



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**Τμήμα Μηχανικών
Βιομηχανικής Σχεδίασης & Παραγωγής**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ BRUSHLESSDC**

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΟΤΖΕΜΠΕΚΟΓΛΟΥ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΥΡΟΜΑΛΗΣ
Επίκουρος Καθηγητής ΠΑΔΑ

Μέλη τριμελούς: Δρ. Κωνσταντίνος Αρβανίτης, Καθηγητής ΓΠΑ
Δρ. Δημήτριος Λουκάτος, ΕΔΙΠ ΓΠΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ**

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2020

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Π. Ράλλη & Θηβών 250, 12244 Αιγάλεω, Αθήνα – Ελλάδα
Τηλ. 210-5381488

Περίληψη

Στην εργασία αυτή θα περιγραφεί η ανάπτυξη μίας πειραματικής πλατφόρμας, η οποία επιτρέπει τη μελέτη, τη λειτουργία καθώς και τον έλεγχο κινητήρων τύπου BrushlessDC.

Στα έξι κεφάλαια στα οποία δομείται η συγκεκριμένη πτυχιακή, αρχικά θα δοθούν ιστορικά στοιχεία σχετικά με την εξέλιξη των κινητήρων, τα οποία θα φανούν χρήσιμα, για να κατανοήσουμε το πώς κάποια φυσικά υλικά αξιοποιήθηκαν, με σκοπό να δημιουργηθούν οι πρώτοι κινητήρες και έτσι εξελικτικά φτάσαμε τους παλαιούς τύπους κινητήρων που χρησιμοποιούσαμε εν πολλοίς μέχρι σήμερα. Ακολούθως, θα αναλυθούν στοιχεία που αφορούν στη δομή λειτουργίας κινητήρων, οι οποίοι ξεκινούν από τους παλαιούς τύπους και καταλήγουν στους υπερσύγχρονους κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη στον πίσω άξονα, αντί για τις ψήκτρες (καρβουνάκια) που υπήρχαν στους παλαιούς τύπους. Κατ' αυτόν τον τρόπο, θα δούμε λειτουργίες με παραδείγματα και ανάλυση των μοτέρ αυτών, για την πλήρη κατανόηση της διαφοράς λειτουργίας του ενός από τον άλλο τύπο, ενώ θα δοθούν και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθενός από αυτούς.

Επίσης, στο υλικό που αναφέρεται στην παρούσα εργασία ως “τεχνολογικό υπόβαθρο”, αναπτύσσουμε την υλοποίηση της συγκεκριμένης πτυχιακής με πλούσιο υλικό εικόνων και κειμένων.

Επιπροσθέτως, υπάρχει σε δημιουργία excel γράφημα, το οποίο δίνει δύο καμπύλες με διαφορετική τάση στα 8 και στα 12 Volt. Το γράφημα αυτό, επομένως, παρουσιάζει το πλάτος παλμού (pwm) και τις στροφές ανά λεπτό του κινητήρα (rpm). Οι εν λόγω κινητήρες αποτελούν ίσως τον πιο κρίσιμο τύπο για τις εφαρμογές των μελλοντικών αυτοκινούμενων οχημάτων. Σχετικά με τα όσα αναφέραμε παραπάνω, θα καταλήξουμε σε συμπεράσματα και, ίσως, κάποια ερωτήματα στα οποία θα δοθούν απαντήσεις είτε από την καθημερινή επαφή του ανθρώπου με υλικά και τεχνολογίες είτε σε βιομηχανίες που βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο ή μπορεί επιπλέον να έχουν υλοποιηθεί και τα αποτελέσματά τους είναι απτά και ορατά σε εφαρμογές όπως η formula 1, τα drones, οι ανεμογεννήτριες και ποικίλα άλλα τεχνολογικά επιτεύγματα των τελευταίων δεκαετιών.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/Η κάτωθι υπογεγραμμένος/η ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΟΤΖΕΚΠΕΚΟΓΛΟΥ του φοιτητής του Τμήματος ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ Κ' ΠΑΡΑΓΟΓΗΣ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε, ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα, σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασή της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση Π.Ε με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε πρέπει να ολοκληρώσει εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού βμήνου από την ημερομηνία ανάθεσής της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18. παρ.5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού».

Ο Δηλώνων



Ημερομηνία

9/11/2020

Abstract

The present senior thesis describes the development of an experimental platform, in which we examine and study the operation and the control of the Brushless DC motors.

This senior thesis is divided in six chapters. Firstly, we will give historical information about the evolution of engines. This piece of information is useful for understanding how the use of natural materials end to the creation of the first engines. These first engines, after a long period of evolution, are in use until today. In addition, we will analyze elements related to the operating structure of engines. This analysis starts from the old types and end up in the state-of-the-art engines with a permanent magnet on the rear axle, instead of the brushes that existed in the old types. As the analysis goes on, we will give examples and analysis of these motors to understand the full functions of them and the difference between the old type and the new ones. Additionally, we will point out the advantages and disadvantages of each of them.

Also, in the chapter which, in the present work, is referred as "technological background", we develop the implementation of this senior thesis with many images and texts. The cause of this implementation, is to validate the analysis of the previous chapters.

In addition, there is a graphemein excel form, which gives two curves with different voltage at 8 and 12 Volts. Therefore, this graphemeshows pulse-width modulation (PWM) and the revolutions per minute(RPM).

The type of the engines that mentioned above, are the most serious and perhaps also the most critical type of engines, to which the future motor vehicles will stand and develop the new applications for their usage.Regarding all these, and coming to the conclusions of the senior thesis, we will answer the questions of the use of these engines from our daily contact with materials and technologies or with the use of them in the industry whether that are still in the experimental stage or have already been implemented. Their results are visible in many ways such as formula 1, drones, the wind generators and various other technological achievements of past decades.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	2
Περιεχόμενα	3
Ευχαριστίες	4
Εισαγωγή - Σκοπός	5
Τεχνολογικό υπόβαθρο	6 - 8
Βασικές και χρήσιμες έννοιες	9 - 20
Σχεδίαση - Υλοποίηση	21 - 52
Σενάρια ελέγχου και διαδικασίες μετρήσεων – Μεθοδολογία	53 - 62
Πιστοποίηση χρήσης αποτελεσμάτων	63 - 71
Συμπεράσματα	72
Αναφορές	73 - 75

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα (Α.Τ.Ε.Ι.) Πειραιά και πιο συγκεκριμένα το Τμήμα Αυτοματισμού που μου παρείχε τις απαραίτητες γνώσεις και τις βάσεις, για να μπορέσω να εκπονήσω την πτυχιακή μου εργασία. Εξαιρετικές ευχαριστίες οφείλω στον Επίκουρο Καθηγητή Δημητρίου Πυρομάλη, ο οποίος διατέλεσε επόπτης της παρούσας πτυχιακής, καθώς χωρίς τη στήριξη, την εμπιστοσύνη και την καθοδήγησή του δεν θα μπορούσα να ολοκληρώσω τη συγκεκριμένη πτυχιακή. Παράλληλα πρέπει να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στα μέλη της τριμελούς επιτροπής μου από το Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Δρ. Κωνσταντίνο Αρβανίτη (καθηγητή) και τον Δρ. Δημήτριο Λουκάτο (ΕΔΙΠ), που μου παρείχαν συνεχή βοήθεια και στήριξη κατά την διάρκεια της πτυχιακής μου. Τέλος, θα έπρεπε, κλείνοντας, να ευχαριστήσω τους γονείς και τον αδελφό μου για την υπομονή, τη στήριξη και τη βοήθεια που μου παρείχαν σε όλα τα στάδια της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Εισαγωγή – Σκοπός

Αρχικά θα αναφερθούμε στους ηλεκτροκινητήρες, για να δούμε πώς σταδιακά και εξελικτικά οδηγήθηκαν στους σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Όμως, πρώτα για να μελετηθεί και να υλοποιηθεί χωρίς απορίες η εξέλιξη αυτή, θα πρέπει να γίνει μία αναδρομή στον τρόπο λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών DC. Για να κατανοήσουμε πλήρως τη λειτουργία αυτής, θα πρέπει να αναφερθούμε συνοπτικά στον τρόπο με τον οποίο είναι δομημένος και σε ποιές εφαρμογές είναι απαραίτητος.

Τεχνολογικό υπόβαθρο

Όπως αναφέραμε ανωτέρω, εδώ θα ασχοληθούμε με την ανάλυση του ηλεκτροκινητήρα και σε ποιές εφαρμογές είναι χρήσιμος.

Ο ηλεκτροκινητήρας είναι η διάταξη που χρησιμοποιείται, για να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Αυτό τυγχάνει να έχει εξαιρετική εκμετάλλευση από τις βιομηχανίες, με αποτέλεσμα αυτός ο τρόπος να παράσχει τη δυνατότητα διαχωρισμού σε δύο κατηγορίες: οι σύγχρονοι κινητήρες συνεχούς ρεύματος DC, και οι εναλλασσόμενοι ρεύματος AC. Ορισμένες από τις εφαρμογές που χρησιμοποιείται ο ηλεκτροκινητήρας είναι: οι μεταφορικές ταινίες εργοστασίων, τα πιεστικά συστήματα, οι κυκλοφορητές, οι γκαραζόπορτες, οι εργαλειομηχανές CNC, οι αντλίες, οι συμπιεστές καθώς και τα ανυψωτικά μηχανήματα των συνεργείων αυτοκινήτων.

