της υψηλής ταχύτητας, της ομαλής ροπής και της χαμηλής κατανάλωσης ισχύος προτιμώνται πολύ περισσότερο από έναν κινητήρα με ψύκτρες σε διάφορες κατασκευές. Για την λειτουργία κινητήρων χωρίς ψύκτρες και χωρίς αισθητήρες χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι για να εντοπίζουν τη θέση ή και την ταχύτητα του ρότορα σε σχέση με τον στάτη, μία από τις οποίες είναι η BEMF.

Αρχικά, στο δεύτερο κεφάλαιο, αναφέρονται οι τύποι των κινητήρων που χωρίζονται σε DC και AC κινητήρες και λίγα λόγια για τον καθένα. Στη συνέχεια, στο τρίτο κεφάλαιο, πρώτα αναλύεται η λειτουργία του κινητήρα χωρίς ψύκτρες, έπειτα πως λειτουργεί με αισθητήρες και χωρίς αισθητήρες, και συγκεκριμένα με την χρήση της *bemf*, καθώς και τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα τους και στη συνέχεια οι εφαρμογές στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής.

Τελικά, στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή της κατασκευής του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα χρησιμοποιώντας τον μικροελεγκτή PIC18f4550, το *mosfet*, τις αντιστάσεις και πολλά άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Έπειτα, αναφέρονται οι τρόποι εκτύπωσης πάνω στην πλακέτα ενός κυκλώματος, το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του σχεδιαστικού κυκλώματος και το πρόγραμμα για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή PIC18F4550, ενώ στο τέλος αναφέρονται κάποια συμπεράσματα.

Abstract

In recent years, due to the increase in the construction of electronic circuits, various types of engines have been used more and more. Various studies have shown that brushless motors, due to their advantages such as high efficiency, high speed, smooth torque and low power consumption are much more preferred over a brushed motor in various constructions. Various methods are used to operate sensorless brushless motors to locate the position and or the speed of the rotor related to the stator, one of which is the BEMF.

Initially, in the second chapter, the types of motors are mentioned which are divided into DC and AC motors and a few words about them. Then, in the third chapter, firstly, the operation of the brushless motor is analyzed, secondly, how it works with sensors and without sensors, and specifically with the use of bemf, as well as their advantages-disadvantages and then, the applications in which they can be used depending on the requirements of each application.

Lastly, in the fourth chapter, the construction of the motor drive circuit using the PIC18f4550 microcontroller, the mosfet, the resistors and many other electronic components is described. The printing methods on the circuit board of the circuit, the program used for the construction of the designed circuit and the program for the programming of the microcontroller PIC18F4550 are also mentioned and, at the end, some conclusions are mentioned.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που μου στάθηκαν ψυχολογικά αλλά και με βοηθούσαν οικονομικά μέχρι να φτάσω στο τέλος της πτυχιακής μου εργασίας, τον αδερφό μου που με βοήθησε σε διάφορα θέματα σχετικά με την εργασία μου και τέλος τον κ. Γιακουμή που με βοήθησε καθόλη την διάρκεια της εργασίας μου, στο θεωρητικό κομμάτι της εργασίας, στον προγραμματισμό και στην κατασκευή του κυκλώματος.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : ΤΥΠΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΧΩΡΙΣ ΨΥΚΤΡΕΣ (BLDC MOTORS)	13
3.1 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα	14
3.2 Χρήσεις – εφαρμογές	15
3.3 Sensored BLDC Motor	16
3.4 Sensorless BLDC Motor	17
3.5 Διαφορές κινητήρων χωρίς ψύκτρεις με αισθητήρες και χωρίς αισθητήρες.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο : ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	21
4.1 Απαιτούμενο υλικό	21
4.2 Σχηματικό διάγραμμα και λειτουργία του κυκλώματος.....	22
4.3 Κώδικας C	25
4.4 Προγραμματισμός του μικροελεγκτή PIC18F4550	28
4.5 Τύπωση του κυκλώματος.....	32
Κατασκευή του σχηματικού κυκλώματος.....	32
Τύπωση του κυκλώματος πάνω σε πλακέτα	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	38
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	39
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	40

Ευρετήριο σχημάτων και πινάκων

Σχήμα 2.1 Κινητήρες dc με ψύκτρες	11
Σχήμα 2.2 Βηματικός κινητήρας.....	12
Σχήμα 3.1 Κινητήρας χωρίς ψύκτρες	13
Σχήμα 3.2 Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα χωρίς ψύκτρες	14
Σχήμα 3.3 Σύστημα ελέγχου για κινητήρες χωρίς ψύκτρες με την χρήση αισθητήρα Hall.....	17
Σχήμα 3.4 Σύστημα ελέγχου για κινητήρες χωρίς ψύκτρες χωρίς αισθητήρες με την χρήση της BEMF	18
Σχήμα 3.5 Σήματα εξόδου με την χρήση αισθητήρα Hall, αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης, σήμα εξόδου ροπής και σήματα ρεύματος της κάθε φάσης	20
Σχήμα 4.1 Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα.....	22
Σχήμα 4.2 block διάγραμμα του κυκλώματος	23
Σχήμα 4.3 Κινητήρας χωρίς ψύκτρες της εταιρείας NIDEC	24
Σχήμα 4.4 Mplab μετατροπή από κώδικα C σε hex.....	29
Σχήμα 4.5 Programmer/debugger PicKit3	29
Σχήμα 4.6 Λογισμικό του Programmer PicKit3 της έκδοσης PICkit 3 v3.10.....	30
Σχήμα 4.7 Το κύκλωμα για να συνδεθεί ο μικροελεγκτής PIC18F4550 με τον Programmer PicKit3	31
Σχήμα 4.8 Το σχηματικό του σχήματος 4.7 πάνω στο ράστερ	31
Σχήμα 4.9 Σχεδιαστικό κύκλωμα στο πρόγραμμα Altium	32
Σχήμα 4.10 Σχεδιαστικό κύκλωμα για τύπωση πάνω στην πλακέτα.....	33
Σχήμα 4.11 Τρόπος μονταρίσματος του σχεδιαστικού κυκλώματος	34
Σχήμα 4.12 Φωτοευαίσθητη πλακέτα	35
Σχήμα 4.13 Το κύκλωμα τυπωμένο πάνω στην πλακέτα	36
Σχήμα 4.14 Κόλληση εξαρτημάτων στην πλακέτα.....	36
Σχήμα 4.15 Τελικό κύκλωμα οδήγησης του κινητήρα	37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια λόγω της αύξησης που παρατηρείται στην κατασκευή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων όλο και περισσότερο χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών κινητήρες. Σε διάφορες έρευνες που έχουν γίνει αναφέρεται ότι οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, όπως της μεγάλης απόδοσης που έχουν, της υψηλής ταχύτητας, της ομαλής ροπής και της χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, προτιμώνται πολύ περισσότερο από έναν κινητήρα με ψύκτρες σε διάφορες κατασκευές.

Οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες μπορούν να είναι με αισθητήρες ή και χωρίς αισθητήρες. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται αισθητήρες, όπως για παράδειγμα αισθητήρες Hall-effect είναι πολύ αποτελεσματικοί τόσο σε υψηλές ταχύτητες όσο και σε χαμηλές ταχύτητες. Υπάρχουν όμως και μειονεκτήματα, : αυξάνεται το κόστος τους, είναι δύσκολο να εγκατασταθούν οι αισθητήρες και μεγαλώνει το βάρος τους. Επίσης, σε εφαρμογές που μπορεί να υπάρχει υγρασία, σκόνη και άλλα, υπάρχει περίπτωση η απόδοση τους να αρχίσει να πέφτει επειδή το κύκλωμα που θα ελέγχει το κινητήρα εξαρτάται από τον αισθητήρα. Στην δεύτερη περίπτωση, αντί για αισθητήρες, χρησιμοποιείται η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (Back EMF) για να εντοπίζεται η θέση ή και η ταχύτητα που βρίσκεται ο ρότορας σε σχέση με τον στάτη. Αυτή η μέθοδος έχει αρκετά πλεονεκτήματα, εφόσον δεν χρησιμοποιούνται αισθητήρες μειώνεται το κόστος, το βάρος και μπορεί να πετύχει υψηλές ταχύτητες. Αλλά υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα, όπως στις χαμηλές ταχύτητες και όταν ο ρότορας είναι ακίνητος, το κύκλωμα δεν μπορεί να διαθέτει πληροφορίες σχετικά με τον σωστό έλεγχο του κινητήρα. Η παρούσα εργασία αναφέρεται περιληπτικά στους τύπους των κινητήρων και έπειτα αναφέρεται αναλυτικά στον κινητήρα χωρίς ψύκτρες και χωρίς αισθητήρες με την χρήση της $bemf$. Τέλος, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα, οι εφαρμογές όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η κατασκευή του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα με την χρήση του μικροελεγκτή PIC18f4550.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΤΥΠΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Οι κινητήρες είναι μηχανές διανομής ισχύος και είναι από τις συσκευές που μετατρέπουν τα ηλεκτρικά σήματα σε κίνηση. Οι κινητήρες ανταλλάσσουν ηλεκτρική ενέργεια με μηχανική ενέργεια. Απ' τα είδη κινητήρων που υπάρχουν, πολλοί απ' αυτούς είναι κοινής χρήσης, όπως για παράδειγμα ο κινητήρας χωρίς ψύκτρες (BLDC motor), ο οποίος διαθέτει υψηλή απόδοση, εξαιρετική δυνατότητα ελέγχου, πλεονεκτεί στην εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με άλλους τύπους κινητήρων και χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές [7].

Οι τύποι κινητήρων διαφέρουν ανάλογα με την ισχύ τους, σε AC και DC κινητήρες και την μέθοδο περιστροφής. Παρακάτω αναφέρονται ποια είναι αυτά τα είδη κινητήρων, τα χαρακτηριστικά καθώς και οι χρήσεις τους [7].

- DC Motors
 1. Brushed DC Motor
 2. Brushless DC Motor (BLDC)
 3. Stepper (STP)

- AC Motors
 1. Induction Motor (IM)
 2. Synchronous Motor (PM)

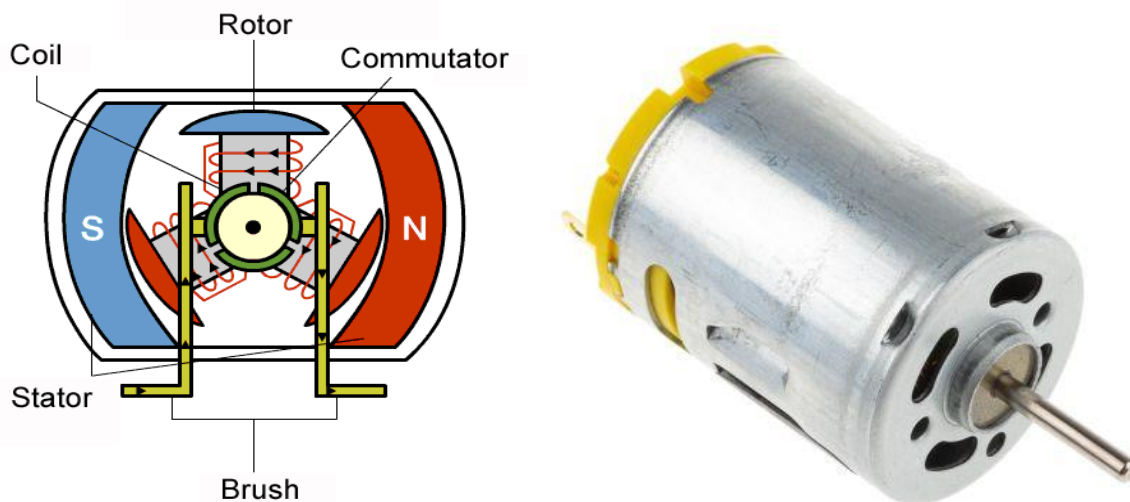
DC Motors

1. Brushed DC Motor (dc κινητήρας με ψύκτρες)

Ο πιο απλός τύπος κινητήρα είναι ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος με ψύκτρες. Οι κινητήρες αυτοί είναι εύκολοι στο χειρισμό και έχουν απλό σχεδιασμό. Ο κινητήρας με ψύκτρες όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1 αποτελείται από τον στάτη ο οποίος έχει μόνιμο μαγνητικό πεδίο, από τον ρότορα όπου βρίσκονται οι περιελίξεις δηλαδή τα πηνία, από τον συλλέκτη και όπως λέει και το όνομα του κινητήρα, από ψύκτρες όπως αναφέρει ο R. Condit [2], [7]. Σε αυτόν τον κινητήρα, το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από πηνία τα οποία είναι διατεταγμένα μέσα σε ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο. Το ρεύμα παράγει μαγνητικά πεδία στα πηνία και με αυτόν τον τρόπο αναγκάζει τη διάταξη του πηνίου να περιστραφεί, καθώς κάθε πηνίο σπρώχνεται από τον έναν πόλο και έλκεται από τον άλλο πόλο του σταθερού πεδίου. Για να διατηρηθεί η περιστροφή, είναι απαραίτητο να αντιστρέφεται συνεχώς το ρεύμα, έτσι ώστε οι πολικότητες των πηνίων να αναστρέφονται συνεχώς, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο τα πηνία, ώστε να συνεχίσουν να "κυνηγούν" τους διαφορετικούς σταθερούς πόλους. Η ισχύς των πηνίων τροφοδοτείται μέσω σταθερών αγώγιμων ψυκτρών που έρχονται σε επαφή με έναν περιστρεφόμενο συλλέκτη αυτή η περιστροφή του συλλέκτη είναι που προκαλεί την αντιστροφή του ρεύματος μέσω των πηνίων. Ο συγκεκριμένος τύπος κινητήρα χρησιμοποιείται ευρέως για το άνοιγμα και το κλείσιμο των disk trays. Επίσης χρησιμοποιούνται συχνά στα αυτοκίνητα για την αναδίπλωση, την τοποθέτηση και την επέκταση των ηλεκτρικών πλευρικών παραθύρων. Ο λόγος που τους καθιστά κατάλληλους για πολλές χρήσεις είναι το χαμηλό τους κόστος. Δεν παύουν όμως να έχουν και τα

Τύποι κινητήρων

μειονεκτήματα τους [7]. Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι πως οι ψύκτρες και οι συλλέκτες φθείρονται σχετικά γρήγορα λόγω της συνεχιζόμενης επαφής τους, με αποτέλεσμα να θέλουν συχνή αντικατάσταση και περιοδική συντήρηση. Ωστόσο η ψύκτρα λόγω της τριβής της, δημιουργεί κι' άλλα προβλήματα όπως θόρυβο, δημιουργία σπινθήρων, ηλεκτρικό θόρυβο και περιορισμένη διάρκεια ζωής όπως αναφέρουν οι P. Visconti και P. Primiceri [1], [7]. Ο συλλέκτης και οι ψύκτρες είναι τα εξαρτήματα κλειδιά ώστε οι κινητήρες DC με ψύκτρες να ξεχωρίζουν από τους άλλους τύπους κινητήρων [7].



Σχήμα 2.1 Κινητήρες dc με ψύκτρες

2. Brushless DC Motor (BLDC) (dc κινητήρας χωρίς ψύκτρες)

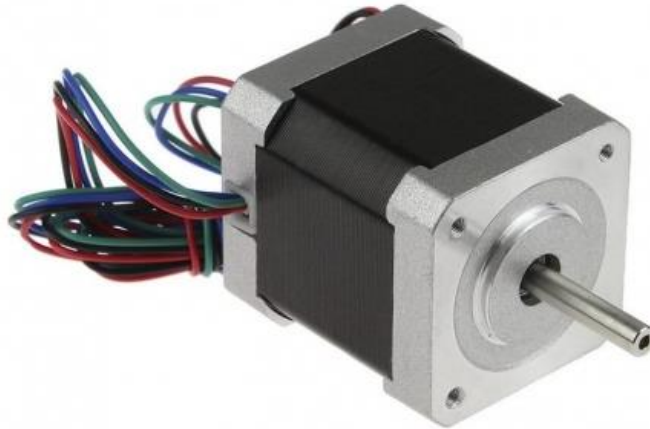
Τα τελευταία χρόνια υπάρχει η τάση να χρησιμοποιούνται πιο πολύ οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες παρά οι κινητήρες με ψύκτρες διότι έχουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως χαμηλό κόστος συντήρησης, συμπαγές μέγεθος, υψηλή αξιοπιστία, αποδοτικότητα, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, υψηλή ταχύτητα, ομαλή ροπή, είναι λιγότερο θορυβώδεις και άλλα πολλά χαρακτηριστικά, που θα αναφερθούν παρακάτω, τους κάνουν να ξεχωρίζουν σύμφωνα με τους P. Visconti, και P. Primiceri [1]. Επίσης λόγω έλλειψης της ψύκτρας και του συλλέκτη είναι ελαφρύτεροι με την απόδοση ισχύος να παραμένει ίδια σε σχέση με τους κινητήρες με ψύκτρες [7].

Οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες μπορεί να είναι με αισθητήρες Hall-effect ή και χωρίς αισθητήρες. Ωστόσο και οι δύο επιλογές έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους, και η επιλογή για τον αν χρησιμοποιηθεί αισθητήρας ή όχι κρίνεται από πολλούς παράγοντες. Στο επόμενο κεφάλαιο αναφέρονται αναλυτικά, όπως για παράδειγμα η λειτουργία, τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα και οι εφαρμογές τους.

3. Stepper Motor (STP) (βηματικός κινητήρας)

Ένας βηματικός κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει με παλμούς. Με κάθε παλμό περιστρέφεται μέσα από μια συγκεκριμένη γωνία (βήμα). Στους κινητήρες αυτούς, ανάλογα με τον αριθμό των

λαμβανόμενων παλμών, μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια η περιστροφή. Επειδή μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια η περιστροφή, αυτοί οι κινητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρέως για την εφαρμογή ρυθμίσεων θέσης. Χρησιμοποιούνται συχνά για τον έλεγχο της τροφοδοσίας χαρτιού σε συσκευές φαξ και εκτυπωτές, δεδομένου ότι οι συσκευές αυτές τροφοδοτούν χαρτί με σταθερά βήματα, τα οποία συσχετίζονται εύκολα με τον αριθμό των παλμών. Τέλος, αυτός ο κινητήρας είναι εύκολο να σταματήσει να λειτουργεί, διότι μπορεί να διακοπεί η περιστροφή αμέσως μόλις διακοπεί το σήμα του παλμού. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται ένας βηματικός κινητήρας [7].



Σχήμα 2.2 Βηματικός κινητήρας

AC Motors

1. Synchronous Motor (PM) (Σύγχρονος κινητήρας)

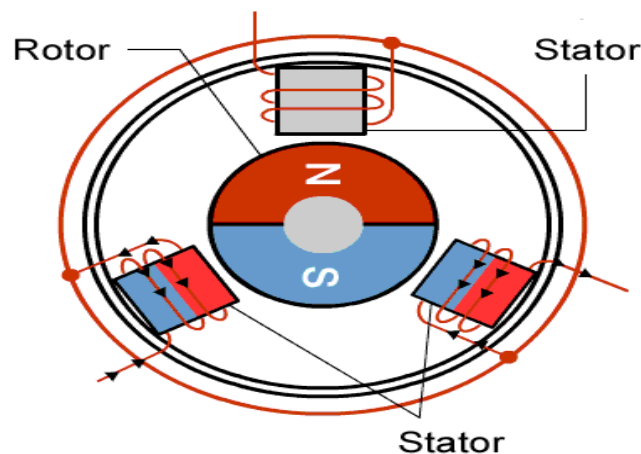
Με τους σύγχρονους κινητήρες, η περιστροφή είναι συγχρονισμένη με τη συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας. Οι σύγχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται συνήθως για την κίνηση των περιστρεφόμενων δίσκων σε φούρνους μικροκυμάτων. Οι μειώσεις ταχύτητας στη μονάδα κινητήρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθούν οι κατάλληλες ταχύτητες περιστροφής για τη θέρμανση των τροφίμων [7].

2. Induction Motor (IM) (Επαγωγικός κινητήρας)

Οι επαγωγικοί κινητήρες αντίθετα με τους σύγχρονους κινητήρες διαφέρουν στο ότι δεν είναι συγχρονισμένοι κινητήρες. Η ταχύτητα περιστροφής τους ποικίλλει ανάλογα με τη συχνότητα, αλλά η κίνηση δεν είναι συγχρονισμένη. Τους επαγωγικούς κινητήρες τους χρησιμοποιούσαν στο παρελθόν σε ηλεκτρικούς ανεμιστήρες και πλυντήρια ρούχων [7].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΧΩΡΙΣ ΨΥΚΤΡΕΣ (BLDC MOTORS)

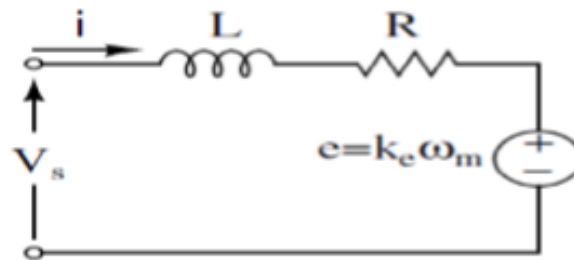
Οι κινητήρες χωρίς ψύκτρεις, ειδικά τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιούνται όλο και πιο συχνά χάρη στην αποδοτικότητα τους και τις υψηλές ταχύτητες που μπορούν να προσφέρουν σε σχέση με άλλους τύπους κινητήρων. Οι κινητήρες χωρίς ψύκτρεις, αντίθετα με τους κινητήρες με ψύκτρεις, δεν χρησιμοποιούν ψύκτρεις και συλλέκτη. Στους κινητήρες με ψύκτρεις, οι ψύκτρεις παρέχουν το ρεύμα διαμέσου του συλλέκτη στα πηνία του ρότορα. Ο κινητήρας χωρίς ψύκτρεις δεν έχει συλλέκτη διότι δεν χρειάζεται να στείλει ρεύμα στα πηνία του ρότορα, επειδή σε αυτό το είδος κινητήρα τα πηνία δεν περιστρέφονται αλλά στερεώνονται στον στάτη και ο ρότορας είναι ένας μόνιμος μαγνήτης. Γι' αυτό το λόγο επειδή τα πηνία είναι ακίνητα στον στάτη, δεν υπάρχει λόγος να χρησιμοποιείται η ψύκτρα και ο συλλέκτης [7]. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η εσωτερική δομή ενός κινητήρα χωρίς ψύκτρεις. Ο ρότορας είναι μόνιμος μαγνήτης και ο στάτης έχει τις περιελίξεις δηλαδή τα πηνία όπως αναφέρουν οι A. B. Ghule και S. S. Subhash [3], [7].



Σχήμα 3.1 Κινητήρας χωρίς ψύκτρεις

Ο κινητήρας χωρίς ψύκτρεις είναι είδος συγχρονισμένου κινητήρα σύμφωνα με τους A. B. Ghule και S. S. Subhash [3]. Στον κινητήρα αυτόν χωρίς ψύκτρεις η περιστροφή επιτυγχάνεται με τον έλεγχο των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από τα πηνία που βρίσκονται στον στάτη. Για να δημιουργηθεί μαγνητικό πεδίο στα πηνία που βρίσκονται στον στάτη θα πρέπει να εφαρμοστεί μία τάση πάνω στα πηνία του στάτη. Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τους στατικούς μαγνήτες παραμένει σταθερό. Για να αλλάξουμε την ταχύτητα περιστροφής θα πρέπει να αλλάξουμε την τάση για τα πηνία στον στάτη. Σε αυτόν τον κινητήρα ο ρότορας είναι που περιστρέφεται, δηλαδή ο μόνιμος μαγνήτης και η περιστροφή επιτυγχάνεται με την αλλαγή της κατεύθυνσης των μαγνητικών πεδίων που παράγεται γύρω από τα στάσιμα πηνία. Για να ελεγχθεί η περιστροφή, θα πρέπει να ρυθμιστεί και το μέγεθος και η κατεύθυνση του ρεύματος στα πηνία. Το ρεύμα στα σταθερά πηνία ελέγχεται από το εξωτερικό. Όπως ειπώθηκε και στην αρχή, επειδή ο ρότορας είναι ένας μόνιμος μαγνήτης, δεν χρειάζεται ρεύμα, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για ψύκτρεις και για συλλέκτη. Ωστόσο, δεν πρέπει να ξεχνάει κανείς ότι σε ένα κινητήρα χωρίς ψύκτρεις παίζει πολύ μεγάλο ρόλο ο τύπος του ελεγκτή που χρησιμοποιείται, ο οποίος μπορεί να επηρεάσει δραματικά την απόδοση ενός κινητήρα. Επίσης

και η διαδικασία προγραμματισμού μπορεί να βοηθήσει πάρα πολύ. Για να λειτουργήσει σωστά ένας κινητήρας χωρίς ψύκτρες, ο ελεγκτής θα πρέπει να γνωρίζει τη θέση και την ταχύτητα του ρότορα του κινητήρα και γι' αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται είτε κάποιος αισθητήρας όπως ο hall-effect είτε μπορεί να μην χρησιμοποιηθεί αισθητήρας και να χρησιμοποιηθεί η $bemf$ δηλαδή η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη. Στο επόμενο κεφάλαιο αναφέρεται αναλυτικότερα η λειτουργία της $bemf$ [7-8]. Το παρακάτω σχήμα δείχνει το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα BLDC όπως αναφέρουν οι A. B. Ghule και S. S. Subhash [3].



Σχήμα 3.2 Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα χωρίς ψύκτρες.

Η διαφορική εξίσωση που ορίζει το ηλεκτρικό κομμάτι του μοντέλου μπορεί να γραφεί ως,

$$v = iR + L \frac{di}{dt} + E \quad (3.1)$$

Όπου,

V = DC voltage applied in Volts.

L = Inductance of the windings in Henry.

R = Resistance of the windings in Ohms.

$E = K_b \omega =$ Back emf of the motor.

$K_b =$ Back emf constant in Volts/ rad/ sec.

$\omega =$ Speed in rad/ sec.

$E =$ Disturbance as input

3.1 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα

Οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλους τύπους κινητήρων και λίγα μειονεκτήματα. Οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες υπερτερούν σε αρκετά σημεία σε σχέση με τους άλλους τύπους κινητήρων. Ένα πλεονέκτημα τους είναι η υψηλή απόδοση τους όπως αναφέρουν οι A. B. Ghule και S. S. Subhash [3], [7] και επιπλέον, η απόδοση ενός κινητήρα χωρίς ψύκτρες φτάνει περίπου το 85-90%, ενώ στους κινητήρες με ψύκτρες είναι μόνο 75-80% αποδοτικοί σύμφωνα με μία έρευνα των A. Jadhav, K. Salve, M. Shingote, S. Bhujade και A. Varade [5], διότι οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες μπορούν να ελέγχουν συνεχώς τη μέγιστη δύναμη περιστροφής (ροπή). Αντίθετα οι

Κινητήρες χωρίς ψύκτρες (BLDC MOTORS)

κινητήρες με ψύκτρες, μπορούν να φτάσουν την μέγιστη ροπή σε ορισμένα μόνο σημεία της περιστροφής. Ο κινητήρας με ψύκτρες, σε σύγκριση με τον κινητήρα χωρίς ψύκτρες, για να δώσει την ίδια ροπή, θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσει μεγαλύτερους μαγνήτες. Γι' αυτό το λόγο και οι μικροί κινητήρες χωρίς ψύκτρες μπορούν να παράγουν σημαντική ισχύ [7].

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα, σχετιζόμενο με το προηγούμενο πλεονέκτημα που αναφέρθηκε, είναι η δυνατότητα ελέγχου. Οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες μπορούν να ελέγχονται, χρησιμοποιώντας μηχανισμούς ανάδρασης (ανατροφοδότηση-feedback), ώστε να παρέχουν με ακρίβεια την επιθυμητή ροπή και την ταχύτητα περιστροφής. Ο έλεγχος ακρίβειας βοηθάει στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την παραγωγή θερμότητας και σε κάποιες περιπτώσεις όπου οι κινητήρες τροφοδοτούνται με μπαταρία, παρατείνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας σύμφωνα με τους P. Visconti και P. Primiceri [1], [7].

Λόγω της έλλειψης της ψύκτρας και του συλλέκτη προκύπτουν και κάποια πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα, οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες αποκτάνε καλύτερη αξιοπιστία [1], και είναι ελαφρύτεροι όπως αναφέρουν οι P. Visconti και P. Primiceri [1], [7]. Επίσης, οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες προσφέρουν υψηλή ανθεκτικότητα, χαμηλή παραγωγή ηλεκτρικού θορύβου και χρειάζονται λιγότερη συντήρηση επειδή δεν έχουν ψύκτρα. Αντίθετα, στους κινητήρες με ψύκτρες, οι ψύκτρες και ο συλλέκτης (commutator) φθείρονται εξ αιτίας της συνεχούς κινούμενης επαφής και παράγουν σπινθήρες όπου γίνεται επαφή. Λόγω των ισχυρών σπινθήρων που τείνουν να εμφανίζονται στις περιοχές όπου οι ψύκτρες περνούν πάνω από τα κενά του συλλέκτη με αποτέλεσμα να δημιουργείται ηλεκτρικός θόρυβος. Αυτός είναι και ένας σημαντικός λόγος για τον οποίο οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες χρησιμοποιούνται περισσότερο από τους άλλους τύπους κινητήρων σε εφαρμογές όπου είναι σημαντικό να αποφεύγεται ο ηλεκτρικός θόρυβος. Γενικά, οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες, θεωρούνται πως είναι περισσότερο αξιόπιστοι και αποτελεσματικοί και μπορούν να φτάσουν πολύ υψηλές ταχύτητες σύμφωνα με τους A. B. Ghule και S. S. Subhash [3], [7].

Αν και οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες υπερτερούν σε πολλά σημεία έχουν όμως και μερικά μειονεκτήματα. Οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες είναι ακριβότεροι, αν και συχνά, λόγω της υψηλής τους απόδοσης, με τον καιρό αποσβένουν το κόστος αυτό. Επίσης, χρειάζονται υψηλότερες απαιτήσεις για αλγορίθμους ελέγχου και έχουν γενικά πιο περίπλοκα ηλεκτρονικά όπως αναφέρουν οι P. Visconti και P. Primiceri [1]. Άλλο ένα μειονέκτημα τους είναι πως χρειάζονται ηλεκτρονικό ελεγκτή ταχύτητας (ESC) για να λειτουργήσουν και να μετακινήσουν τον ρότορα. Αν χρησιμοποιηθεί κινητήρας χωρίς ψύκτρες και χωρίς αισθητήρες προκύπτει ακόμα ένα μειονέκτημα γιατί θα υπάρχει χαμηλή ροπή εκκίνησης, ωστόσο, αν χρησιμοποιηθεί αισθητήρας λύνεται το πρόβλημα και θα έχει την απαραίτητη ροπή εκκίνησης, αλλά η καλωδίωση του αισθητήρα στον ESC εμφανίζει συχνά προβλήματα όσο αφορά την αξιοπιστία [7]. Παρά τα μειονεκτήματα τους όμως, σύμφωνα με τους P. Visconti και P. Primiceri μπορούν να προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα που δεν παρέχονται στους κινητήρες με ψύκτρες γι' αυτό και οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες είναι μία αρκετά καλή λύση [1].

3.2 Χρήσεις – εφαρμογές

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες προσφέρουν υψηλή απόδοση και δυνατότητα ελέγχου και μεγάλη διάρκεια ζωής. Χάρη στην αποτελεσματικότητα και την μεγάλη

διάρκεια ζωής τους, συχνά προτιμώνται σε συσκευές που λειτουργούν συνεχώς. Επίσης χρησιμοποιούνται εδώ και καιρό σε drones, σε πλυντήρια, σε κλιματιστικά, και σε άλλα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης [7]. Πρόσφατα, χρησιμοποιούνται σε ανεμιστήρες σύμφωνα με τους P. Visconti και P. Primiceri [1] [7], όπου η υψηλή αποδοτικότητα τους έχει συμβάλει σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας [7].