Σύμφωνα με τα όσα αναφέραμε για τους ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος DC, εδώ θα αναλύσουμε τα μέρη από τα οποία αυτός αποτελείται. Οι συγκεκριμένοι κινητήρες αποτελούνται από τα εξής μέρη: τον δρομέα ή ρότορα, τον στάτη, και τις ψήκτρες ή καρβουνάκια.

Αναλυτικότερα:

- Ο δρομέας ή ρότορας είναι το περιστρεφόμενο μέρος της μηχανής που αποτελείται από τον ηλεκτροφόρο αγωγό, ο οποίος είναι τοποθετημένος σε πυκνές περιελίξεις ή σπείρες, ώστε να περιέχει όσο μεγαλύτερο μήκος αγωγού γίνεται, για να υπάρχει δεδομένος όγκος. Επίσης, αυτό το τμήμα περιλαμβάνει τα εξής: τον άξονα, το επαγωγικό τύμπανο, τον συλλέκτη, την περιέλιξη και τον ανεμιστήρα.

Αμέσως κατωτέρω, θα περιγράψουμε εκτενέστερα κάθε ένα από τα μέρη που αναφέρθηκαν στην ανωτέρω κουκίδα.

α) Ο άξονας. Είναι μία ευθεία στην οποία κινείται συμμετρικά κάποιο αντικείμενο.

β) Το επαγωγικό τύμπανο, το οποίο φέρει στην περιφέρειά του οδοντώσεις ή αυλάκια, εντός των οποίων τοποθετείται η περιέλιξη. Οι οδοντώσεις αυτές είναι ανοιχτού ή ημίκλειστου τύπου, ανάλογα με την ισχύ της μηχανής. Επίσης, αποτελείται από μαγνητικά ελάσματα μικρής μαγνητικής αντίστασης, τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους για τη μείωση των απωλειών λόγω δινορευμάτων.

γ) Ο συλλέκτης, ο οποίος κατασκευάζεται από πολλά χάλκινα ελάσματα, που ονομάζονται τομείς, και είναι μονωμένα μεταξύ τους, ακόμα και ως προς τον ρότορα. Η παραγόμενη τάση στην περιέλιξη του ρότορα είναι γνωστή ως εναλλασσόμενη. Άρα σκοπός του συλλέκτη είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή. Κατ' ουσίαν με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένας μηχανικός ανορθωτής.

δ) Η περιέλιξη διέγερσης που επιτυγχάνεται με τις ψήκτρες. Αυτές εφάπτονται στην περιφέρεια του συλλέκτη, με αποτέλεσμα την ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ του περιστρεφόμενου ρότορα και του ακίνητου στάτη. Επίσης, η κατασκευή της περιέλιξης του ρότορα έχει δύο μορφές: το απλό βραχυτύλιγμα και το κυματοτύλιγμα.

Πιο συγκεκριμένα:

- Στην πρώτη περίπτωση, τα άκρα κάθε πηνίου συνδέονται σε δύο γειτονικούς τομείς.
- Στην δεύτερη περίπτωση, το κάθε πηνίο δεν συνδέεται με γειτονικούς τομείς, αλλά το τύλιγμα προχωρεί από πόλο σε πόλο υπό μορφή κύματος.

ε) Ο ανεμιστήρας. Μηχανή που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ροής. Αποτελείται από μία περιστρεφόμενη διάταξη πτερυγίων ή λεπίδων, οι οποίες δρουν επί του ρευστού. Το περιστρεφόμενο συγκρότημα των πτερυγίων και της πλήμνης είναι γνωστό ως στροφέιο ή δρομέας. Συνήθως περιέχεται σε κάποια μορφή στεγνής θήκης. Αυτό μπορεί να κατευθύνει τη ροή του αέρα ή να αποτρέψει αντικείμενα από το να έρθουν σε επαφή με τις λεπίδες του ανεμιστήρα. Οι περισσότεροι ανεμιστήρες είναι ηλεκτρικοί αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες πηγές ενεργείας, όπως οι υδραυλικοί κινητήρες και οι κινητήρες εσωτερικής καύσης. Αμφότεροι οι ανεμιστήρες παράγουν ρεύματα μεγάλου όγκου και χαμηλής πίεσης.

Συνεχίζοντας την ανάλυση των ηλεκτροκινητήρων συνεχούς ρεύματος DC έχουμε επίσης τον στάτη. Πιο συγκεκριμένα:

- Ο στάτης αποτελείται από μόνιμους ή τεχνητούς μαγνήτες, οι οποίοι δημιουργούν το μαγνητικό πεδίο. Εκτός από αυτό, χωρίζονται σε επιμέρους τμήματα. Αυτά είναι: το ζύγωμα, οι μαγνητικοί πόλοι, η περιέλιξη, το κλεμνοκιβώτιο ή ακροκιβώτιο και τέλος το περίβλημα.

Περιγράφοντας κάθε ένα από τα ανωτέρω τμήματα θα αναφέρουμε τα ακόλουθα:

α) Το ζύγωμα είναι το μη κινητό ή σταθερό τμήμα της μηχανής συνεχούς ρεύματος. Το σχήμα του είναι δακτυλιοειδούς κυλίνδρου, που περιλαμβάνει χυτοχάλυβα ή ελατό σίδηρο. Η μαγνητική ροή (Φ_e) που παράγεται από την περιέλιξη διέγερσης ή την περιέλιξη των πόλων του στάτη λαμβάνεται διαμέσου του ζυγώματος.

β) Οι μαγνητικοί πόλοι διακρίνονται σε κύριους και βοηθητικούς. Κατασκευάζονται από λεπτά ελάσματα (φύλλα), τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους για τη μείωση των δινορευμάτων. Επιπλέον, στο κάτω μέρος του πόλου από την πλευρά του ρότορα είναι πλατύτερο και ονομάζεται πέδιλο. Ακόμη και αυτό είναι αναγκαίο, για να διατηρεί μικρές τις αμπεροστροφές διέγερσης της μηχανής.

γ) Η περιέλιξη του στάτη που διαρρέεται από συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται διέγερση. Αποτέλεσμα είναι η παραγωγή της απαιτούμενης σταθερής ροής (Φ).

δ) Το κλεμνοκιβώτιο ή ακροκιβώτιο είναι ένα κουτί στερεωμένο πάνω στο εξωτερικό κέλυφος της μηχανής. Εντός αυτού οδηγούνται οι ακροδέκτες της περιέλιξης του στάτη και του ρότορα. Οι θέσεις των ακροδεκτών είναι τέτοιες, ώστε η περιέλιξη του στάτη να συνδέεται εύκολα και χωρίς κίνδυνο βραχυκύκλωσης σε αστέρα ή τρίγωνο. Για να υπάρξει η σύνδεση των ακροδεκτών πρέπει να χρησιμοποιούνται ειδικές λάμες.

ε) Τέλος, έχουμε το περίβλημα, το οποίο καλύπτει ένα αντικείμενο προκειμένου να το προστατέψει ή να αποκρύψει το εσωτερικό του.

Τελειώνοντας την ανάλυση των ηλεκτροκινητήρων συνεχούς ρεύματος DC υπάρχουν:

- Οι ψήκτρες ή καρβουνάκια, τα οποία τοποθετούνται στο χώρο μεταξύ των πόλων, όπου δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο. Αυτό λέγεται ουδέτερη ζώνη. Στην περίπτωση που βρεθούν υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου, τότε θερμαίνονται και δημιουργούν σπινθήρες, με αποτέλεσμα να καούν και να καταστρέψουν τον συλλέκτη. Επιπροσθέτως, χρησιμεύουν στο να έρχονται σε επαφή με τον δρομέα τροφοδοτώντας τον με ρεύμα.

Βασικές και χρήσιμες έννοιες

Επειδή στις επόμενες ενότητες θα μας χρησιμοποιηθούν ορισμένες χρήσιμες έννοιες για την ευκολότερη ανάγνωση του κειμένου, θα πρέπει εδώ να αναφερθούμε σε αυτές, ώστε να μην γεννηθούν πιο κάτω απορίες σχετικά με αυτές. Ορισμένες εξ αυτών είναι ο ορισμός των όρων μαγνήτης, αισθητήρας, έξυπνο υλικό, ευφυές υλικό, ενσωματωμένος οδηγός κινητήρα και BrushlessDC.

Τί είναι μαγνήτης;

Μαγνήτης είναι συνήθως ένα μεταλλικό υλικό ή σώμα που δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο περιβάλλοντα χώρο. Το πεδίο αυτό εντοπίζεται από την αλληλεπίδραση του μαγνήτη με άλλα σώματα. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να έλκει μικρά τεμάχια σιδήρου ή να προσανατολίζεται παράλληλα με τις δυναμικές γραμμές του γήινου μαγνητικού πεδίου.

Τί είναι αισθητήρας;

Αισθητήρας είναι συσκευή που ανιχνεύει ένα φυσικό μέγεθος και παράγει από αυτό μία μετρήσιμη έξοδο. Ακόμα χρησιμοποιούνται σε καθημερινά αντικείμενα, όπως τα κουμπία από τους ανελκυστήρες που έχουν ευαισθησία στην αφή. Επίσης, συναντάμε αισθητήρες στα αυτοκίνητα, σε μηχανές, στην ιατρική, στη ρομποτική αλλά και στη βιομηχανία.

Τί είναι το έξυπνο υλικό;

Το έξυπνο υλικό είναι η συμπεριφορά, η οποία έχει σχέση με τη δομή και την ιδιότητα του υλικού. Αυτό μας έχει οδηγήσει στο να τα αποκαλούμε έξυπνο ή ευφυές υλικό.

Τί είναι ευφυές υλικό;

Ευφυές υλικό είναι το σύστημα που έχει την ικανότητα να μεταβάλλει τη συμπεριφορά του ή ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του. Επιπροσθέτως, για να γίνει αυτό πρέπει να υπάρχει ως δεδομένος ο ελεγχόμενος τρόπος μίας διέγερσης. Ορισμένα παραδείγματα για τη μεταβολή της συμπεριφοράς τους είναι: το σχήμα, η ιδιοσυχνότητα και ο συντελεστής απόσβεσης δονήσεως.

Τί είναι ενσωματωμένος οδηγός κινητήρα;

Ενσωματωμένος οδηγός κινητήρα είναι μια ποικιλία προσεγγίσεων ελέγχου κινητήρα σταθερής λειτουργίας BLDC. Οι προσεγγίσεις αυτές αλλάζουν από αισθητήρα σε αισθητήρα σε τραπεζοειδείς ή τετραγωνικούζή ημιτονοειδείς παλμούς. Αυτοί οι μηχανισμοί ελέγχου εξαλείφουν την ανάγκη των χρηστών να αναπτύξουν λογισμικό ελέγχου κινητήρα. Επιπλέον, μπορούν να διαμορφωθούν μέσω υλικού ή καταχωρητών για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης κινητήρα σε διάφορες εφαρμογές.

Ανάλυση σχετικά με τους προαναφερθέντες παλμούς (τραπεζοειδείς – τετραγωνικούς και ημιτονοειδείς).

- Ο τραπεζοειδής ή τετραγωνικός παλμός γίνεται με την τροφοδοσία ρεύματος διάρκειας 120° ηλεκτρικών μοιρών συγχρονισμένη με την τάση εξ' επαγωγής. Οι παλμοί ρεύματος είναι συγχρονισμένοι με τη τάση εξ' επαγωγής, έτσι ώστε το σταθερό τμήμα της τάσης να συμπίπτει με τα διαστήματα όπου το φασικό ρεύμα διατηρεί σταθερή τιμή. Στις μηχανές αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται αισθητήρες *Hall*, καθώς είναι απαραίτητη η γνώση της θέσης του δρομέα μόνο στα σημεία μετάβασης, δηλαδή κάθε 60° ηλεκτρικές μοίρες. Η οδήγηση αυτού του τύπου κινητήρων γίνεται με χρήση τριφασικού αντιστροφέα.
- Ο ημιτονοειδής παλμός προέκυψε από την προσπάθεια κατασκευής μίας σύγχρονης μηχανής χωρίς το τύλιγμα διεγέρσεως. Αυτό έγινε δυνατό αντικαθιστώντας το τύλιγμα με μόνιμους μαγνήτες ημιτονοειδούς κατανομής μαγνητικού πεδίου. Οι μηχανές αυτές τροφοδοτούνται με τριφασική ημιτονοειδή τάση και λειτουργούν υπό την αρχή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Σε λειτουργία σταθερών στροφών δεν απαιτείται γνώση της ακριβούς θέσης του, καθώς η μηχανή περιστρέφεται με τον σύγχρονο αριθμό στροφών. Όταν, όμως, έχουμε μεταβολή της συχνότητας περιστροφής, απαιτείται ακριβής εποπτεία της θέσης του δρομέα, ώστε οι τάσεις τροφοδοσίας που θα παραχθούν να συγχρονίζονται με την τάση εξ' επαγωγής και κατ' επέκταση με την περιστροφή του δρομέα. Η οδήγηση αυτού του τύπου κινητήρων γίνεται συνήθως με τριφασικό αντιστροφέα.

Κατά την ανάλυση του τραπεζοειδούς ή τετραγωνικού παλμού αναφερθήκαμε στον αισθητήρα *Hall*. Στο τμήμα αυτό της παρούσας εργασίας θα αναπτύξουμε συνοπτικά τον τρόπο λειτουργίας ή διαφορετικά το φαινόμενο *Hall*.

Ο συγκεκριμένος είναι ένας αισθητήρας μαγνητικού πεδίου. Όταν εφαρμόζεται σε αυτόν μαγνητικό πεδίο έντασης και τροφοδοτείται από συνεχές ρεύμα, αναπτύσσει τάση στους ακροδέκτες του. Όταν ένας ρευματοφόρος αγωγός βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε η επαγωγή ασκεί εγκάρσια δύναμη στους φορείς ρεύματος και τους ωθεί στη μία πλευρά του αγωγού. Το παραπάνω φαινόμενο είναι γνωστό ως φαινόμενο *Hall*.

Σε αντίθεση από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες, η μετάβαση σε έναν κινητήρα BLDC ελέγχεται ηλεκτρονικά. Για να περιστραφεί ο δρομέας του κινητήρα, τα τυλίγματα του στάτη πρέπει να τροφοδοτηθούν με μία συγκεκριμένη ακολουθία, καθώς με αυτό τον τρόπο αποφασίζεται ποιό τύλιγμα θα τροφοδοτηθεί, ώστε να δημιουργηθεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την ακριβή θέση του δρομέα ανά πάσα στιγμή. Αυτό καθίσταται δυνατό με την τοποθέτηση τριών αισθητήρων *Hall*. Οι αισθητήρες συνήθως τοποθετούνται στο στάτη της μηχανής, σε διαστήματα των 60° ή 120° μοιρών. Όταν ένας μαγνητικός πόλος περάσει δίπλα από τον αισθητήρα *Hall* δημιουργεί ένα υψηλό ή χαμηλό σήμα, ανάλογα με την πολικότητα του. Με την ανάγνωση και αποκωδικοποίηση του συνδυασμού των τριών σημάτων των αισθητήρων *Hall*, καθίσταται δυνατή η επιλογή της κατάλληλης ακολουθίας για την ηλεκτρονική μετάβαση. Επίσης, σε σπάνιες περιπτώσεις, οι αισθητήρες *Hall* τοποθετούνται στο σταθερό τμήμα της μηχανής, ενώ τοποθετούνται επιπρόσθετοι μαγνήτες μικρότερης κλίμακας στον δρομέα. Οι μαγνήτες αυτοί τοποθετούνται με σκοπό να έχουν ίδια πολικότητα με τους μόνιμους μαγνήτες του δρομέα, έτσι ώστε, όταν αυτός περιστρέφεται, οι αισθητήρες *Hall* να δίνουν το κατάλληλο αποτέλεσμα.

Τί είναι το BrushlessDC;

Το BrushlessDC (BLDC) είναι ηλεκτροκινητήρες DC χωρίς κινητήρα. Έχουν ενσωματωμένο οδηγό κινητήρα για έλεγχο και έξυπνο οδηγό πύλης. Επίσης, σε κάθε μετάβαση της τροφοδοσίας του στάτη απαιτείται η ύπαρξη ενός τυλίγματος, από το οποίο εισέρχεται το ρεύμα, και ενός τυλίγματος, από το οποίο να εξέρχεται. Κάθε τύλιγμα άγει συνεχόμενα για 120° ηλεκτρικές μοίρες. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή που εμφανίζεται στον άξονα της μηχανής παράγεται μέσω της αλληλεπίδρασης των

πεδίων του στάτη και του δρομέα. Η ροπή αυτή μεγιστοποιείται, όταν τα διανύσματα των πεδίων αυτών είναι κάθετα μεταξύ τους και μειώνονται όσο αυτά τείνουν να γίνουν παράλληλα. Προκειμένου να διατηρείται αυτή η καθετότητα καθ' όλη τη διάρκεια της περιστροφής του δρομέα, το μαγνητικό πεδίο του στάτη πρέπει να περιστρέφεται μαζί με τον δρομέα. Για αυτό το λόγο υπάρχει μια συγκεκριμένη ακολουθία μεταβάσεων, ώστε το πεδίο του στάτη να μετακινείται στο διάκενο ανάλογα με την ηλεκτρική γωνία που έχει διανύσει ο δρομέας.