Μία άλλη χρήση τους είναι για την οδήγηση της ηλεκτρικής σκούπας. Σε κάποια από τις εφαρμογές αυτές, με μία αλλαγή στο πρόγραμμα ελέγχου, έγινε ένα μεγάλο άλμα στην ταχύτητα περιστροφής. Αυτό είναι και ένα παράδειγμα της εξαιρετικής δυνατότητας ελέγχου που προσφέρουν οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες [7].

Οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περιστροφή των οδηγών των σκληρών δίσκων, όπου η ανθεκτικότητα των κινητήρων διατηρεί τους οδηγούς (drives) ώστε να λειτουργούν αξιόπιστα και μακροπρόθεσμα, ενώ η ενεργειακή τους αποδοτικότητα συμβάλει στη μείωση της ενέργειας σε μια περιοχή όπου αυτό γίνεται όλο και πιο σημαντικό [7].

Επίσης οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες όπως αναφέρουν οι P. Visconti και P. Primiceri μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία, στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε διάφορες ιατρικές συσκευές και στην ρομποτική. Επιπλέον βρίσκονται σε σκληρούς δίσκους, σε συσκευές αναπαραγωγής CD / DVD, σε αντλίες, καφετιέρες και σε πολλές άλλες εφαρμογές. Ακόμα, είναι μία καλή επιλογή για τα τηλεκατευθυνόμενα και φορητά ηλεκτρικά εργαλεία διότι αυξάνουν την διάρκεια της μπαταρίας τους. Χάρη στο μικρό τους μέγεθος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπου απαιτούνται ακριβείς κινήσεις ελέγχου, σε στενούς χώρους και σε εφαρμογές που απαιτούν λίγο βάρος όπως για παράδειγμα σε ιατρικές εφαρμογές [1].

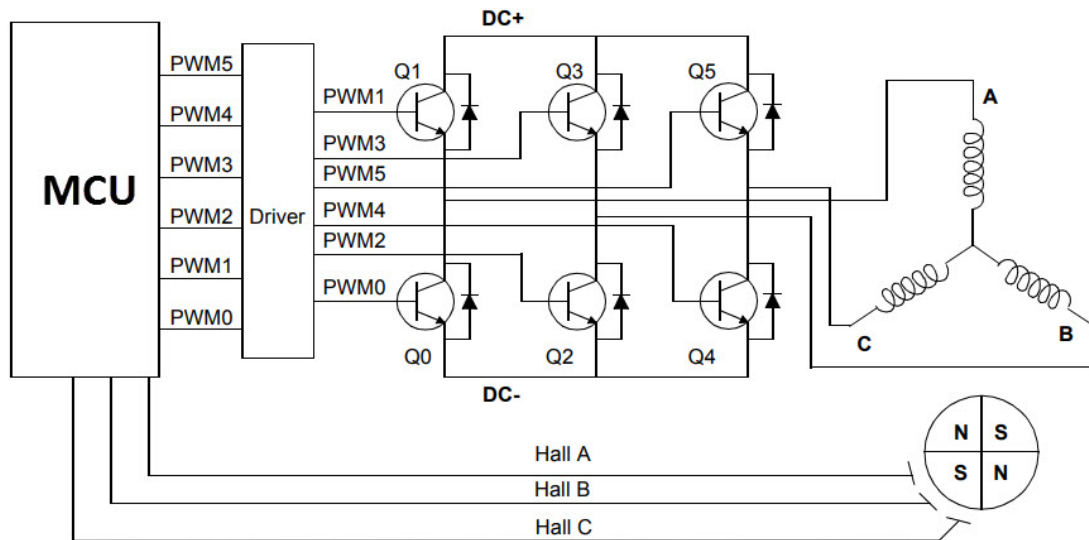
Γι' αυτό το λόγο μπορεί κανείς να περιμένει από τους κινητήρες χωρίς ψύκτρες να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών στο μέλλον. Για παράδειγμα θα χρησιμοποιούνται ευρέως για να οδηγούν τα ρομπότ που είναι για εξυπηρέτηση και τα μικρά ρομπότ που παρέχουν υπηρεσίες σε άλλους τομείς και όχι σε τομείς όπως για κατασκευή [7].

3.3 Sensored BLDC Motor

Οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες είναι δύο ειδών, αυτοί που χρησιμοποιούν αισθητήρες και αυτοί που δεν χρησιμοποιούν αισθητήρες. Οι κινητήρες με αισθητήρες, χρησιμοποιούν αισθητήρες θέσης οι οποίοι ανατροφοδοτούν τις πληροφορίες στον ελεγκτή και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για να διασφαλίσουν ότι το μοτίβο κίνησης που παραδίδεται στον ελεγκτή συγχρονίζεται τέλεια με τη θέση του ρότορα. Με λίγα λόγια, για να δουλέψει το κύκλωμα, ο ελεγκτής θα πρέπει να γνωρίζει την θέση του ρότορα και αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση των αισθητήρων όπως είπαν και οι P. Visconti και P. Primiceri [1], [7]. Επίσης, κάποιοι κινητήρες με αισθητήρες, αποτελούνται από αισθητήρες που μπορούν να ρυθμιστούν με διάφορους τρόπους οι οποίοι όμως αισθητήρες, τυπικά, είναι διατεταγμένοι είτε σε διάστημα των 60 μοιρών είτε των 120 μοιρών. Ένα βασικό πλεονέκτημα που έχουν οι κινητήρες που χρησιμοποιούν αισθητήρες είναι ότι δημιουργούν ένα σύστημα κλειστού βρόχου το οποίο επιτρέπει στον ελεγκτή να γνωρίζει τη θέση του ρότορα και επομένως να συγχρονίζει με ακρίβεια το μοτίβο κίνησης. Όταν χρησιμοποιούνται αισθητήρες ο κινητήρας είναι

Κινητήρες χωρίς ψύκτρεις (BLDC MOTORS)

ιδανικός για υψηλές και για χαμηλές ταχύτητες, με χαμηλή ροπή. Όμως το πρόβλημα σε αυτούς τους κινητήρες είναι ότι εξαρτώνται απόλυτα από τους αισθητήρες για να μπορούν να λειτουργούν σωστά. Αν υπάρξει κάποιο πρόβλημα στον αισθητήρα το κύκλωμα δεν θα γνωρίζει πληροφορίες για τον κινητήρα και δεν θα μπορεί να δουλέψει. Οπότε, σε εφαρμογές που υπάρχει πολλή υγρασία, σκόνη και δόνηση, μπορούν να αποτύχουν στην απόδοση του κινητήρα [8]. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται πως είναι ένα σύστημα ελέγχου για κινητήρες χωρίς ψύκτρεις με την χρήση αισθητήρα Hall.

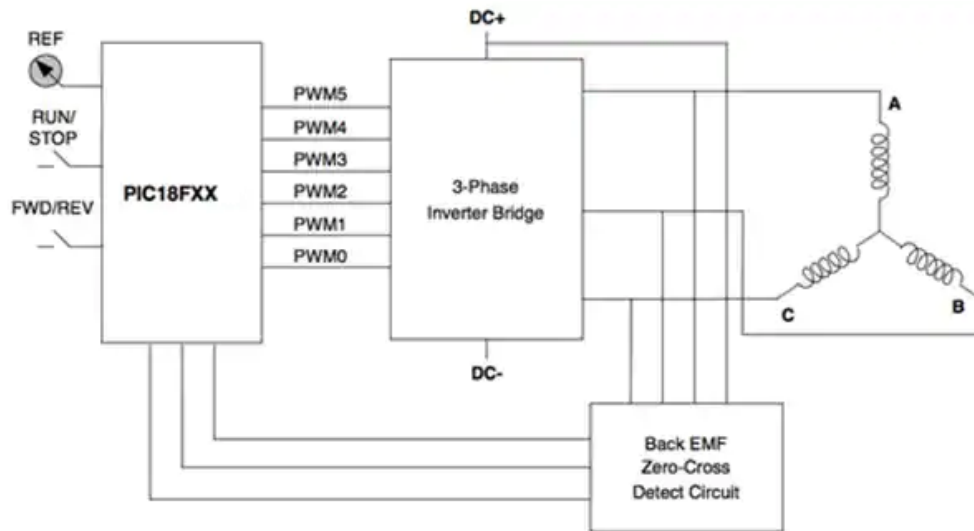


Σχήμα 3.3 Σύστημα ελέγχου για κινητήρες χωρίς ψύκτρεις με την χρήση αισθητήρα Hall

3.4 Sensorless BLDC Motor

Ένας BLDC κινητήρας χωρίς αισθητήρες για να λειτουργήσει χρειάζεται έναν ηλεκτρονικό ελεγκτή ταχύτητας (ESC). Οπότε οι κινητήρες χωρίς αισθητήρες μπορούν να λειτουργήσουν σε ανοιχτό βρόγχο επειδή δεν έχουν ενσωματωμένους αισθητήρες, αν και αυτό δεν συμβαίνει εξ ολοκλήρου και ο λόγος που δεν συμβαίνει είναι η ηλεκτρική έννοια που λέγεται αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (Back EMF) [8]. Για να λειτουργήσει σωστά ένας κινητήρας χωρίς ψύκτρεις χωρίς αισθητήρες, θα πρέπει ο ελεγκτής να γνωρίζει τη θέση και την ταχύτητα του ρότορα του κινητήρα και γι' αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται η τάση $bemf$ δηλαδή η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη. Η τάση $bemf$ είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Με λίγα λόγια ο κινητήρας δεν λαμβάνει μόνο την εφαρμοζόμενη τάση αλλά παράγει επίσης τη δική του τάση, την $bemf$ [9]. Στον BLDC κινητήρα η τάση $bemf$ μπορεί να αντικαταστήσει τον αισθητήρα. Ο BLDC κινητήρας κατά την λειτουργία του δημιουργεί την τάση $bemf$, ενώ σε κατάσταση απενεργοποίησης του κινητήρα η $bemf$ είναι 0 και αυξάνεται όταν αυξάνεται η ταχύτητα του κινητήρα σύμφωνα με τους A. R. Sutar, G. G. Bhide και J. J. Mane [4]. Η τάση $bemf$ (αντιηλεκτρεγερτική δύναμη) η οποία είναι τραπεζοειδής κυματομορφή αν και σε κάποιες περιπτώσεις λόγω του σχεδιασμού και των περιορισμών κατασκευής μπορεί να μην είναι ακριβώς τραπεζοειδής όπως αναφέρουν οι C. Bharatiraja, S. Babu, V. Krishnakumar, P. Sanjeevikumar και G. Nixon [6]. Ένας τέτοιος κινητήρας έχει μόνιμους μαγνήτες στερεωμένους στον δρομέα με τους ηλεκτρομαγνήτες τοποθετημένους γύρω από την άκρη του κινητήρα. Όταν ο κινητήρας απορροφά ταχύτητα αρχίζει να παράγει ηλεκτρεγερτική δύναμη στα πηνία του στάτη. Για παράδειγμα σε ένα σύστημα που χρησιμοποιεί αυτό το είδος του κινητήρα, όταν ο ρότορας αρχίζει να περιστρέφεται (για

παράδειγμα το bicycle dynamo), αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [8]. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το σύστημα ελέγχου για κινητήρες χωρίς ψύκτρες χωρίς αισθητήρες με την χρήση της bemf.



Σχήμα 3.4 Σύστημα ελέγχου για κινητήρες χωρίς ψύκτρες χωρίς αισθητήρες με την χρήση της BEMF

Πλεονεκτήματα

Ένα βασικό στοιχείο αυτού του είδους κινητήρα είναι πως η συχνότητα που παράγεται από την bemf είναι άμεσα ανάλογη με την ταχύτητα του κινητήρα. Άρα, αν ένας BLDC χωρίς αισθητήρες που μπορεί να διαβάσει αυτή την συχνότητα, μπορεί και να καθορίσει την ταχύτητα του κινητήρα και να προσαρμόσει ανάλογα και το μοτίβο της κίνησης [8].

Επειδή χρησιμοποιείται η τάση bemf δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν οι αισθητήρες με αποτέλεσμα να τους κάνει φθηνότερους και καταλληλότερους σε εφαρμογές σε σκληρά περιβάλλοντα που έχουν σκόνη, υγρασία και άλλα όπως αναφέρουν οι A. R. Sutar, G. G. Bhide και J. J. Mane [4].

Άλλα πλεονεκτήματα, όταν δεν χρησιμοποιούνται αισθητήρες, είναι οι υψηλές ταχύτητες και λόγω της απώλειας των αισθητήρων έχουμε λιγότερες διασυνδέσεις μεταξύ της μονάδας οδηγού και του κινητήρα [8].

Μειονεκτήματα

Το σημαντικό τους μειονέκτημα βρίσκεται στις χαμηλές ταχύτητες όπου η bemf είναι πολύ αδύναμη με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να διαβαστεί αξιόπιστα. Και αυτό είναι ένα από τα βασικότερα προβλήματα όπου η εκκίνηση του κινητήρα αποτελεί ένα αρνητικό ζήτημα. Άλλο ένα μειονέκτημα σε εφαρμογές που δεν χρησιμοποιείται αισθητήρας και χρησιμοποιείται η bemf, είναι ότι, αν και ο ρότορας περιστρέφεται και μπορεί να λειτουργήσει τέλεια, υπάρχει πρόβλημα όταν ο ρότορας είναι ακίνητος. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν ο ρότορας δεν στρέφεται δεν δημιουργείται bemf με

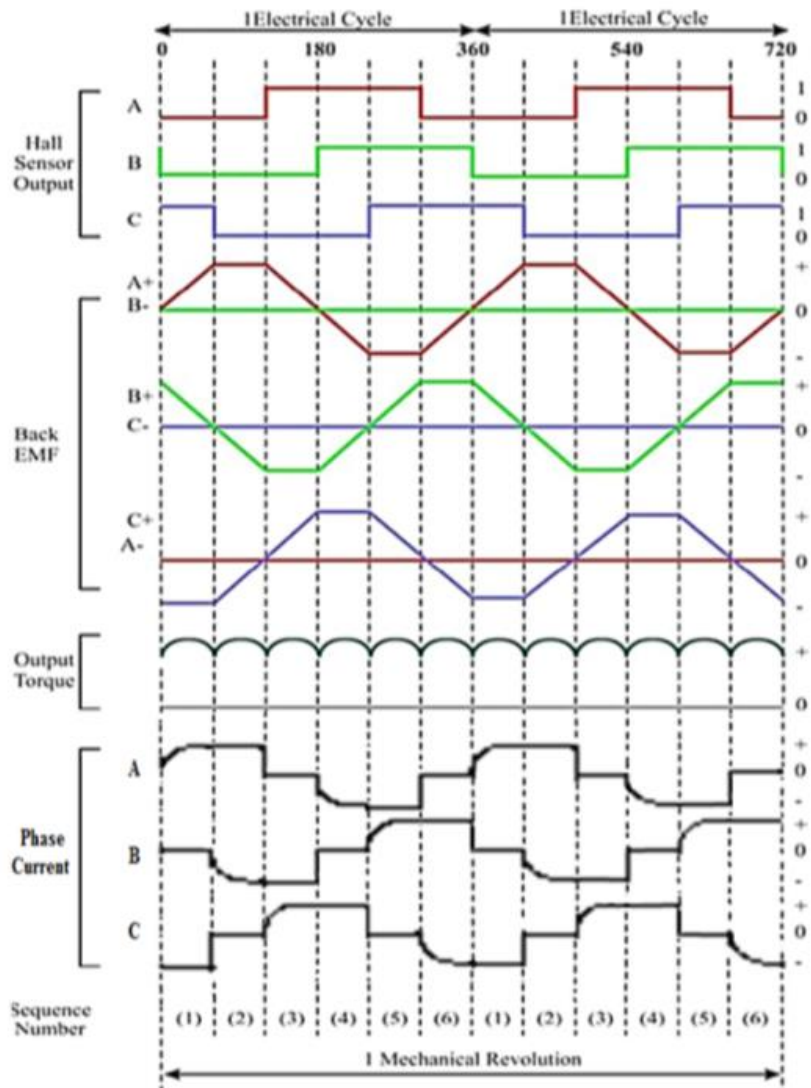
αποτέλεσμα, χωρίς τη $bemf$ το κύκλωμα δεν διαθέτει τις πληροφορίες για τον σωστό έλεγχο του κινητήρα [8-9].