Οι μεταβάσεις λαμβάνουν χώρα κάθε 60° ηλεκτρικής περιστροφής και κάθε τύλιγμα άγει συνεχόμενα για 120° ηλεκτρικές μοίρες, στο πέρας των οποίων πραγματοποιείται μετάβαση του ρεύματος από τη μία φάση στην επόμενη. Αυτό επαναλαμβάνεται έξι φορές προκειμένου να ολοκληρωθεί ένας ηλεκτρικός κύκλος. Κάθε αλλαγή της τιμής ενός εκ' των σημάτων *Hall* πρέπει να μεταφράζεται σε αλλαγή των φάσεων αγωγής από τον τριφασικό αντιστροφέα, με τρόπο που να διατηρείται η ορθή διαδοχή διέγερσης. Όσον αφορά στη μηχανική περιστροφή του δρομέα, ο αριθμός των ζευγών πόλων του κινητήρα καθορίζει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η ηλεκτρική γωνία ή η ταχύτητα από τη μηχανική. Για την υλοποίηση του ελέγχου απαιτείται η γνώση της θέσης του δρομέα σε διακριτές θέσεις 60° μοιρών. Για κάθε 60° ηλεκτρικές μοίρες περιστροφής, ένας από τους αισθητήρες *Hall* δίνεισήμα. Η ακριβής σχέση μεταξύ ηλεκτρικής γωνίας και σημάτων *Hall*, αποτυπώνεται, και παρουσιάζονται οι κυματομορφές των πολικών τάσεων εξ' επαγωγής, του ρεύματος κάθε φάσης και της ροπής.

Λόγω του ότι έχουμε αναφερθεί αρκετά στις στροφές όπως και τις ροπές του κινητήρα BLDC πρέπει σε αυτότο σημείο να αναλύσουμε τα χαρακτηριστικά του. Υπάρχουν δύο βασικές παράμετροι που καθορίζουν την ικανότητα παραγωγής ροπής ενός κινητήρα BLDC, αυτές είναι η ροπή ονομαστικού φορτίου TR και η μέγιστη ροπή φορτίου TP. Αναλυτικότερα, σε ό,τι αφορά στη ροπή ονομαστικού φορτίου TR και η μέγιστη ροπή φορτίου TP έχουμε:

- Η ονομαστική ροπή φορτίου TR είναι για εφαρμογές σταθερού φορτίου, και η μηχανή μπορεί να παράγει συνεχόμενη ροπή με μέγιστη τιμή. Αν το φορτίο ξεπεράσει την τιμή, προκειμένου να καλύψει την ροπή φορτίου, ο κινητήρας θα αναπτύξει στα τυλίγματά του τιμές ρεύματος μεγαλύτερες της ονομαστικής, προκαλώντας σε αυτά υπερθέρμανση και πιθανώς βλάβες. Η παραγόμενη ροπή παραμένει σταθερή, όσο η ταχύτητα παραμένει μικρότερη της ονομαστικής. Η

μηχανή μπορεί να φτάσει τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής περίπου 150% της ονομαστικής, αλλά αυτό θα επιφέρει μείωση της παραγόμενης ροπής.

- Η μέγιστη ροπή φορτίου TP είναι για εφαρμογές όπου υπάρχουν συχνές εκκινήσεις ή παύσεις στη λειτουργία της μηχανής με προσθήκη φορτίου. Η μηχανή μπορεί να καλείται να αναπτύξει τιμές ηλεκτρομαγνητικής ροπής μεγαλύτερες από την ονομαστική. Αυτή η απαίτηση διαρκεί για μικρό χρονικό διάστημα και συμβαίνει ιδίως κατά την εκκίνηση και επιτάχυνση του κινητήρα. Η επιπλέον αυτή ροπή χρειάζεται, ώστε να ξεπεραστεί η αδράνεια του φορτίου και του ίδιου του δρομέα, και δεν μπορεί με τίποτα να ξεπεράσει την τιμή της μέγιστης ροπής TP. Γενικά, η ροπή φορτίου μπορεί να ξεπεράσει την ονομαστική τιμή, υπό την προϋπόθεση όμως ότι θα είναι για μικρό σχετικά χρονικό διάστημα και η τιμή της θα είναι μικρότερη από την τιμή TP.

Ένα παράδειγμα σχετικό με τα όσα αναφέραμε για τον *BrushlessDC* κινητήρα είναι το ακόλουθο. Από τον Ιανουάριο του 2015 και εξής, οι κινητήρες με ονομαστική ισχύ από 7,5 έως 375 kW και από τον Ιανουάριο του 2017 και εξής, οι κινητήρες με ονομαστική ισχύ από 0,75 έως 375 kW θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της κατηγορίας ενεργειακής αποδοτικότητας IE3 (Premium). Αντίθετα, κινητήρες που ελέγχονται από μετατροπείς συχνότητας εξαιρούνται από αυτόν τον κανονισμό, και θα πρέπει να πληρούν το πρότυπο IE2. Η βελτιωμένη τεχνολογία και αποδοτικότητα ενός κινητήρα μόνιμου μαγνήτη συνεπάγεται με ένα υψηλότερο αρχικό κόστος αγοράς. Το κόστος αυτό, όμως, θα αποσβησθεί αργότερα, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του κινητήρα.

Στη σημερινή εποχή είναι γνωστό ότι οι ηλεκτροκινητήρες καταναλώνουν το 65% της ενέργειας που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία, αλλά είναι λιγότερο γνωστό το γεγονός ότι το 96% του κόστους διάρκειας ζωής (lifetime cost) ενός ηλεκτροκινητήρα συνδέεται με την κατανάλωση ενέργειας. Αυτό δείχνει τη σημασία της συνολικής απόδοσης σε σχέση με το αρχικό κόστος αγοράς, σύμφωνα με τους όρους σπουδαιότητας του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας (TCO – Total Cost of Ownership). Προβαίνοντας σε μία σύγκριση κινητήρα μόνιμου μαγνήτη με κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα που ελέγχεται από *inverter* παρατηρούμε ότι: οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motors) πληρούν τις απαιτήσεις της ταξινόμησης IE4 (Super Premium). Αυτό αποδεικνύεται

από τις δυνατότητές τους για εξοικονόμηση ενέργειας έως και 40% σε σύγκριση με έναν κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα κατηγορίας IE2 που ελέγχεται από *inverter*. Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τους επαγωγικούς κινητήρες σε συνθήκες λειτουργίας μερικού φορτίου και εξαιρετικά υψηλή απόδοση σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας. Επίσης, έχουν σημαντικά υψηλότερη πυκνότητα ισχύος, η οποία εξασφαλίζει υψηλότερη απόδοση με μειωμένες ανάγκες σε χώρο και όγκο για την εγκατάσταση.

Ο σύγχρονος σχεδιασμός των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη τους καθιστά ανώτερους όχι μόνο σε ό,τι αφορά στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ισχύ, αλλά και στη δυνατότητα διατήρησης σταθερής ταχύτητας, ανεξάρτητα από το φορτίο. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα του κινητήρα δεν αλλάζει σε τυχόν μεταβολές του φορτίου ή σε ενδεχόμενη πτώση τάσεως τουλάχιστον για όσο διάστημα η συχνότητα του δικτύου παραμένει σταθερή.

Αυτός ο σχεδιασμός μειώνει τις απώλειες θερμότητας από τον ρότορα κατά 100%, τις συνολικές απώλειες κατά περίπου 25%, και αυξάνει την συνολική απόδοση κατά 10% ή και περισσότερο. Για τον πελάτη που εγκαθιστά έναν κινητήρα μόνιμου μαγνήτη, αυτός μεταφράζεται σε χαμηλότερο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας, μείωση των εκπομπών (CO_2) και συνεχόμενη εξοικονόμηση ενέργειας. Το χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης των μόνιμων μαγνήτων τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογές, όπως ανεμιστήρες, αντλίες και αεροσυμπιεστές, καθώς και για εφαρμογές φορτίου σταθερής ροπής, όπως είναι οι ανελκυστήρες και οι μεταφορικές ταινίες.

Στη συνέχεια, δίνεται μία σύγκριση, όπου ένας ασύγχρονος κινητήρας (ASM – Asynchronous Motor) ελέγχεται από μετατροπέα συχνότητας και ένας κινητήρας μόνιμου μαγνήτη. Αμφότεροι εκτελούν πανομοιότυπα καθήκοντα. Η σύγκριση έγινε σε ένα εργοστάσιο επεξεργασίας αποβλήτων στη Γερμανία. Τα δύο μοτέρ τροφοδοτούν έναν παχυντικό δίσκο επί επτά ώρες ημερησίως. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι ο ασύγχρονος κινητήρας λειτουργεί υπό βέλτιστη αποδοτικότητα, χρησιμοποιήθηκε ένας μετατροπέας συχνότητας για την παρακολούθηση των φορτίων του κινητήρα. Τέλος, προκειμένου να είναι βέβαιο ότι οι ενδεχόμενες διαφορές στην απόδοση θα αποδοθούν μόνο στους κινητήρες, τα δύο συστήματα κίνησης χρησιμοποιούν το ίδιο ακριβώς κιβώτιο ταχυτήτων. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας: Σύγκριση ασύγχρονου και σύγχρονου κινητήρα μόνιμης μαγνήτισης

	Ροπή (Nm)	Ταχύτητα (RPM)	Απόδοση Ενέργειας (%)	Κατανάλωση (kW/hr)	Τετραετής κατανάλωση (kW)
Ασύγχρονος κινητήρας	2,62	1.350	61,5	0,26	2,657
Σύγχρονος κινητήρας μόνιμης μαγνήτισης	3,50	1.500	87,7	0,16	1.635

Στον πίνακα διακρίνουμε ότι ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη εξοικονόμησε 40% ενέργεια σε σχέση με τον ασύγχρονο κινητήρα, η οποία για μία περίοδο τεσσάρων ετών μεταφράζεται σε 1.022 kW/hr. Δεδομένου ότι πιθανότατα η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας θα αυξηθεί μέσα σε αυτό το διάστημα, θα αυξηθεί και η πραγματική αξία της εξοικονόμησης.