3.5 Διαφορές κινητήρων χωρίς ψύκτρεις με αισθητήρες και χωρίς αισθητήρες

Θα μπορούσε να ειπωθεί πως ένας κινητήρας χωρίς ψύκτρεις χωρίς αισθητήρες με έναν προηγμένο ελεγκτή μπορεί εύκολα να ξεπεράσει έναν κινητήρα με ψύκτρεις με αισθητήρες με ελεγκτή χαμηλής ποιότητας. Αλλά το πιο σημαντικό πράγμα που δεν πρέπει να ξεχνάει κανείς για το ποιον κινητήρα θα διαλέξει από τους δύο, βασίζεται στην απόδοση, την εφαρμογή, το περιβάλλον, τη διάρκεια ζωής και το κόστος. Δηλαδή, η επιλογή για το αν θα χρησιμοποιηθεί αισθητήρας ή όχι γίνεται ανάλογα με την εφαρμογή που τον χρειάζεται κάποιος και το τι θέλει να πετύχει, για παράδειγμα τι ταχύτητα και τι ροπή θα χρειαστεί. Σε μία εφαρμογή που χρειάζεται χαμηλή ταχύτητα και υψηλή ροπή στρέψης θα ήταν καλύτερο να χρησιμοποιηθεί ένας κινητήρας BLDC με αισθητήρες αντί για ένα σύστημα BLDC χωρίς αισθητήρα που θα έπρεπε να παλέψει για να διατηρήσει μία αξιόπιστη ταχύτητα. Ενώ σε μία εφαρμογή με υψηλές ταχύτητες σε σκληρά περιβάλλοντα θα ήταν καλύτερα να χρησιμοποιηθεί ένας BLDC χωρίς αισθητήρες και όχι ένας BLDC με αισθητήρες ο οποίος θα μπορούσε να παρουσιάσει πιθανά προβλήματα αξιοπιστίας [8].

Σε μία εφαρμογή που χρειάζεται γρήγορη εκκίνηση και έναν σύντομο κύκλο εργασιών, θα επιλεγούν οι BLDC κινητήρες με αισθητήρες διότι είναι πιο εύκολο να χρησιμοποιηθούν. Αντίθετα, αν χρειάζεται έναν μακροχρόνιο κύκλο λειτουργίας σε ένα δύσκολο περιβάλλον, τότε θα ήταν καλύτερο να επιλεγούν οι BLDC κινητήρες χωρίς αισθητήρες όπου και υπάρχουν σημαντικά οφέλη από την χρήση τους σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Επίσης σε εφαρμογές που απαιτείται χαμηλή ταχύτητα για μεγάλο χρονικό διάστημα τότε ο κινητήρας χωρίς ψύκτρεις με αισθητήρες θα ήταν η καλύτερη λύση [8]. Είτε χρησιμοποιηθεί αισθητήρες είτε όχι και οι δύο περιπτώσεις είναι εξίσου καλές.

Με την έρευνα που έγινε από τους P. Visconti και P. Primiceri, στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα σήματα με την χρήση των αισθητήρων σε σχέση με την $bemf$, δηλαδή με την τάση, όταν υπάρχει κίνηση μεταξύ των μαγνητών του ρότορα και του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται στα πηνία που βρίσκονται στον στάτη δίνοντας ρεύμα [1].



Σχήμα 3.5 Σήματα εξόδου με την χρήση αισθητήρα Hall, αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης, σήμα εξόδου ροπής και σήματα ρεύματος της κάθε φάσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° : ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

4.1 Απαιτούμενο υλικό

Για την κατασκευή ενός ελεγχόμενου κινητήρα με μικροελεγκτή PIC18F4550 BLDC χωρίς αισθητήρες χρειάζονται τα εξής εξαρτήματα [10] :

Printed circuit board

12V 2A power supply

Sensorless Brushless DC Motor

Pic18f4550 microcontroller

Fuse 10A

LM339 quad comparator IC

10k ohm potentiometer

Resistors:

6 x 10k ohm resistor

6 x 33k ohm resistor

6 x 10 ohm resistor

Capacitors:

3 x 2.2uF

1 x 1000uF

3 x 10uF

2 x 22pF

Diode:

3 x 1N4148

1 x 1N4007

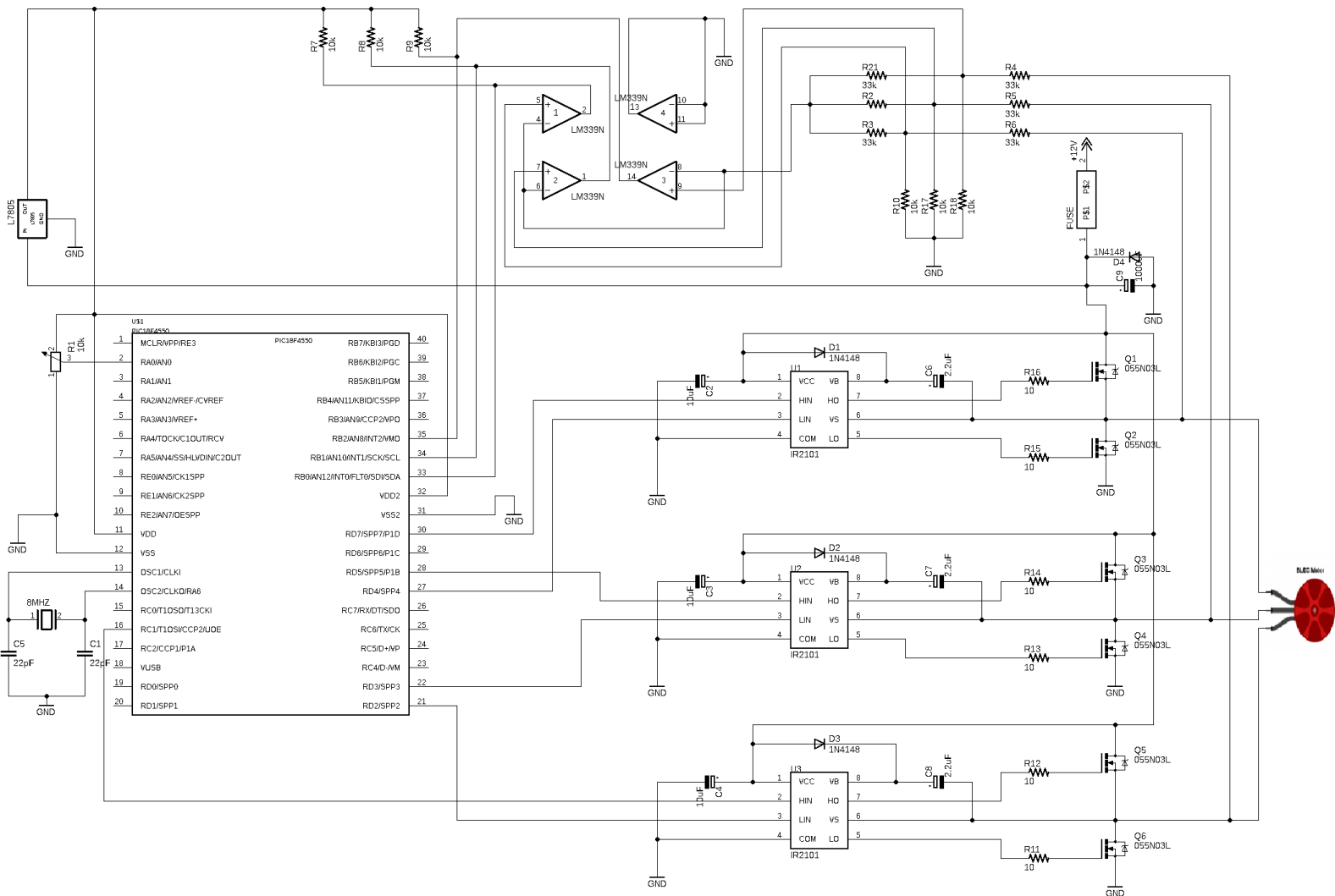
3 x IR2101 gate driver IC

6 x 055N03L N-type mosfet

16 MHz crystal oscillator

78s05 voltage stabiliser

4.2 Σχηματικό διάγραμμα και λειτουργία του κυκλώματος



Σχήμα 4.1 Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα

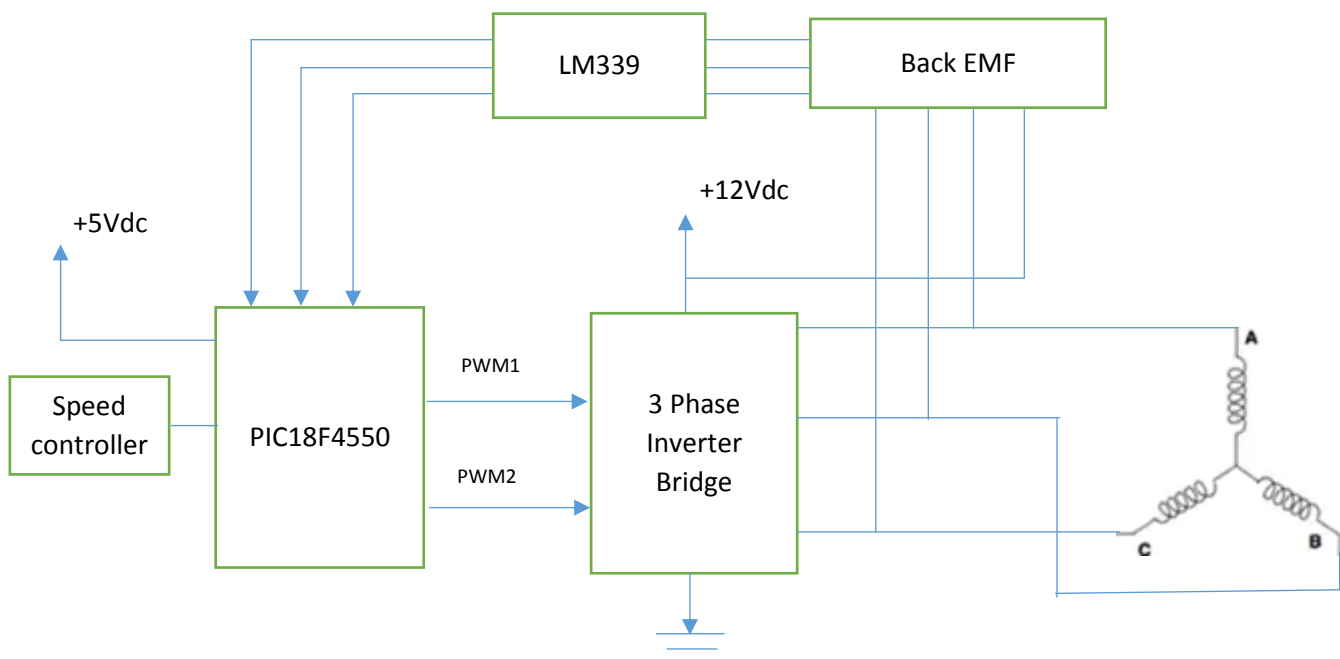
Λειτουργία του κυκλώματος

Αρχικά στο κύκλωμα χρησιμοποιούνται δύο πηγές τάσης, η μία θα είναι τα 12V τα οποία χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν την τριφασική γέφυρα και έτσι τον κινητήρα BLDC και η άλλη πηγή τάσης είναι τα 5V που χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν τον μικροελεγκτή. Τα 12V δίνονται από το τροφοδοτικό το οποίο είναι 12V/2A και για τα 5V χρησιμοποιείται ο σταθεροποιητής τάσης 78s05, ο οποίος παίρνει τα 12V στην είσοδο του και βγάζει στην έξοδο τα 5V που χρειάζονται. Να σημειωθεί πως όλοι οι γειωμένοι ακροδέκτες είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Πριν ξεκινήσει η περιγραφή της υπόλοιπης λειτουργίας του κυκλώματος, χρησιμοποιείται μία ασφάλεια στο 1A ώστε σε περίπτωση κάποιου βραχυκυκλώματος να καεί η ασφάλεια και έτσι να σταματήσει να τροφοδοτείται το κύκλωμα με αποτέλεσμα να προστατευτεί το υπόλοιπο κύκλωμα. Επίσης, για την καλύτερη ασφάλεια του κυκλώματος χρησιμοποιείται μία διάοδο, έτσι, σε περίπτωση που δοθεί ανάποδα η τροφοδοσία, θα σταματήσει να τροφοδοτείται το κύκλωμα. Έπειτα υπάρχει και ένας πυκνωτής στα 1000uF επειδή ο κινητήρας ανεβάζει απότομα στροφές. Στο κύκλωμα χρησιμοποιούνται 3 αντιστάσεις των 10K σαν διαχωριστές τάσεις. Επειδή ο κινητήρας είναι χωρίς

Κατασκευή του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα

ψύκτρεις έχουμε 3 φάσεις οπότε χρησιμοποιούνται 3 αντιστάσεις των 33K που είναι συνδεδεμένες στις φάσεις του κινητήρα. Επίσης υπάρχουν άλλες 3 αντιστάσεις των 33K που παράγουν την εικονική γείωση. Για να συγκριθεί η $bemf$ της κάθε φάσης σε σχέση με την εικονική γείωση αφού χρειάζεται να εντοπιστεί η "θέση 0" της κάθε φάσης, χρησιμοποιούνται 3 συγκριτές. Στο συγκεκριμένο κύκλωμα χρησιμοποιείται ο συγκριτής LM339. Η εικονική γείωση συνδέεται στην είσοδο αντιστροφής (-) των τριών συγκριτών όπως φαίνεται στο διάγραμμα του κυκλώματος. Η $bemf$ A συνδέεται στο ποδαράκι της μη αντιστροφής (+) εισόδου του συγκριτή αριθμού 1, η $bemf$ B συνδέεται στο θετικό ακροδέκτη του συγκριτή 3. Ο συγκριτής 4 δεν χρησιμοποιείται και όλοι οι ακροδέκτες του πρέπει να γειωθούν. Εάν η μη αντιστροφή τάση (+) είναι μεγαλύτερη από την αντιστροφή τάση (-) και αντίθετα, τότε η έξοδος του συγκριτή είναι λογικό 1. Χρησιμοποιούνται 3 αντιστάσεις των 10K ως ελκτικές αντιστάσεις για τις εξόδους των LM339 αφού αυτές είναι ανοιχτοί συλλέκτες. Οι έξοδοι των 3 συγκριτών συνδέονται στον PIC18f4550 στα εξωτερικά ποδαράκια INTO (RB0), INT1 (RB1) και INT2 (RB2) αντίστοιχα για τις $bemf$ A, $bemf$ B και $bemf$ C. Ο PIC18f4550 έχει δύο module, το CCP (Capture/Compare/PWM) και το ECCP (Enhanced CCP). Το CCP Module μπορεί να παράγει ένα PWM σήμα στην καρφίτσα RC1. Το ECCP module μπορεί να παράγει δύο PWM σήματα στο ποδαράκι RD5 (full bridge reverse mode) και στο ποδαράκι RD7 (full bridge forward mode). Έτσι μ' εκείνο υπάρχουν 3 PWM σήματα τα οποία μετά συνδέονται στο ποδαράκι HIV του IR2101 (pwming high side mosfet only). Στο συγκεκριμένο κύκλωμα ο PIC18f4550 λειτουργεί μ' έναν κρυσταλλικό ταλαντωτή 8MHz και το ποδαράκι 1 το MCLR δεν είναι πουθενά συνδεδεμένο [10].

Στο σχήμα 4.2 φαίνεται το block διάγραμμα του κυκλώματος



Σχήμα 4.2 block διάγραμμα του κυκλώματος

Brushless dc motor

Ο συγκεκριμένος κινητήρας είναι dc κινητήρας χωρίς ψύκτρες υψηλής ταχύτητας και ισχύος. Παράγεται απ' την Ιαπωνική εταιρεία NIDEC. Υπάρχουν 2PCS NSK ρουλεμάν μέσα στον κινητήρα, ο ρότορας είναι μαγνήτης νεοδυμίου. Το εξωτερικό περίβλημα είναι φτιαγμένο από ανοξείδωτο ατσάλι και κράμα αλουμινίου. Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται τα χαρακτηριστικά του κινητήρα που χρησιμοποιήθηκε για το συγκεκριμένο κύκλωμα.



Σχήμα 4.3 Κινητήρας χωρίς ψύκτρες της εταιρείας NIDEC

Με τα εξής χαρακτηριστικά:

Brand: NIDEC

Rated Voltage: 36V DC

No Load Current: 0.38A

Operating Range: 10~36V

No Load Speed: 24500 r/min (36V)

Power: 300W (MAX)

Net weight: 102g

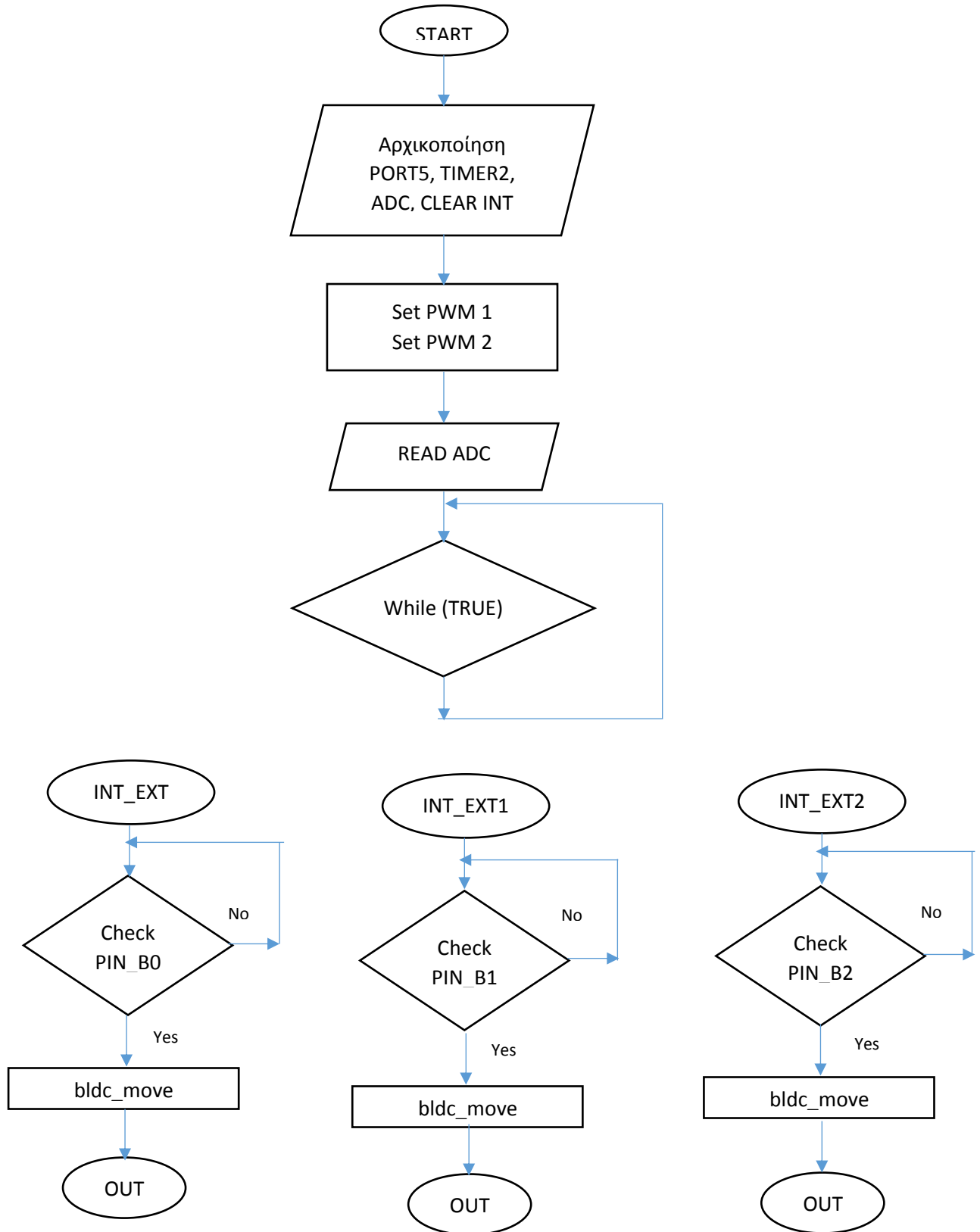
Voltage (V)	Current (A)	No-Load	Speed (r/min)	No-Load
12	0.2		8400	
18	0.23		12300	
24	0.25		16500	
30	0.3		20700	
36	0.38		24500	

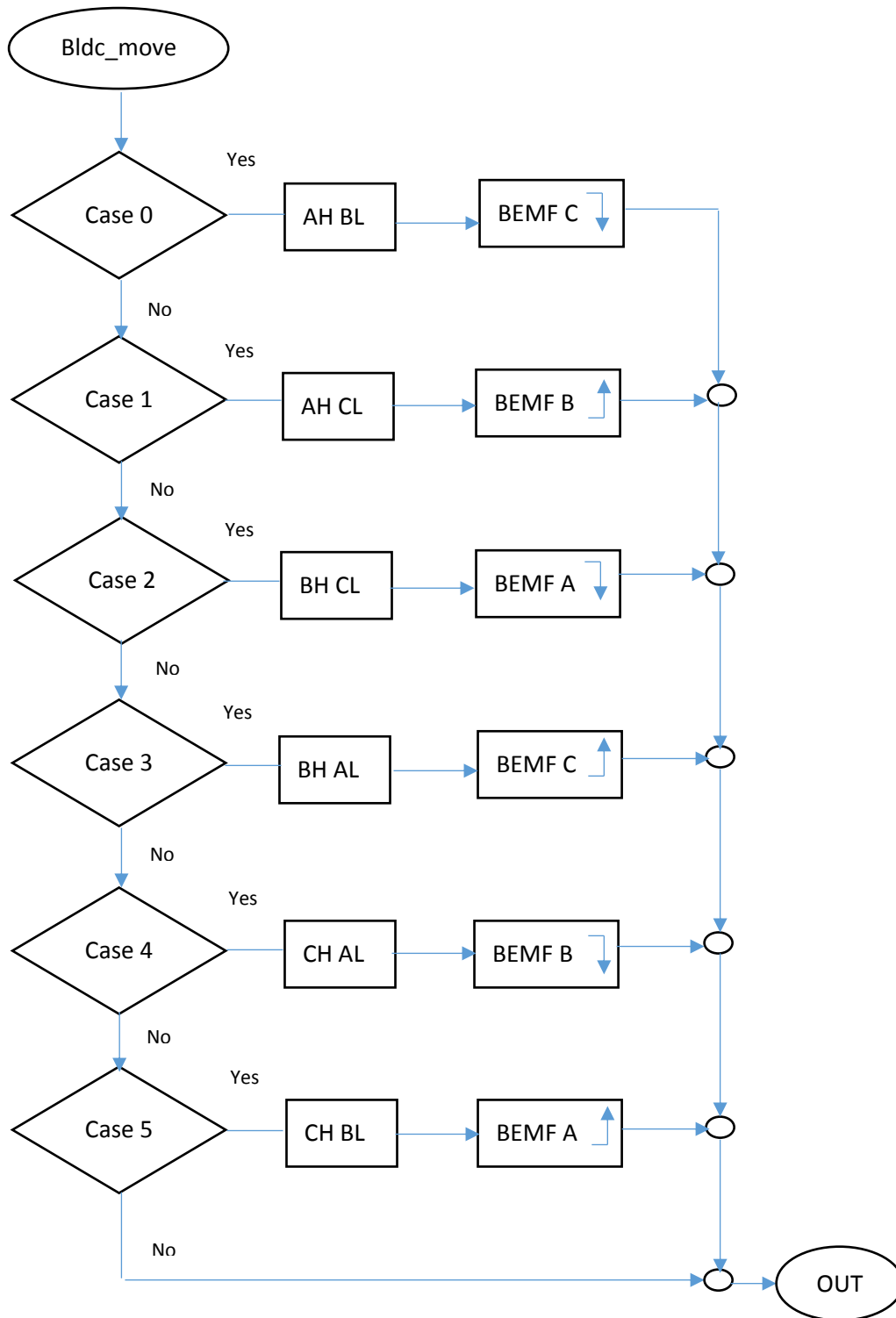
Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά του κινητήρα χωρίς ψύκτρες της εταιρείας NIDEC

4.3 Κώδικας C

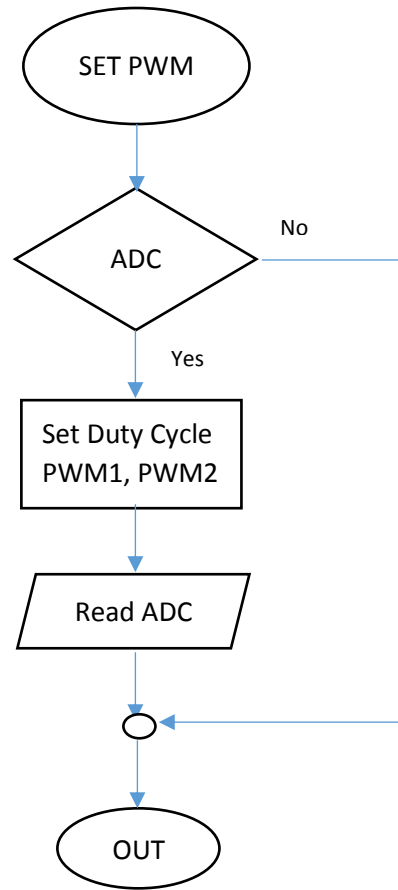
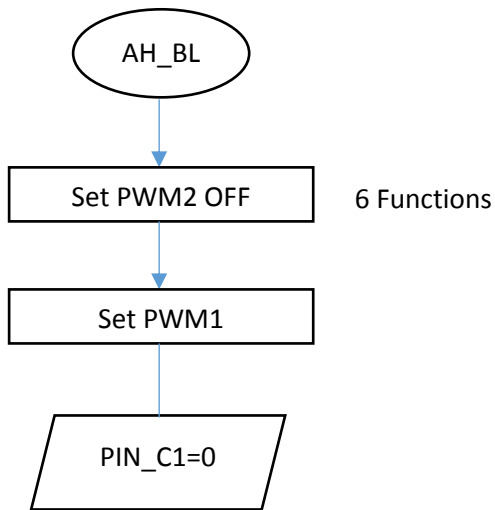
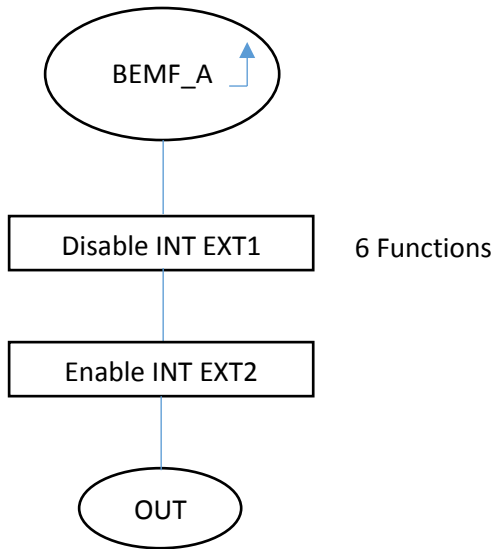
Ο κώδικας C γράφτηκε με CCS C compiler.

Το διάγραμμα ροής του κώδικα είναι το παρακάτω





Κατασκευή του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα



Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο μικροελεγκτής λειτουργεί με κρυσταλλικό ταλαντωτή 8MHz, στον κώδικα το PLL ενεργοποιείται και κάνει την CPU να λειτουργεί στα 48MHz.

Η ρύθμιση του Timer2 διαμορφώνεται για να δώσει ένα PWM σήμα με συχνότητα 46.875kHz και ανάλυση 10bits. Η γραμμή διαμόρφωσης είναι :

```
setup_timer_2(T2_DIV_BY_1, 255, 1);
```

where Timer2 prescaler = 1, preload (PR2) = 255

Η συχνότητα και η ανάλυση PWM μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τις παρακάτω λειτουργίες (Fosc = 48 MHz):

$$\text{PWM_frequency} = \text{Fosc} / \{[(\text{PR2}) + 1] * 4 * (\text{TMR2 Prescale Value})\} = 46.875 \text{ KHz}$$

$$\text{Resolution} = \log[4(\text{PR2} + 1)] / \log(2) = 10 \text{ bits}$$

Όλα τα σήματα PWM έχουν την ίδια συχνότητα μια και χρησιμοποιούν την ίδια ρύθμιση timer (timer2).

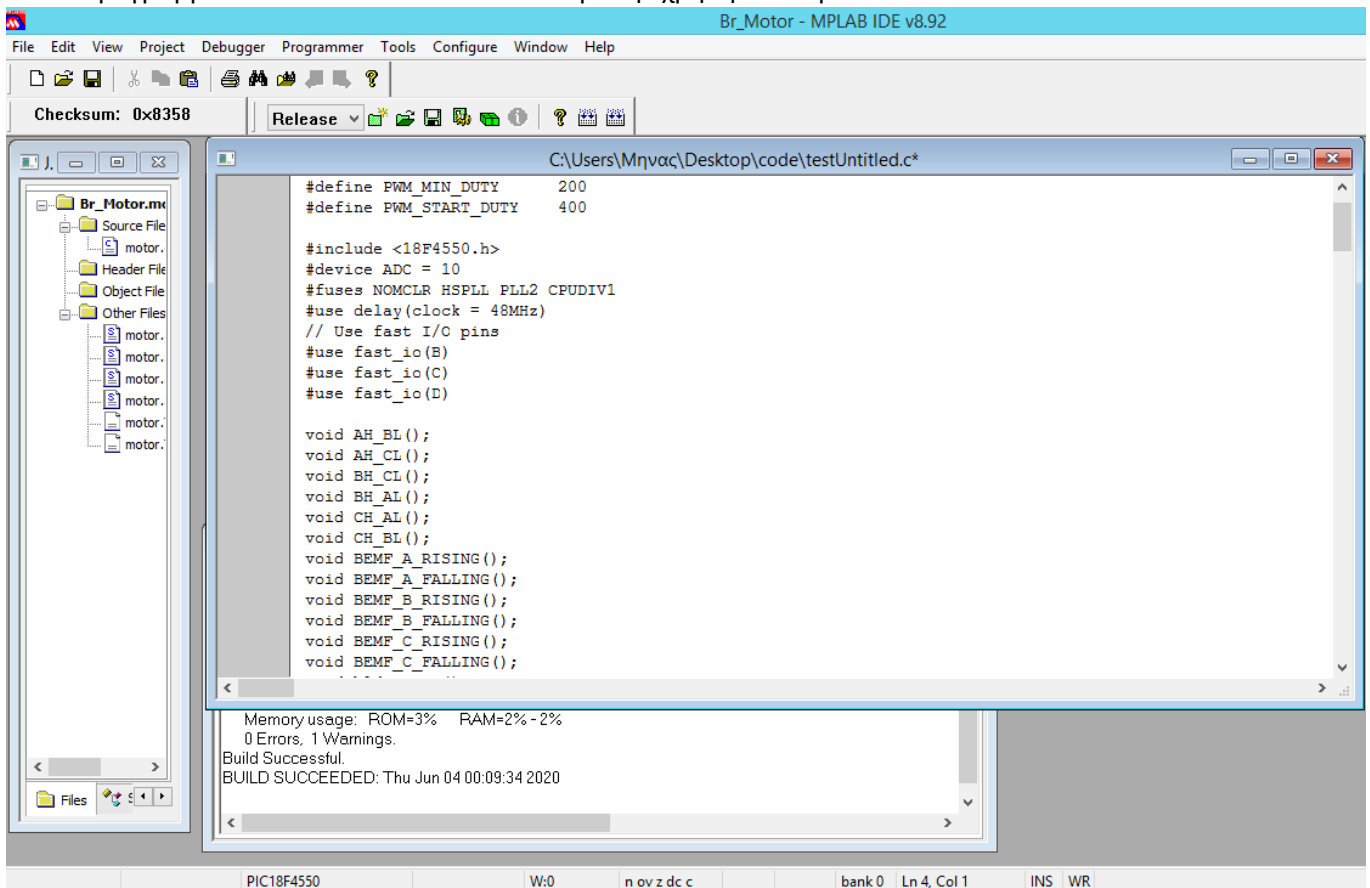
Ο πλήρης κώδικας C παρατίθεται στο παράρτημα [10].