Συνεχίζοντας την ανάλυση των όρων που μας απασχολούν στην παρούσα εργασία, θα αναφερθούμε στο τί είναι σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη και τις διαφορές του από τους ηλεκτρικούς κινητήρες.

Τί είναι, επομένως, ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη;

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας στον σύγχρονο κόσμο, ευνοεί την αντικατάσταση σε πολλές εφαρμογές των κλασικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος και των ασύγχρονων επαγωγικών κινητήρων με μηχανές νέας τεχνολογίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, του νέου αυτού τύπου μηχανών, είναι και η σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη. Η ευκολία στον έλεγχο, η απουσία ψηκτρών και των προβλημάτων που αυτές δημιουργούν, ο μεγάλος βαθμός απόδοσης καθώς και η υψηλή πυκνότητα ισχύος, την έχουν καταστήσει μια ελκυστική εναλλακτική για μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

Ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη έχει τη ροπή εκκίνησης που οδηγεί στην ικανότητα υπερφόρτωσης από τον τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα με υψηλότερο από το επίπεδο ισχύος. Η μέγιστη ροπή εκκίνησης, αλλά και η ονομαστική που μπορεί να δεχθεί, είναι 3,6 φορές. Αντίθετα στον ασύγχρονο κινητήρα, η μέγιστη ροπή εκκίνησης που δέχεται είναι 1,6 φορές. Εκτός από αυτή τη διαφορά υπάρχει και η

εξής επιπλέον: ο δεύτερος λειτουργεί με ψήκτρες ή καρβουνάκια, ενώ ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη μεγιστοποιεί την απόδοση των τριών φάσεων του χωρίς να χρησιμοποιεί τις ψήκτρες (καρβουνάκια). Μία ακόμη διαφορά εντοπίζεται στον στάτη σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη, γιατί είναι κατασκευασμένος από στοιβαγμένα ελάσματα σιλικονούχου χάλυβα (*siliconsteel*) που έχει πάχος 0,3 έως 0,5mm.

Ακόμα υπάρχουν δύο είδη στάτη με συγκεκριμένη μορφολογία αλλά και χαρακτηριστικά. Αυτά είναι ο στάτης με αυλακώσεις και ο στάτης χωρίς αυλακώσεις. Ανάμεσα σε κάθε στρώση ελασμάτων παρεμβάλλεται μια ειδική μονωτική ρητίνη. Αποτέλεσμα αυτής είναι να έχει αύξηση της αντίστασης αγωγής μεταξύ των στρώσεων χάλυβα, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των δινορευμάτων.

Επιπλέον, τα τυλίγματα του διανέμονται με διαφορετικό τρόπο και συνήθως ο στάτης μοιάζει με εκείνον του κινητήρα επαγωγής. Τοποθετείται σε αξονικές τομές στην εσωτερική περιφέρεια, με κάθε ένα από αυτά να κατασκευάζεται με τη διασύνδεση μεγάλου αριθμού ελιγμάτων χαλκού. Επίσης οι κινητήρες BLDC διαθέτουν τρία τυλίγματα στο στάτη σε συνδεσμολογία αστέρα. Ο δρομέας είναι συνήθως κατασκευασμένος από ελασματοποιημένο σιλικονούχο χάλυβα κυλινδρικής μορφής. Στην επιφάνεια που δημιουργείται, τοποθετούνται οι μόνιμοι μαγνήτες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να σχηματίζουν ζεύγη πόλων αντίθετης πολικότητας.

Ανάλογα με το σχήμα και την τοποθέτηση των μαγνητών υπάρχουν οι εξής τοπολογίες δρομέα: δρομέας με μαγνήτες συγκολλημένους στην επιφάνειά του, δρομέας με μαγνήτες στο εσωτερικό του και τέλος δρομέας με μαγνήτες κάθετα τοποθετημένους στο εσωτερικό του. Η επιλογή του κατάλληλου μαγνητικού υλικού για την κατασκευή παίζει σημαντικό ρόλο για την απαιτούμενη βάση πυκνότητας μαγνητικού πεδίου.

Το πιο συνηθισμένο υλικό κατά το παρελθόν για να γίνει η παρασκευή μόνιμων μαγνητών ήταν οι κεραμικοί μαγνήτες ή φερρίτες. Με την πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας, σταδιακά, άρχισαν να χρησιμοποιούνται νέες μέθοδοι και τεχνολογίες υψηλής ενέργειας, που είχαν ως αποτέλεσμα την εύρεση κραμάτων σπάνιων γαιών για την κατασκευή νέων μαγνητών.

Κατασκευαστικά, ο δρομέας μπορεί να τοποθετηθεί εσωτερικά ή εξωτερικά του στάτη της μηχανής, όμως προτιμώνται οι μηχανές με εσωτερικό δρομέα, γιατί ο τρόπος που έχει τα τυλίγματα στον στάτη βρίσκονται πιο κοντά στο εσωτερικό μέρος της μηχανής, με αποτέλεσμα την εύκολη αποβολή θερμότητας στο περιβάλλον.

Έχοντας αναφερθεί στους φερρίτες, κρίνεται απαραίτητο σε αυτό το σημείο της εργασίας να γίνει μία σύντομη ιστορική αναδρομή σε αυτούς καθώς και κάποια στοιχεία σχετικά με τους κεραμικούς μαγνήτες.

Αρχικά, πρέπει να σημειώσουμε ότι οι πρώτοι φερρίτες μαγνήτες ανακαλύφθηκαν στην Κίνα τον 4^ο αιώνα π.Χ. Είναι φυσικός μαλακός φερρίτης (Fe_3O_4) και ένα παράδειγμα χρήσης φερρίτη είναι η πυξίδα που εφευρέθηκε και χρησιμοποιήθηκε από τους Κινέζους.

Τη δεκαετία του 1930, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, χρειαζόταν μαγνητικό υλικό με χαμηλή απώλεια της υψηλής συχνότητας. Ορισμένες από τις χώρες που ανέπτυξαν μαγνήτες από φερρίτη είναι η Γαλλία, η Ιαπωνία, η Γερμανία αλλά και η Ολλανδία. Το σνούκερ προήλθε από τα εργαστήρια της εταιρίας Philips στην Ολλανδία και περιέχει άριστη απόδοση. Η δομή του έχει ψευδάργυρο μαλακό μαγνήτη. Το 1952 αναπτύχθηκε φερρίτης μόνιμου μαγνήτη συμπεριλαμβανομένου το ($BaFe_{12}O_{19}$). Η τεχνολογία κατασκευής έγινε όλο και πιο τέλεια λόγω της ανάπτυξης της εφαρμογής αυτής.

Αναλύοντας τους κεραμικούς μαγνήτες και αναφέροντας κάποια στοιχεία σχετικά με αυτούς πρέπει να αναφέρουμε τα αμέσως κατωτέρω. Επιπλέον, θα συνεχίσουμε, αναλύοντας τον στάτη με αυλακώσεις και τον στάτη χωρίς αυλακώσεις.

- Οι κεραμικοί μαγνήτες ή φερρίτες αποτελούνται κυρίως από σκόνη μετάλλου Fe_2O_3 , (= οξείδια σιδήρου), $BaCO_3$ (= ανθρακικό βάριο) ή $SrCO_3$ (= ανθρακικό στρόντιο). Επίσης, υπάρχουν δύο τύποι μαγνητών, ο ισότροπος και ο ανισότροπος μαγνήτης. Ο δεύτερος χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, οι οποίες είναι ο ξηρός και ο υγρός.

Ακόμη και σήμερα, η χρήση τους είναι ευρύτατη και βρίσκουν εφαρμογή στην παρασκευή ηλεκτρικών κινητήρων, μαγνητικών συμπλεκτών, διαχωριστών, σφινγκτήρων όπως και μεγαφώνων. Ο συγκεκριμένως τύπος φερρίτη είναι ο ίδιος με αυτόν τον μαύρο μαγνήτη που έχουν οι πίνακες ανακοινώσεων στα γραφεία. Επίσης, ο συγκεκριμένος τύπος μαγνήτη δεν είναι επιρρεπής στη διάβρωση και δεν χρειάζεται να υποστεί επιφανειακή επεξεργασία.

- Κράματα σπανίων γαιών λέγονται τα μέταλλα τα οποία έχουν οξείδια. Είναι γαιώδους μορφής και κλήθηκαν έτσι λόγω της εξαιρετικής σπανιότητάς τους. Αυτά τα μέταλλα λέγονται λανθανίδες εκ του ονόματος του πρώτου στοιχείου της

κατηγορίας αυτών στον περιοδικό πίνακα (= κατάλογος των χημικών στοιχείων σε μορφή πίνακα, όπου παρουσιάζονται ο ατομικός αριθμός καθώς και οι φυσικές και χημικές ιδιότητες κάθε στοιχείου).