4.4 Προγραμματισμός του μικροελεγκτή PIC18F4550

Για να φορτωθεί το πρόγραμμα στον μικροελεγκτή θα πρέπει να εκτελεστούν κάποια βήματα. Αρχικά θα πρέπει να μετατραπεί το πρόγραμμα που είναι στον κώδικα C σε αρχείο hex δηλαδή σε δεκαεξαδικό κώδικα ώστε να μπορέσει να τον διαβάσει ο μικροελεγκτής. Υπάρχουν πολλοί programmer που μπορούν να φορτώσουν το πρόγραμμα στον μικροελεγκτή. Στη συγκεκριμένη εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο programmer PicKit3. Για να μπορέσει όμως ο programmer να διαβάσει τον μικροελεγκτή πρέπει να κατασκευαστεί ένα κύκλωμα το οποίο φαίνεται στην συνέχεια. Αφού διαβαστεί ο μικροελεγκτής στον υπολογιστή στο πρόγραμμα του PicKit3 πατώντας και τα αντίστοιχα κουμπιά στο πρόγραμμα φορτώνεται ο κώδικας στον μικροελεγκτή.

Κατασκευή του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα

Στο παρακάτω σχήματα φαίνεται το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για να μετατραπεί το πρόγραμμα από κώδικα C σε κώδικα hex με την χρήση του Mplab.



Σχήμα 4.4 Mplab μετατροπή από κώδικα C σε hex

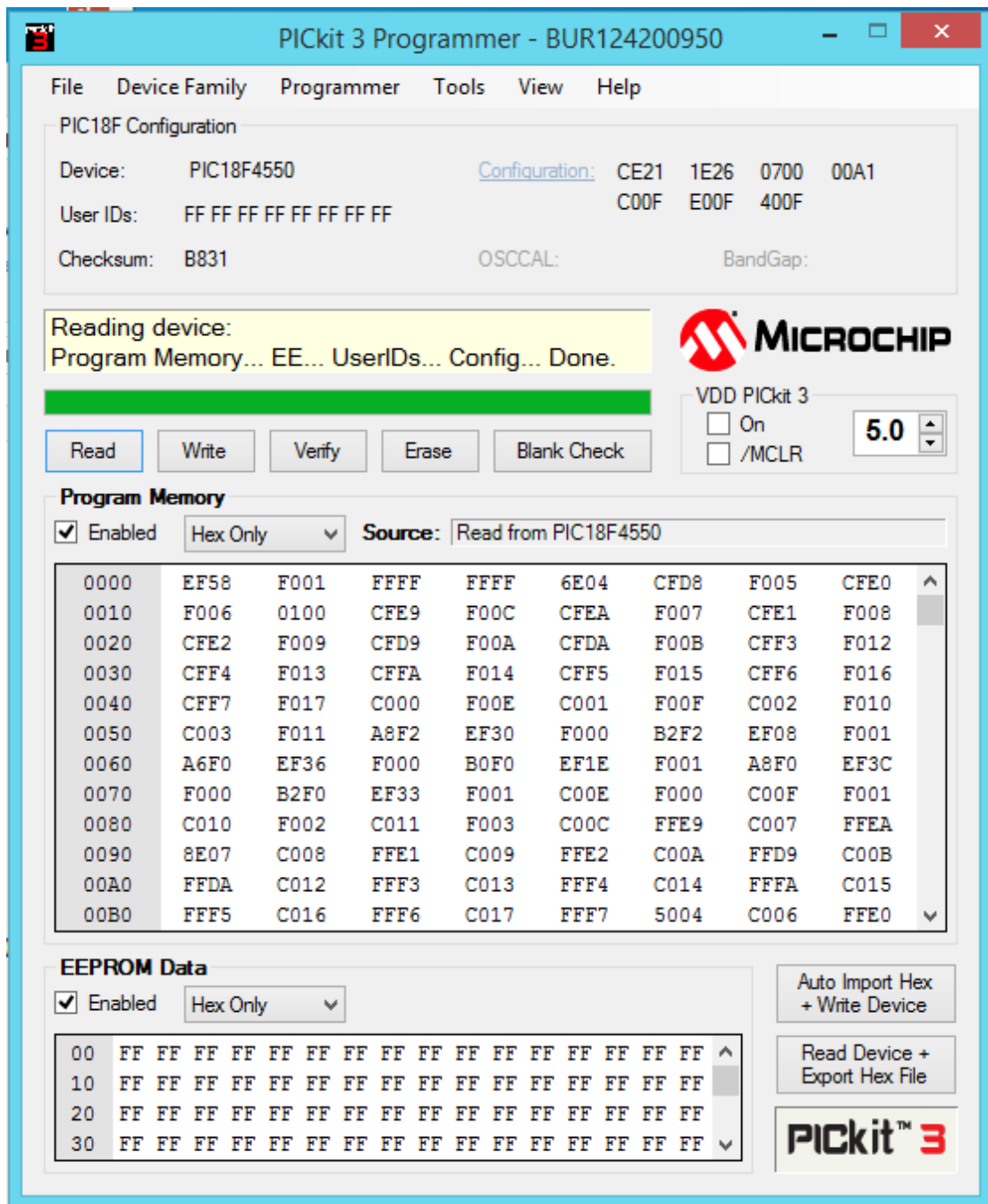
Εφόσον ο κώδικας C έχει μετατραπεί σε δεκαεξαδικό κώδικα, στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί ο programmer. Συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθεί ο programmer PicKit3, όπως φαίνεται και στην παρακάτω φωτογραφία.



Σχήμα 4.5 Programmer/debugger PicKit3

Κεφάλαιο 4

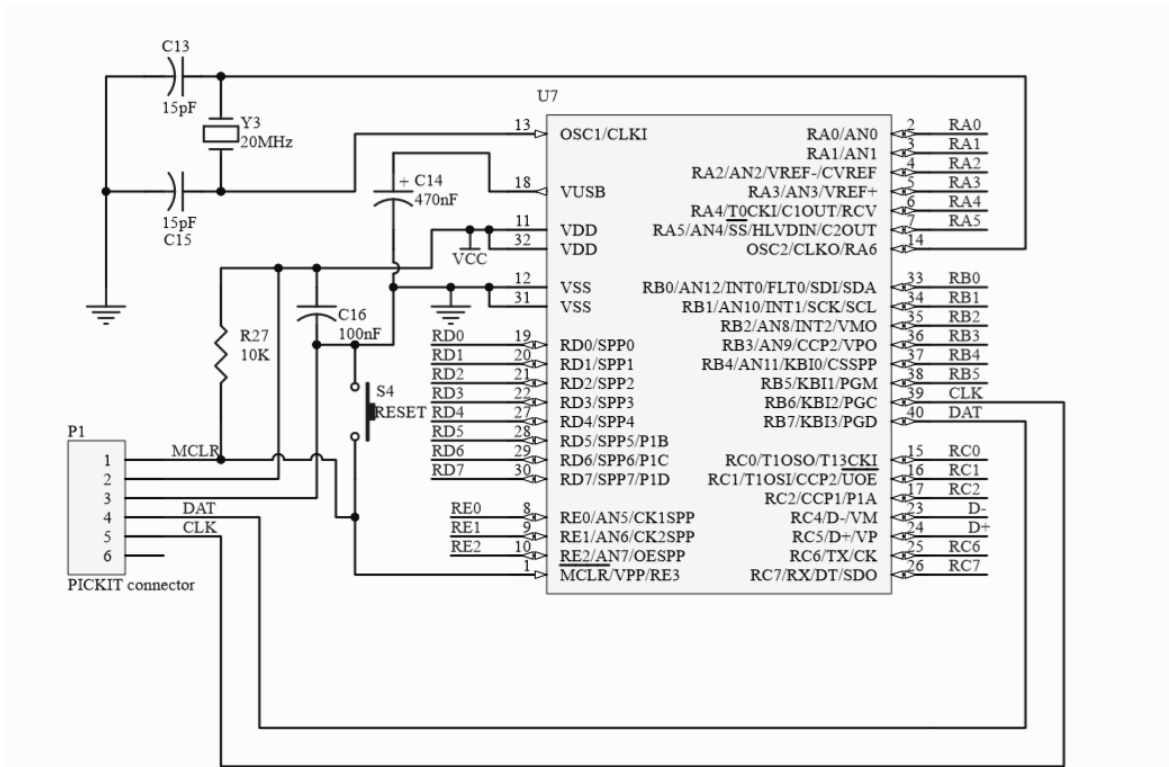
Στην παρακάτω φωτογραφία είναι το λογισμικό του programmer PICkit 3 και συγκεκριμένα η έκδοση PICkit 3 v3.10.



Σχήμα 4.6 Λογισμικό του Programmer PicKit3 της έκδοσης PICkit 3 v3.10

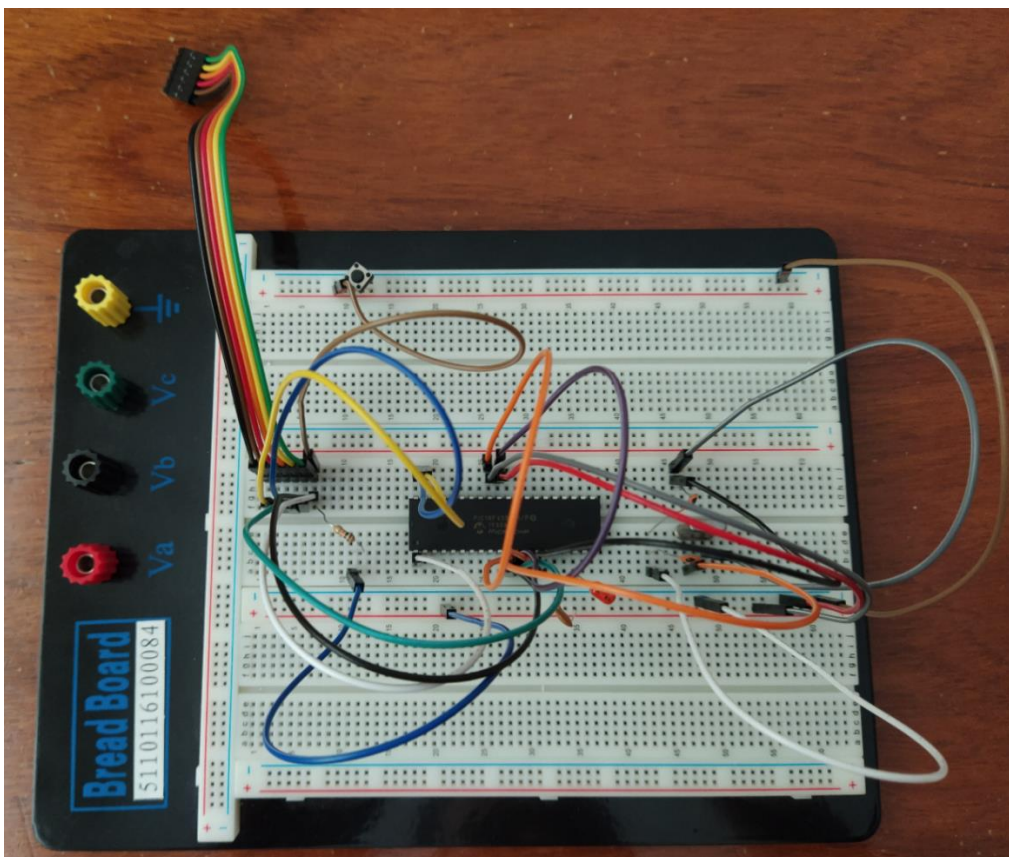
Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το συγκεκριμένο σχηματικό όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, πάνω στο ράστερ που χρησιμεύει ώστε να μπορέσει ο PicKit3 να διαβάσει τον pic18f4550. Έτσι θα συνδεθεί το κύκλωμα που φτιάχτηκε στο ράστερ στον PicKit3 και μετά θα συνδεθεί ο PicKit3 στον υπολογιστή με αποτέλεσμα να διαβαστεί ο pic18f4550 από το software PICkit 3 v3.10.

Κατασκευή του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα



Σχήμα 4.7 Το κύκλωμα για να συνδεθεί ο μικροελεγκτής PIC18F4550 με τον Programmer Pickit3

Στο σχήμα 4.8 φαίνεται το σχηματικό που κατασκευάστηκε πάνω στο ράστερ



Σχήμα 4.8 Το σχηματικό του σχήματος 4.7 πάνω στο ράστερ

Κεφάλαιο 4

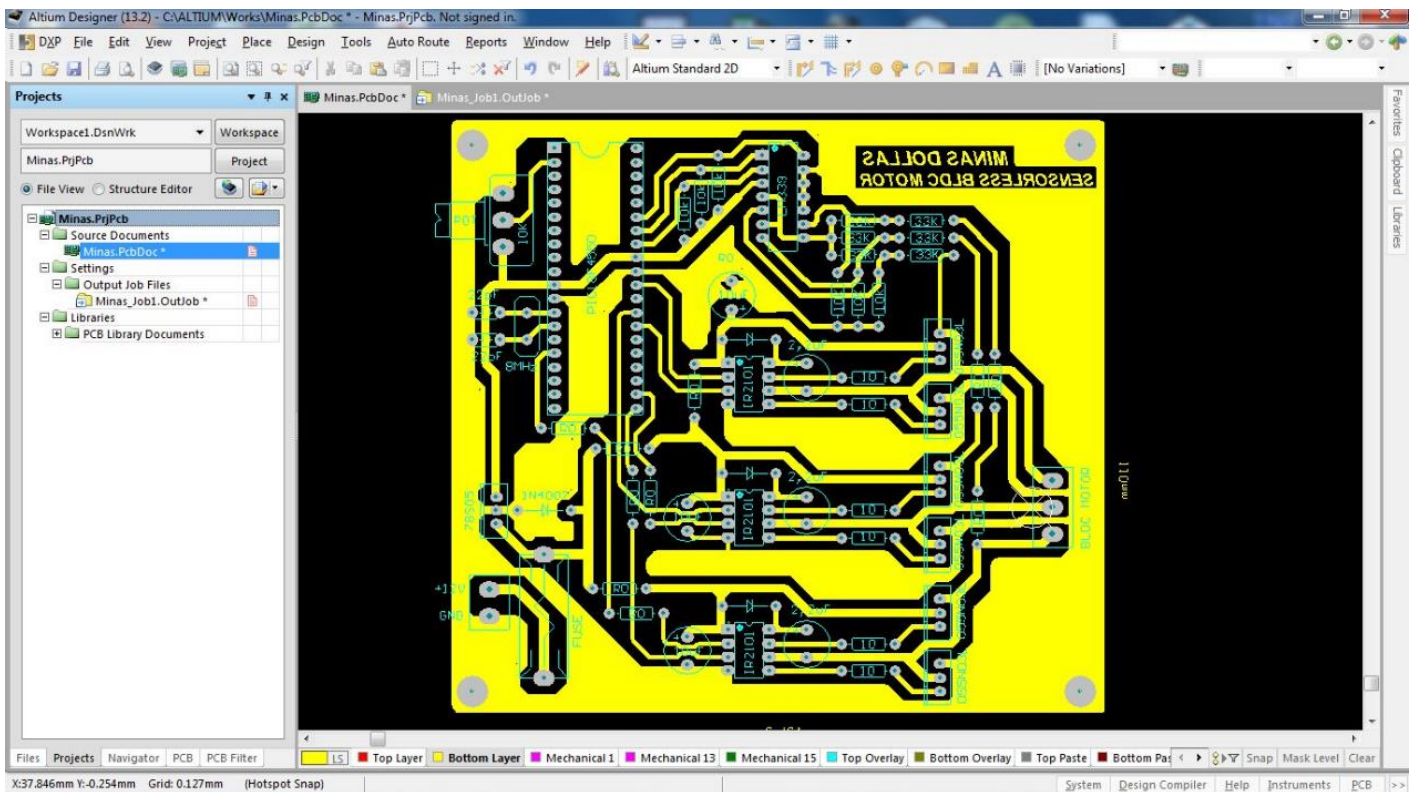
Στη συνέχεια για να φορτωθεί το πρόγραμμα στον PIC18F4550, πρέπει να πατηθεί το Load και να επιλεγεί το αρχείο hex το οποίο μετατράπηκε προηγουμένως από κώδικα C σε hex με την χρήση του Mplab και έπειτα πατώντας το Write. Και το πρόγραμμα έχει φορτωθεί στο PIC18F4550.