Σε ό,τι αφορά στον στάτη με αυλακώσεις και στον στάτη χωρίς αυλακώσεις έχουμε να πούμε τα ακόλουθα:

- Ο στάτης με αυλακώσεις έχει κατασκευαστικά μικρό μαγνητικό διάκενο, με αποτέλεσμα ο συντελεστής διαπερατότητας και η πυκνότητα μαγνητικής ροής του διακένου να είναι αυξημένη. Αυτό συνεπάγεται ότι έχει μεγαλύτερη παραγόμενη ροπή και αυξημένη απόδοση. Επίσης, η μεγάλη επιφάνεια επαφής μεταξύ των τυλιγμάτων και του στάτη προσφέρει καλή απαγωγή θερμότητας από τα τυλίγματα προς το περιβάλλον.

Το πρώτο βασικό μειονέκτημα αυτής της μορφολογίας είναι το αυξημένο κόστος που δημιουργεί η ανάπτυξη ταλαντώσεων στην παραγόμενη ροπή, λόγω της μη ομοιογενούς κατανομής της μαγνητικής διαπερατότητας του διακένου ή ροπής αντιδράσεως. Ένα επιπλέον μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι πρέπει να εισαχθούν επιπλέον τυλίγματα στις αυλακώσεις, κάτι το οποίο είναι αρκετά δύσκολο.

Προκειμένου να αντιμετωπισθεί το πρώτο πρόβλημα, αυτό της ροπής αντιδράσεως, αναπτύχθηκε η μορφολογία στάτη με αυλακώσεις. Η δομή αυτή έχει αυλακώσεις χωρίς ανοίγματα, με τα πέλαμα των “δοντιών” του στάτη να ενώνονται, σχηματίζοντας μία λεία επιφάνεια. Αυτή η ομοιογένεια του διακένου εξασφαλίζει πολύ μικρές αλλαγές στη μαγνητική αντίσταση διακένου που συναντά ο μαγνήτης ενώ περιστρέφεται, μειώνοντας τη ροπή αντιδράσεως.

Οι ενώσεις των αυλακώσεων υστερούν από πλευράς μαγνητικής απόδοσης, καθώς αυξάνουν τη ροή σκεδάσεως και στερούν ένα τμήμα της μαγνητικής ροής των μαγνητών από τα τυλίγματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα παραγωγή χαμηλότερης τάσης εξ' επαγωγής και κατ' επέκτασιν μειωμένη απόδοση.

- Ο στάτης χωρίς αυλακώσεις δεν έχει κατασκευαστικά μαγνητικό διάκενο, γιατί τα τυλίγματα παίρνουν την μορφή “δακτυλιδιού” και τοποθετούνται στην εσωτερική επιφάνεια του στάτη. Το μαγνητικό διάκενο αποτελείται από το διάκενο αέρα μαζί με το πάχος των τυλιγμάτων. Αυτή η αύξηση στις διαστάσεις του διακένου προκαλεί μείωση στον συντελεστή διαπερατότητας και στην πυκνότητα μαγνητικής ροής του διακένου. Αυτό έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση της παραγόμενης ροπής και κατ' επέκτασιν μειωμένη απόδοση.

Η μορφολογία αυτή εμφανίζει μηδενική ροπή αντιδράσεως. Η επιφάνεια του στάτη είναι λεία και παρά τη μαγνητική αντίσταση που συναντούν οι μαγνήτες, αυτοί δεν μεταβάλλονται κατά την περιστροφή του δρομέα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα αυτής της μορφολογίας, είναι η ύπαρξη αυξημένου χώρου για την εισαγωγή τυλίγματος. Ωστόσο, η μειωμένη δυνατότητα επαγωγής θερμότητας από τα τυλίγματα προς το στάτη, μειώνει τις επιτρεπόμενες τιμές ρευμάτων λειτουργίας.

Οι πρώτες εφαρμογές μηχανών μόνιμου μαγνήτη μπορούν να χρονολογηθούν περί τα μέσα του 19ου αιώνα. Όμως, η χρήση χαμηλής ποιότητας μαγνητικών υλικών αλλά και η ύπαρξη τεχνολογιών ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης της κατέστησε μη εμπορικά βιώσιμες και αποθάρρυνε την ανάπτυξη και τη χρήση τους για πολλά χρόνια. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των μόνιμων μαγνητών υψηλής ενέργειας, αλλά και η ραγδαία πρόοδος στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος και του ελέγχου, κατέστησε τις μηχανές μόνιμου μαγνήτη ως μία ελκυστικότερη εναλλακτική εν συγκρίσει προς τις μηχανές με ηλεκτρομαγνητική διέγερση, ενώ σε πολλές εφαρμογές τις αντικατέστησε εξ' ολοκλήρου.

Εκτός από αυτά που αναφέραμε πιο πάνω στην εργασία σχετικά με το BrushlessDC, υπάρχουν και ορισμένα πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα στις σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη, τα οποία θα τα δούμε πιο αναλυτικά στην απαρίθμηση που ακολουθεί.

1. Η χρήση μόνιμων μαγνητών στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών έχει ορισμένα από τα παρακάτω πλεονεκτήματα: **α)**έχουν υψηλότερη ροπή και ισχύ εξόδου ανά όγκο, **β)**έχουν καλύτερη δυναμική συμπεριφορά, δηλαδή υψηλότερη πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο, **γ)**έχουν μείωση των απωλειών και αυξημένη απόδοση, καθώς δεν γίνονται απώλειες διεγέρσεως, δηλαδή δεν υπάρχει η απορρόφηση της άεργης ισχύος από το δίκτυο, **δ)** είναι ιδανικές για τη χρήση σε αυτόνομες εφαρμογές, **ε)** έχουν υψηλή πυκνότητα ροής, όπως και μικρότερο βάρος για όγκο δεδομένης ισχύος, **στ)** έχουν απλοποιημένη κατασκευή, η οποία έχει αυξημένη αξιοπιστία και χαμηλότερο κόστος συντήρησης, **ζ)** έχει αθόρυβη λειτουργία, **η)** μεγαλύτερο προσδόκιμο ζωής, **θ)** και τέλος μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων.

2. Το βασικό και, ίσως, το μόνο μειονέκτημα που υπάρχει στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη είναι ότι η διάρκεια ζωής στους μαγνήτες αυτούς είναι εξαρτώμενη από την καμπύλη απομαγνήτισης και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Αναφερόμενοι συνοπτικά στις εφαρμογές που χρησιμοποιούν τέτοιες μηχανές μόνιμου μαγνήτη Brushless DC είναι:

- Τα ηλεκτρικά οχήματα
- Οι αντλίες
- Οι ανεμιστήρες
- Ο έλεγχος βαλβίδων
- Η φυγόκεντρος δύναμη
- Η ρομποτική
- Ο βιομηχανικός εξοπλισμός
- Ως flywheel¹
- Για μικρής και μεσαίας ισχύος γεννήτριες, όπως οι ηλεκτρομηχανικές μονάδες φρένων
- Οι ανελκυστήρες
- Οι ανεμογεννήτριες
- Τα drone²

Σχεδίαση – Υλοποίηση

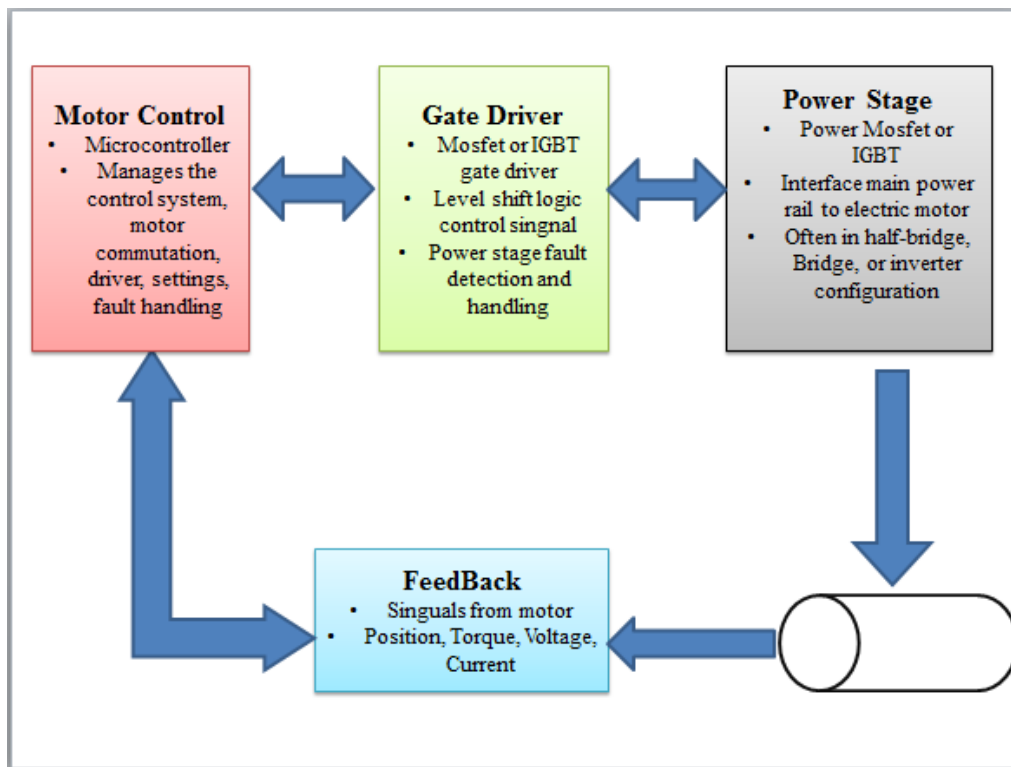
¹**Flywheel** είναι ένας σφόνδυλος, δηλαδή μία μηχανική συσκευή ειδικά σχεδιασμένη για την αποτελεσματική αποθήκευση της περιστροφικής ενέργειας. Οι σφόνδυλοι αντιστέκονται στις αλλαγές της ταχύτητας περιστροφής από τη στιγμή αδράνειας. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αλλαγή της αποθηκευμένης ενέργειας ενός σφονδύλου είναι είτε αυξάνοντας είτε μειώνοντας την ταχύτητα περιστροφής, εφαρμόζοντας μία ροπή ευθυγραμμισμένη με τον άξονα συμμετρίας.

²**Drone** ονομάζεται το μη επανδρωμένο αεροσκάφος που μπορεί να πλοηγηθεί αυτόνομα, χωρίς να ελέγχεται εξωτερικά. Επίσης, μπορεί να ελέγχεται εξ' αποστάσεως από μία συσκευή απομακρυσμένου ελέγχου. Ακόμη, αυτά χρησιμοποιούν ESC, οι οποίοι είναι ρυθμιστές ταχύτητας για κινητήρες χωρίς ψήκτες. Μια μικρή ανάλυση που μπορεί να δοθεί πάνω σε αυτό το τμήμα είναι η εξής: το ESC είναι ακριβώς όπως ένα κιβώτιο ταχυτήτων σε ένα αυτοκίνητο. Αυτό το κιβώτιο ταχυτήτων αναφέρεται στους τροχούς, όπως και σε ποιά ταχύτητα πρέπει να περιστρέφεται, με τον ίδιο τρόπο που ο ρυθμιστής ταχύτητας για τους κινητήρες που δεν έχουν ψήκτες (ESC) ελέγχει την ταχύτητα με την οποία ο κινητήρας πρέπει να περιστρέφεται, σύμφωνα με το γκάζι που του εφαρμόζουμε. Αυτό το σήμα παρέχεται από τον ελεγκτή πτήσης στην ESC που περιστρέφει τον κινητήρα.

Η τεχνική της οδήγησης των Κινητήρων BrushlessDC

Για να γίνει κατανοητή η οδήγηση ενός ηλεκτροκινητήρα BrushlessDC θα πρέπει να υπάρξουν διαφορετικά στάδια που πρέπει να ληφθούν υπόψιν, όπως ο έλεγχος κινητήρα, η κίνηση πύλης, η βαθμίδα ισχύος και η ανατροφοδότηση. Σε αυτό το σημείο σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα θα αναλύσουμε βήμα – βήμα το πώς γίνεται η ανάδραση.

Σχήμα ανάδρασης κινητήρα



Ως αρχή βλέπουμε τον έλεγχο του κινητήρα που μπορεί να παρεμποδιστεί από δύο σενάρια τα οποία είναι είτε από έναν μικροελεγκτή είτε από ένα μηχανήμα κατάστασης για την οδήγηση και τη διαχείριση του συστήματος ελέγχου, τη μεταγωγή κινητήρα, τις ρυθμίσεις του οδηγού όπως και το χειρισμό βλαβών του κινητήρα.



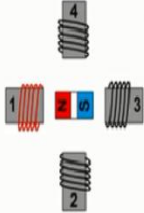
Στη συνέχεια, διακρίνουμε τρία σενάρια του οδηγού πύλης που έχει τη λογική μετατόπισης στάθμης για τον έλεγχο σημάτων και την αντιμετώπιση των σφαλμάτων της βαθμίδας ισχύος. Σε αυτή την βαθμίδα ισχύος έχουμε το *Mosfet*, το *IGBT* που έχει διεπαφή (*INAUDIBLE*) με τον ηλεκτροκινητήρα και συχνά μπορεί να είναι σε μισή γέφυρα ή σε διάταξη μετατροπέα. Κατά την διάρκεια του σταδίου της ανάδρασης λαμβάνονται πληροφορίες όπως, παράμετροι για τον κινητήρα, τη θέση, τη ροπή, το

ρεύμα του κινητήρα καθώς και την τάση που την περνά και τη χρησιμοποιεί από τον έλεγχο μοτέρ για να οδηγήσει τον κινητήρα.

Κάθε ένα από αυτά τα στάδια μπορεί να είναι ένα αυτόνομο ολοκληρωμένο κύκλωμα ή να έχει είτε ενσωματωμένο τον έλεγχο του κινητήρα και τον οδηγό πύλης είτε ενσωματωμένο το στάδιο ισχύος. Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα IC με τα τρία στάδια σε ένα μόνο τσίπ. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής οι πελάτες έχουν την δυνατότητα να επιλέγουν μια λειτουργία για την εφαρμογή τους.

Τύποι κινητήρων BrushedDC

Motor types

Brushed-DC motor	Brushless-DC motor	Stepper motor
		
<ul style="list-style-type: none">+ Low cost+ Easy to design- Brushes wear out- Inefficient	<ul style="list-style-type: none">+ Very efficient+ Long life / reliable- Expensive- Complex design	<ul style="list-style-type: none">+ Open loop position / speed control+ Simple control- Resonance- Noise
<p><u>Application Reference Designs</u> Smart Meters, Video Surveillance, Small and Large Appliances, Electronic Locks,</p>	<p><u>Application Reference Designs</u> Garden and Power Tools, Appliance Pumps and Fans, E-Mobility, Factory Automation & Logistics</p>	<p><u>Application Reference Designs</u> Printers, Refrigerator & Freezer, Mobile EPOS Printers, Stage Lighting</p>

Το brushed DC μοτέρ είναι φθηνό και εύκολο στη χρήση και στη σχεδίαση, αλλά έχει μηχανικές ψήκτρες που φθείρονται με την πάροδο του χρόνου. Είναι επίσης εξαιρετικά ανεπαρκές σε σύγκριση με άλλους τύπους κινητήρων. Από την άλλη πλευρά, οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες συνεχούς ρεύματος δεν φθείρονται ή δεν προκαλούν ακτινοβολία EMI. Αυτό καθιστά τους κινητήρες BLDC εξαιρετικά αποδοτικούς, ενώ έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και παρέχουν ομαλή κίνηση και υψηλή απόδοση. Με αυτά τα οφέλη έρχεται το υψηλό κόστος του κινητήρα και ένα πιο πολύπλοκο σχέδιο, για να το μεταχειριστεί σε σύγκριση με τις ψήκτρες ή τους βηματικούς κινητήρες.

Οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται για την αναδημιουργία μίας ομαλής κυματομορφής και κίνησης κινητήρα παρόμοιας με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος που είναι χωρίς καρβουνάκια, χρησιμοποιώντας ελεγχόμενα βήματα ανόδου και πτώσης. Με βηματικούς κινητήρες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την αρχιτεκτονική ανοιχτού βρόχου για τον έλεγχο ταχύτητας της θέσης χωρίς την ανάγκη αισθητήρων. Αυτό διευκολύνει το σχέδιο σε σύγκριση με τα συστήματα χωρίς ψήκτρες. Ωστόσο, δεδομένου ότι το ρεύμα των βηματικών κινητήρων πρέπει να ελεγχθεί προκειμένου να αποφευχθεί ο θόρυβος, οι κραδασμοί, απαιτείται συχνά ο ισχύων κανονισμός.