4.5 Τύπωση του κυκλώματος

Κατασκευή του σχηματικού κυκλώματος

Για να κατασκευαστεί ένα σχηματικό, πριν τυπωθεί πάνω στην πλακέτα, υπάρχουν αρκετά προγράμματα που κάνουν αυτή την δουλειά. Στην συγκεκριμένη εργασία για την κατασκευή του σχεδιαστικού κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Altium.

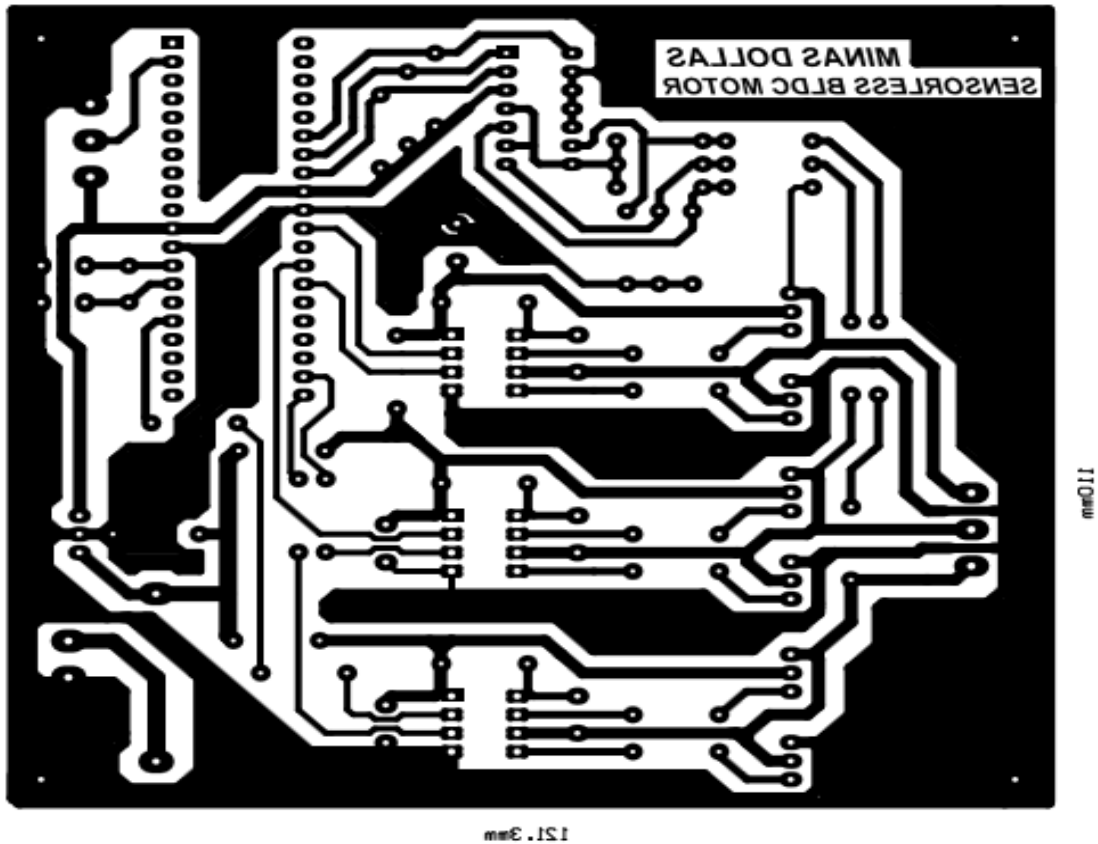
Το κύκλωμα είναι κατασκευασμένο στο Altium κατευθείαν στο board. Στη παρακάτω φωτογραφία φαίνεται το σχηματικό κύκλωμα του κινητήρα κατασκευασμένο στο Altium.



Σχήμα 4.9 Σχεδιαστικό κύκλωμα στο πρόγραμμα Altium

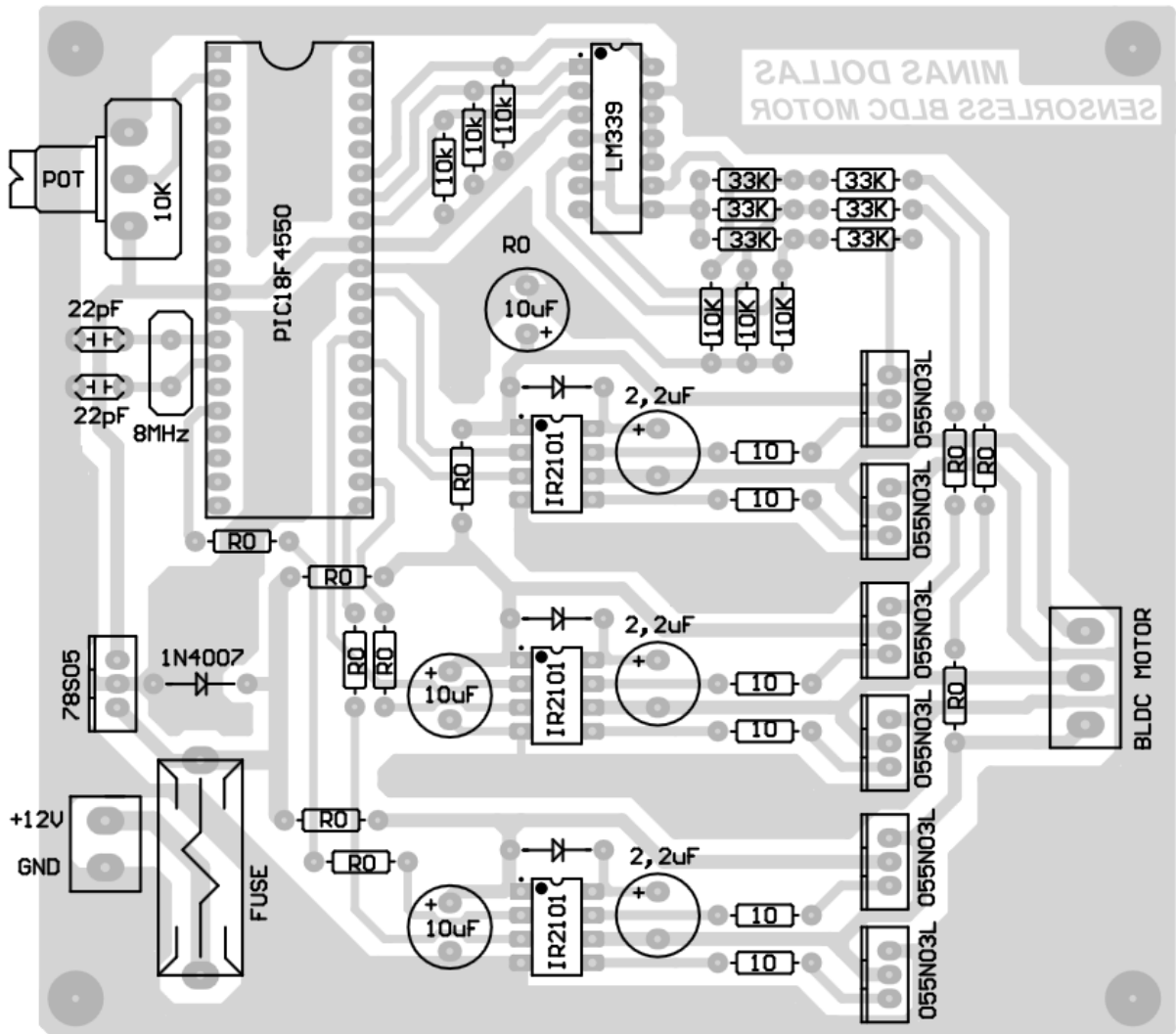
Κατασκευή του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα

Έπειτα, στην παρακάτω φωτογραφία είναι το σχεδιαστικό κύκλωμα που θα τυπωθεί πάνω στην πλακέτα.



Σχήμα 4.10 Σχεδιαστικό κύκλωμα για τύπωση πάνω στην πλακέτα

Μετά, εφόσον έχει κατασκευαστεί το σχεδιαστικό κύκλωμα για την πλακέτα, στην συνέχεια χρειάζεται ο τρόπος μονταρίσματος του κυκλώματος, ώστε να τοποθετηθούν τα εξαρτήματα σωστά πάνω στην πλακέτα.



Σχήμα 4.11 Τρόπος μονταρίσματος του σχεδιαστικού κυκλώματος

Τύπωση του κυκλώματος πάνω σε πλακέτα

Για να εκτυπωθεί ένα κύκλωμα πάνω σε μία πλακέτα εκτελούνται τα παρακάτω βήματα [11]:

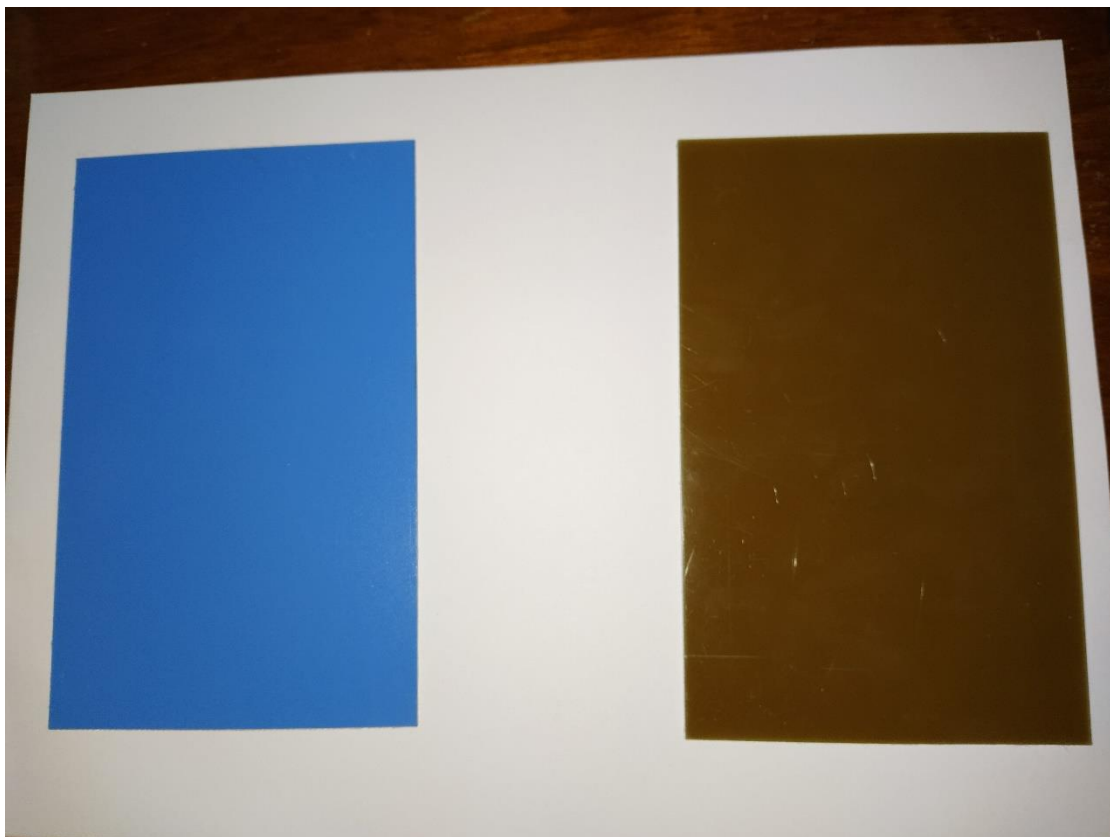
1. Μεταφορά του σχεδίου στην πλακέτα
2. Αποχάλκωση
3. Επικασσιτέρωση (προαιρετικό στάδιο)
4. Επικάλυψη προστασίας (προαιρετικό στάδιο)
5. Τοποθέτηση οδηγού υλικών (προαιρετικό στάδιο)
6. Τρύπημα

Επίσης για το βήμα ένα που είναι η μεταφορά του σχεδιαστικού κυκλώματος πάνω στην πλακέτα υπάρχουν αρκετοί τρόποι. Παρακάτω είναι οι πιο συνηθισμένοι τρόποι τύπωσης του κυκλώματος πάνω στην πλακέτα [11]:

Κατασκευή του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα

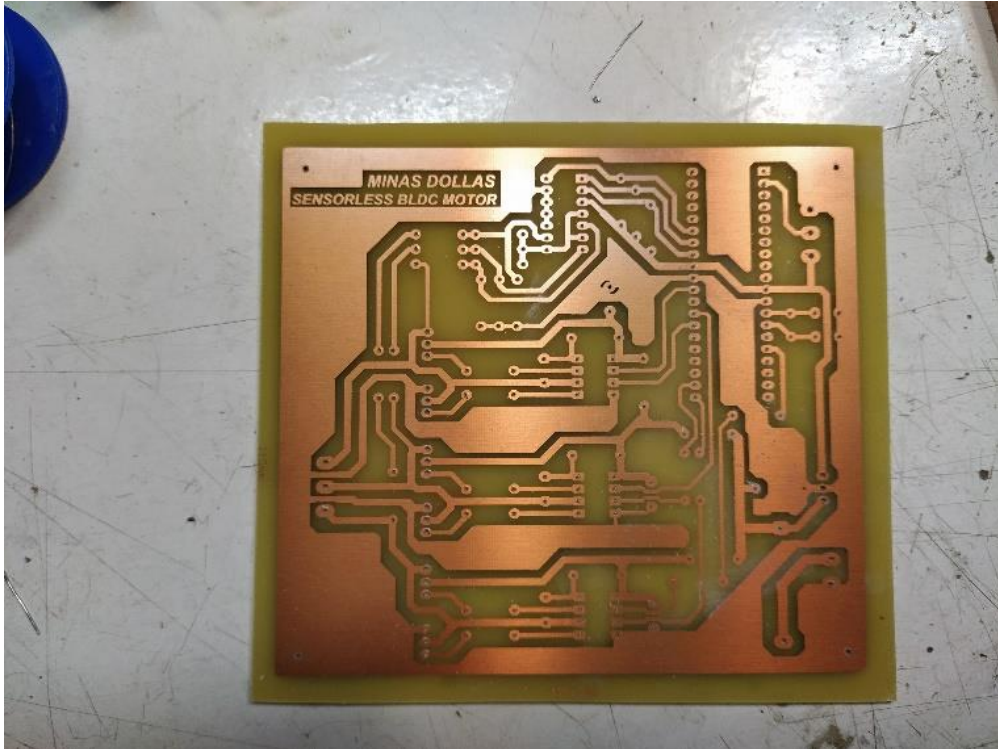
1. Σχεδίαση με μαρκαδόρο πλακέτας.
2. Θερμομεταφορά τόνερ στην πλακέτα με σιδέρωμα.
3. Χημική μεταφορά τόνερ στην πλακέτα χωρίς θερμότητα.
4. Με μεταξοτυπία.
5. Με φωτοευαίσθητη επικάλυψη στην πλακέτα.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ο τρόπος με την φωτογραφική μέθοδο σε φωτοευαίσθητη πλακέτα μονής όψης. Στην παρακάτω φωτογραφία στην αριστερή μεριά είναι η πάνω όψη της φωτοευαίσθητης πλακέτας και στην δεξιά μεριά η κάτω όψη της πλακέτας.



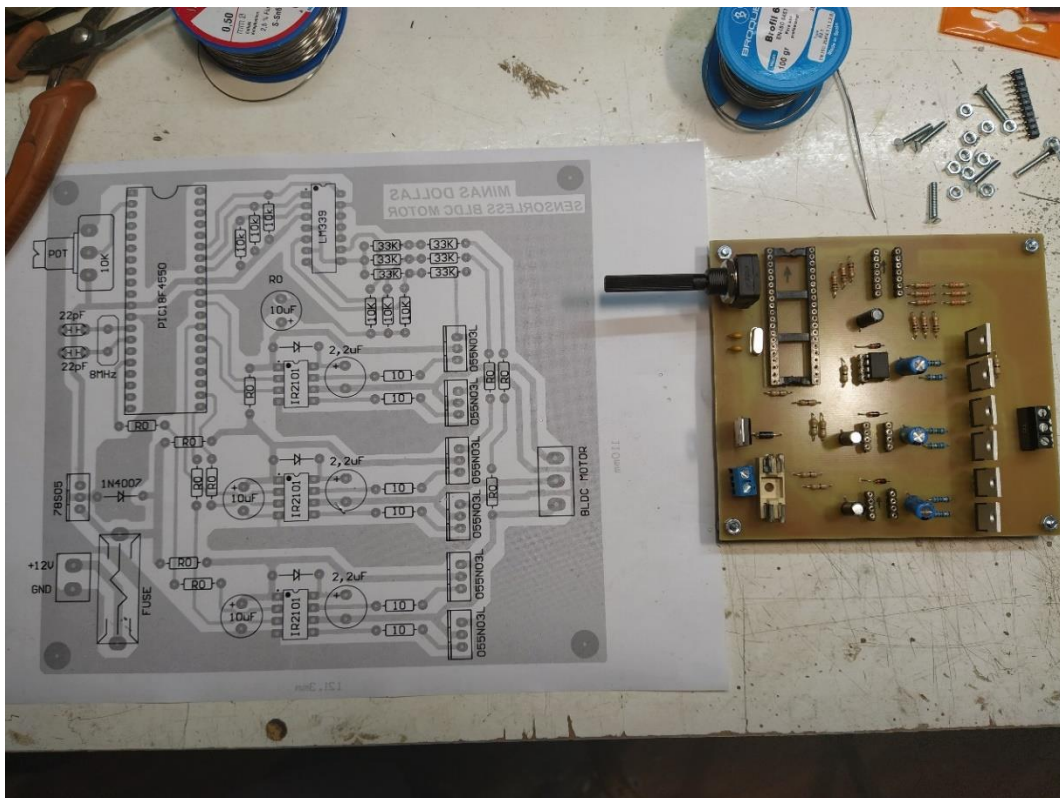
Σχήμα 4.12 Φωτοευαίσθητη πλακέτα

Στην συνέχεια όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.13 εμφανίστηκε το σχεδιαστικό κύκλωμα πάνω στην πλακέτα και έπειτα από την αποχάλκωση.



Σχήμα 4.13 Το κύκλωμα τυπωμένο πάνω στην πλακέτα

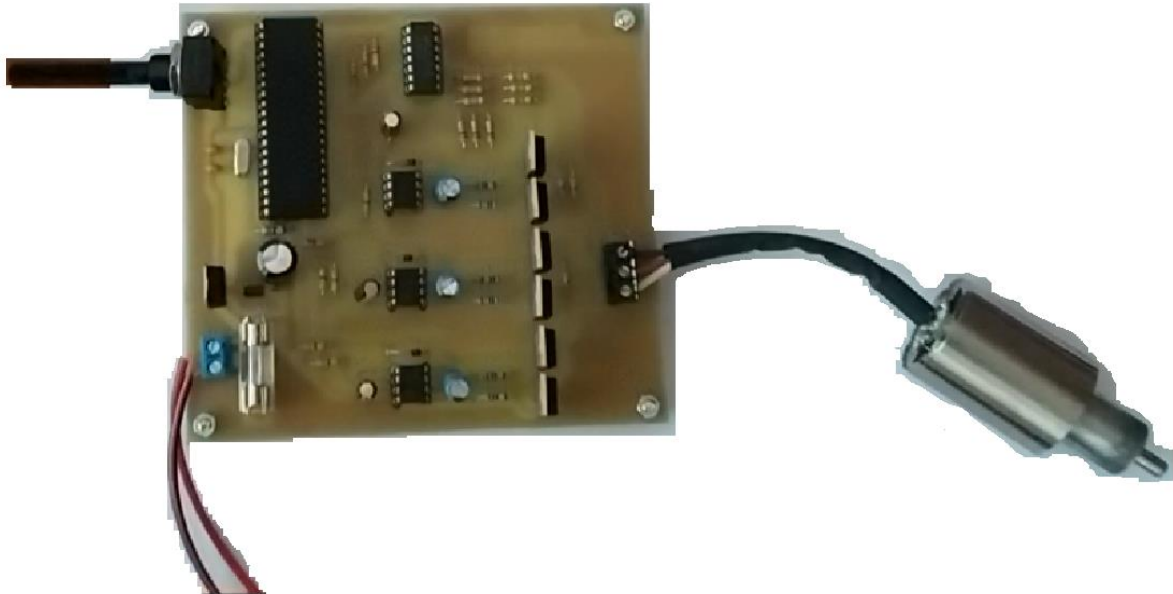
Στο σχήμα 4.14 στην αριστερή μεριά είναι ο τρόπος μονταρίσματος του σχεδιαστικού κυκλώματος, ώστε να φαίνεται πως θα τοποθετηθούν σωστά τα εξαρτήματα και στην δεξιά μεριά είναι η πλακέτα με κολλημένα τα εξαρτήματα.



Σχήμα 4.14 Κόλληση εξαρτημάτων στην πλακέτα

Κατασκευή του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα

Το τελικό αποτέλεσμα είναι αυτό στο σχήμα 4.15, δηλαδή το κύκλωμα που οδηγεί τον κινητήρα μαζί με τον κινητήρα χωρίς ψύκτρες που χρησιμοποιήθηκε. Το κύκλωμα είναι έτοιμο για να λειτουργήσει.



Σχήμα 4.15 Τελικό κύκλωμα οδήγησης του κινητήρα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με την παρούσα εργασία πάνω στους κινητήρες, τα τελευταία χρόνια οι κινητήρες χωρίς ψύκτρες όλο και χρησιμοποιούνται περισσότερο λόγω των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, όπως για παράδειγμα οι ταχύτητες που μπορούν να επιτύχουν είναι πολύ υψηλές, η αποδοτικότητα, όπως φάνηκε και από τις έρευνες, είναι πολύ αποδοτική σε σχέση με τους κινητήρες με ψύκτρες, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μεγαλύτερη και άλλα πλεονεκτήματα που δεν προσφέρουν άλλα είδη κινητήρων. Ωστόσο, αν και στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε και κατασκευάστηκε ο κινητήρας χωρίς ψύκτρες με την χρήση της bmf χωρίς αισθητήρες, μία άλλη λύση θα ήταν η χρήση των αισθητήρων Hall διότι και αυτοί μπορούν να προσφέρουν αρκετά υψηλές ταχύτητες αν και ανεβαίνει το κόστος λόγω των αισθητήρων αλλά είναι μία καλή λύση και για τις χαμηλές ταχύτητες, σε όποιες εφαρμογές χρειάζεται χαμηλή ροπή. Είτε επιλεγεί ο κινητήρας με την χρήση της bmf χωρίς αισθητήρες είτε με αισθητήρες, υπάρχουν και τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα της κάθε περίπτωσης, οπότε ανάλογα με την εφαρμογή πρέπει να επιλεγεί και ο κατάλληλος κινητήρας. Ωστόσο, δεν πρέπει να ξεχνάει κανείς, ότι σ' έναν κινητήρα χωρίς ψύκτρες δεν πρέπει να υποτιμάται το κύκλωμα ελέγχου καθώς και ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή που παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στις ταχύτητες που μπορεί να προσφέρει ο κινητήρας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση:

- [1] P. Visconti, and P. Primiceri, "An overview on state-of-art and future application fields of BLDC motors: design and characterization of a PC-interfaced driving and motion control system," *ARPAN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, no. 7, pp. 4913-4926, Sep. 2017.
- [2] R. Condit, "Brushed DC Motor Fundamentals." *Microchip Application Note AN905, Microchip Technology*, pp. 1-10, Jan. 2004
- [3] A. B. Ghule, and S. S. Subhash, "Sliding mode observer for torque control in sensorless BLDC motor," *IOSR J Electr Electron Eng*, vol. 10, no. 5, pp. 16-20, Sep – Oct. 2015.
- [4] A. R. Sutar, G. G. Bhide, and J. J. Mane, "Implementation and study of BLDC motor drive system," *International Journal of Engineering Sciences and Research Technology*, vol. 5, pp. 57-64, May. 2016.
- [5] A. Jadhav, K. Salve, M. Shingote, S. Bhujade, and A. Varade, "EFFICIENT BLDC MOTOR FOR MIXER AND GRINDER," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 3484-3487, Apr. 2019.
- [6] C. Bharatiraja, S. Babu, V. Krishnakumar, P. Sanjeevikumar, and G. Nixon, "Investigation of slim type BLDC motor drive with torque ripple minimization using abridged space-vector PWM control method," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 593-600, Jun. 2017.

Διαδικτυακές αναφορές:

- [7] <https://www.renesas.com/us/en/support/technical-resources/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview.html>
- [8] <https://www.zikodrive.com/support/zikouniversity-motor-control-theory-application/sensored-versus-sensorless-brushless-motors-controllers/#page>
- [9] <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/sensorless-brushless-dc-bldc-motor-control/>
- [10] <https://simple-circuit.com/pic18f4550-esc-sensorless-bldc-motor-controller/>
- [11] <https://diyelectronics-gr.blogspot.com/2017/07/pcb.html>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας C

```
1 // Sensorless brushless DC motor controller using PIC18F4550 microcontroller
2 // CCS compiler C code
3
4 #define PWM_MIN_DUTY 200
5 #define PWM_START_DUTY 400
6
7 #include <18F4550.h>
8 #device ADC = 10
9 #fuses NOMCLR HSPLL PLL2 CPUDIV1
10 #use delay(clock = 48MHz)
11 // Use fast I/O pins
12 #use fast_io(B)
13 #use fast_io(C)
14 #use fast_io(D)
15
16 void AH_BL();
17 void AH_CL();
18 void BH_CL();
19 void BH_AL();
20 void CH_AL();
21 void CH_BL();
22 void BEMF_A_RISING();
23 void BEMF_A_FALLING();
24 void BEMF_B_RISING();
25 void BEMF_B_FALLING();
26 void BEMF_C_RISING();
```

```

27 void BEMF_C_FALLING();
28 void bldc_move();
29 void SET_PWM_DUTY();
30
31 int8 bldc_step = 0;
32 int16 motor_speed;
33
34 #INT_EXT // External interrupt 0 ISR
35 void INT_EXT_ISR(void){
36 // BEMF debounce
37 for(int8 j = 0; j < 20; j++) {
38 if(bldc_step & 1) {
39 if(input(PIN_B0)) j -= 1;
40 }
41 else {
42 if(!input(PIN_B0)) j -= 1;
43 }
44 }
45 bldc_move();
46 SET_PWM_DUTY();
47 }
48 #INT_EXT1 // External interrupt 1 ISR
49 void INT_EXT1_ISR(void){
50 // BEMF debounce
51 for(int8 j = 0; j < 20; j++) {
52 if(bldc_step & 1) {
53 if(input(PIN_B1)) j -= 1;
54 }

```

```

55  else {
56    if(!input(PIN_B1)) j -= 1;
57  }
58 }
59 bldc_move();
60 }
61 #INT_EXT2                // External interrupt 2 ISR
62 void INT_EXT2_ISR(void){
63 // BEMF debounce
64 for(int8 j = 0; j < 20; j++) {
65   if(bldc_step & 1) {
66     if(input(PIN_B2)) j -= 1;
67   }
68   else {
69     if(!input(PIN_B2)) j -= 1;
70   }
71 }
72 bldc_move();
73 }
74
75 void bldc_move(){ // BLDC motor commutation function
76 switch(bldc_step){
77 case 0:
78   AH_BL();
79   BEMF_C_FALLING(); // Sense BEMF C
80   break;
81 case 1:
82   AH_CL();

```

```

83     BEMF_B_RISING(); // Sense BEMF B
84     break;
85     case 2:
86     BH_CL();
87     BEMF_A_FALLING(); // Sense BEMF A
88     break;
89     case 3:
90     BH_AL();
91     BEMF_C_RISING(); // Sense BEMF C
92     break;
93     case 4:
94     CH_AL();
95     BEMF_B_FALLING(); // Sense BEMF B
96     break;
97     case 5:
98     CH_BL();
99     BEMF_A_RISING(); // Sense BEMF A
100    break;
101 }
102 bldc_step++;
103 if(bldc_step >= 6)
104     bldc_step = 0;
105 }
106
107 void main(){
108     output_low(PIN_C1);
109     output_drive(PIN_C1);           // Configure RC1 pin as output
110     output_d(0);                   // PORTD initial state

```

```

111 set_tris_d(0);           // Configure all PORTD pins as outputs
112 setup_timer_2(T2_DIV_BY_1, 255, 1); // Set PWM frequency to 19.53KHz and 10-bit
113 resolution
114 setup_adc_ports(AN0);     // Configure AN0 pin as analog
115 setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL); // Set ADC module clock source to internal
116 set_adc_channel(0);      // Select channel 0 (AN0)
117 clear_interrupt(INT_EXT); // Clear INT0 flag bit
118 clear_interrupt(INT_EXT1); // Clear INT1 flag bit
119 clear_interrupt(INT_EXT2); // Clear INT2 flag bit
120
121 // Motor start
122 output_d(0x08);          // Set pin RD3
123 set_pwm1_duty(PWM_START_DUTY); // Set PWM1 duty cycle
124 set_pwm2_duty(PWM_START_DUTY); // Set PWM2 duty cycle
125 int16 i = 5000;
126 while(i > 100) {
127     delay_us(i);
128     bldc_move();
129     i = i - 20;
130 }
131 READ_ADC(ADC_START_ONLY); // Start analog conversion
132 enable_interrupts(GLOBAL); // Enable global interrupts
133 while(TRUE)
134 ; // Endless loop
135 }
136
137 void BEMF_A_RISING() {
138     disable_interrupts(INT_EXT1);
139     enable_interrupts(INT_EXT_L2H);

```

```

139 }
140 void BEMF_A_FALLING() {
141   disable_interrupts(INT_EXT1);
142   enable_interrupts(INT_EXT_H2L);
143
144 }
145 void BEMF_B_RISING() {
146   disable_interrupts(INT_EXT2);
147   enable_interrupts(INT_EXT1_L2H);
148 }
149 void BEMF_B_FALLING() {
150   disable_interrupts(INT_EXT2);
151   enable_interrupts(INT_EXT1_H2L);
152
153 }
154 void BEMF_C_RISING() {
155   disable_interrupts(INT_EXT);
156   enable_interrupts(INT_EXT2_L2H);
157 }
158 void BEMF_C_FALLING() {
159   disable_interrupts(INT_EXT);
160   enable_interrupts(INT_EXT2_H2L);
161 }
162
163 void AH_BL() {
164   setup_ccp2(CCP_OFF);           // RC1 PWM OFF
165   output_low(PIN_C1);
166   setup_ccp1(CCP_PWM | CCP_PWM_FULL_BRIDGE); // RD7 PWM ON

```

```

167 }
168 void AH_CL() {
169   output_d(0x04);
170 }
171 void BH_CL() {
172   setup_ccp1(CCP_OFF);           // RD5 & RD7 PWMs OFF
173   output_d(0x04);
174   setup_ccp1(CCP_PWM | CCP_PWM_FULL_BRIDGE_REV); // RD5 PWM ON
175 }
176 void BH_AL() {
177   output_d(0x10);
178 }
179 void CH_AL() {
180   setup_ccp1(CCP_OFF);           // RD5 & RD7 PWMs OFF
181   output_d(0x10);
182   setup_ccp2(CCP_PWM);           // RC1 PWM ON
183 }
184 void CH_BL() {
185   output_d(0x08);
186 }
187 void SET_PWM_DUTY() {
188   if(adc_done()){                // If conversion complete
189     motor_speed = read_adc(ADC_READ_ONLY); // Read conversion result
190     if(motor_speed < PWM_MIN_DUTY)
191       motor_speed = PWM_MIN_DUTY;
192     set_pwm1_duty(motor_speed);    // Set PWM1 duty cycle
193     set_pwm2_duty(motor_speed);    // Set PWM2 duty cycle
194     READ_ADC(ADC_START_ONLY);     // Start analog conversion

```

195 }

196 }