Brushed-DC Motors

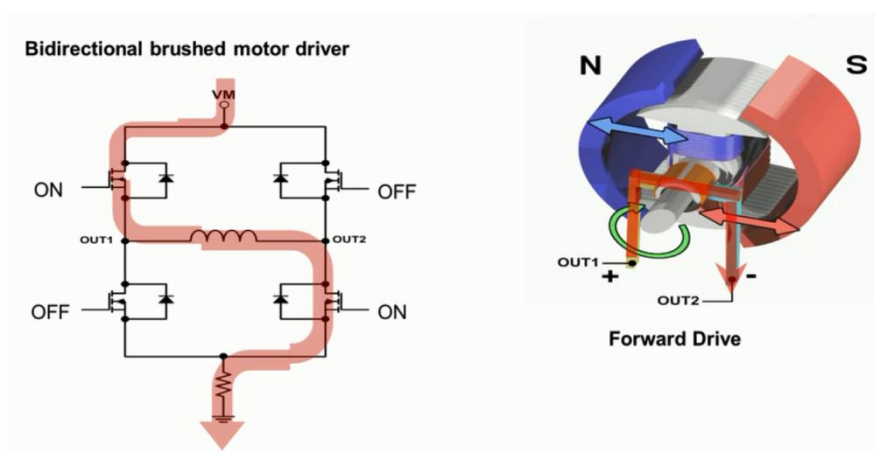
Texas Instruments – Motor Drives



Ο πρώτος τύπος κινητήρα που θα εξετάσουμε είναι ο ηλεκτροκινητήρας DC. Ένας κοινός τύπος κινητήρα brushed DC είναι ο μόνιμος μαγνήτης brushed DC κινητήρα. Σε αυτό το παράδειγμα, η κατασκευή του κινητήρα brushed DC αποτελείται από μόνιμους μαγνήτες στον στάτορα που παράγουν ένα μαγνητικό πεδίο. Υπάρχουν περιελίξεις γύρω από τον δρομέα, οι οποίες ενεργοποιούνται από το ρεύμα που ρέει μέσα από αυτά. Ένας κινητήρας ή ένας δακτύλιος ολίσθησης συνδέεται με τις περιελίξεις στον άξονα του ρότορα και οι ψήκτρες άνθρακα ή χαλκού διατηρούν σταθερή επαφή με τον μεταγωγέα για να διεξάγουν ρεύμα. Όταν οι περιελίξεις ενεργοποιούνται από το ρεύμα που ρέει διαμέσου αυτών, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο και η πολικότητά του δεν είναι ευθυγραμμισμένη με ένα μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τους μαγνήτες του στάτη. Αυτό προκαλεί την περιστροφή του δρομέα και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, για να διατηρηθεί ο περιστρεφόμενος κινητήρας συνεχούς ρεύματος προς την ίδια κατεύθυνση.

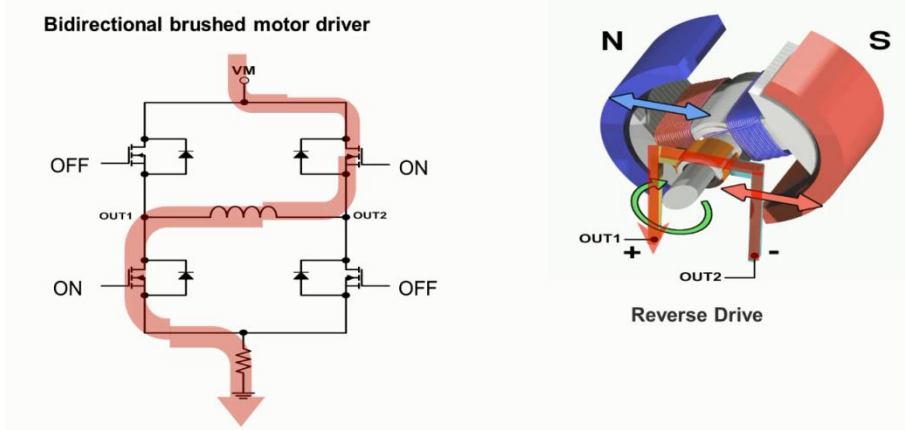
Εδώ μπορούμε να δούμε κάποιες λειτουργίες για τον αμφίδρομο έλεγχο ενός κινητήρα brushed DC. Επίσης θα εξετάσουμε τη χρήση της αρχιτεκτονικής γέφυρας.

Το σύμβολο του επαγωγέα θα αντιπροσωπεύει τις περιελίξεις του κινητήρα. Ακόμη, σε αυτή τη ρύθμιση, θα οδηγήσουμε προς τα εμπρός και μετά δεξιόστροφα. Επίσης, θα ενεργοποιούμε το Mosfet υψηλής πλευράς που είναι στην αριστερή πλευρά και το Mosfet χαμηλής πλευράς που είναι στην δεξιά. Αυτό θα δημιουργήσει μία διαδρομή ροής για το ρεύμα μέσω της εξόδου, των περιελίξεων του κινητήρα και μέσω της εξόδου προς τη γείωση, ούτως ώστε να προκαλέσει την περιστροφή του κινητήρα προς τα εμπρός.

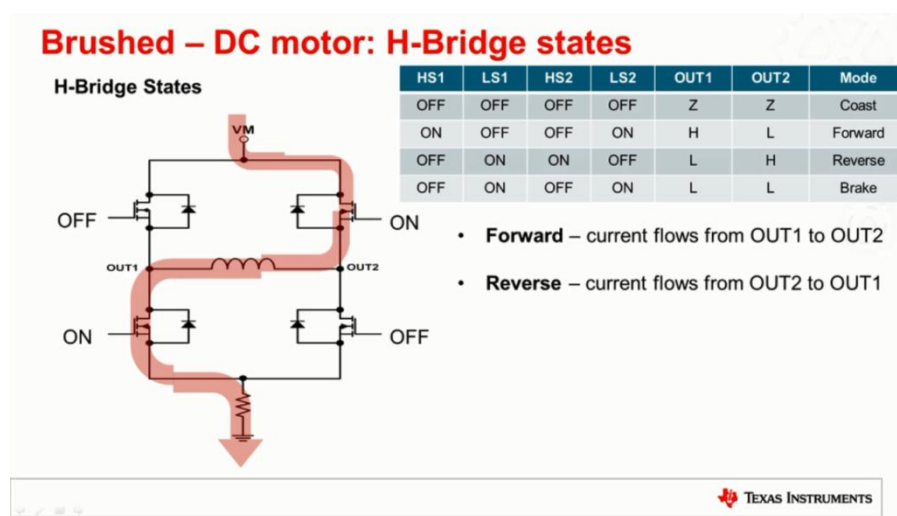


Τώρα, θα αλλάξουμε την κατεύθυνση του κινητήρα brush DC. Αυτό θα το πετύχουμε με την αλλαγή της πολικότητας του ρεύματος που ρέει μέσα από τις περιελίξεις. Σε αυτήν την περίπτωση, θα απενεργοποιήσαμε όλα τα Mosfet που μας έδωσαν την κατεύθυνση προς τα εμπρός και θα ενεργοποιούμε τα αντίθετα. Αυτό επιτρέπει στο ρεύμα να διέρχεται κατά μήκος των περιελίξεων, μέσω της εξόδου προς τη γείωση. Κάτι τέτοιο προκαλεί στον κινητήρα την περιστροφή προς τα πίσω, δηλαδή προς την αντίθετη φορά από εκείνη των δεικτών του ρολογιού. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι λόγω της κατασκευής του, ο κινητήρας είναι ουσιαστικά ένας επαγωγέας, και η τρέχουσα κατεύθυνση δεν μπορεί να αλλάξει στιγμιαία. Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μεθόδους πέδησης στη διαμόρφωση της γέφυρας.

Brushed – DC motor commutation



Σύμφωνα με αυτά τα παραδείγματα που είδαμε πιο πάνω, σε αυτή την ενότητα θα συζητήσουμε και θα δούμε σε πίνακα τα αποτελέσματα, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο οι μέθοδοι που χρησιμοποιήσαμε ήταν αποτελεσματικοί για την κίνηση προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Όταν, όμως, θέλουμε να αλλάξουμε την κατεύθυνση ή να σταματήσουμε τον κινητήρα, πρέπει να αποσυνδέσουμε το ρεύμα με ελεγχόμενο τρόπο για την αποφυγή συνθηκών υπέρβασης. Αυτό γίνεται με τη χρήση τρεχόντων τρόπων ανακυκλοφορίας ακτών και φρένων.



Στην εικόνα που ακολουθεί, θα δούμε τη χρησιμότητα της λειτουργίας φρένων, επίσης γνωστή ως βραδεία αποσύνθεση. Αποδίδουμε την τόσο χαμηλή πλευρά του Mosfet, για να επιτρέψει στο ρεύμα να επανακυκλοφορήσει την ενέργεια, χρησιμοποιώντας το εσωτερικό RDS-on των Mosfet χαμηλής πλευράς. Αυτό μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια του κινητήρα σε ηλεκτρική ενέργεια και τελικά αυτή διαχέεται ως θερμότητα. Με τη σειρά του, ο κινητήρας λειτουργεί ως φρένο και θα επιβραδύνει

γρήγορα την ταχύτητα, αλλά μπορεί να διαχέει περισσότερη ισχύ από όταν χρησιμοποιούμε το RDS-on στα Mosfet.

Brushed – DC motor: H-Bridge states

H-Bridge States

HS1	LS1	HS2	LS2	OUT1	OUT2	Mode
OFF	OFF	OFF	OFF	Z	Z	Coast
ON	OFF	OFF	ON	H	L	Forward
OFF	ON	ON	OFF	L	H	Reverse
OFF	ON	OFF	ON	L	L	Brake

- **Forward** – current flows from OUT1 to OUT2
- **Reverse** – current flows from OUT2 to OUT1
- **Brake** – current recirculates through the low side FETs

TEXAS INSTRUMENTS

Όταν όλα τα Mosfet τίθενται σε κατάσταση εκτός λειτουργίας, αυτό επιτρέπει στο ρεύμα να κυκλοφορεί μέσω των διόδων του σώματος με ελάχιστη ποσότητα ενέργειας που επιστρέφει στην παροχή. Η κατάσταση αυτή θα προκαλέσει τη μηδενική ταχύτητα του κινητήρα με τη χρήση της δύναμης της τριβής, με την ασφαλή διακοπή της κίνησης του κινητήρα, αλλά με βραδύτερη από τη λειτουργία πέδησης.

Brushed – DC motor: H-Bridge states

H-Bridge States

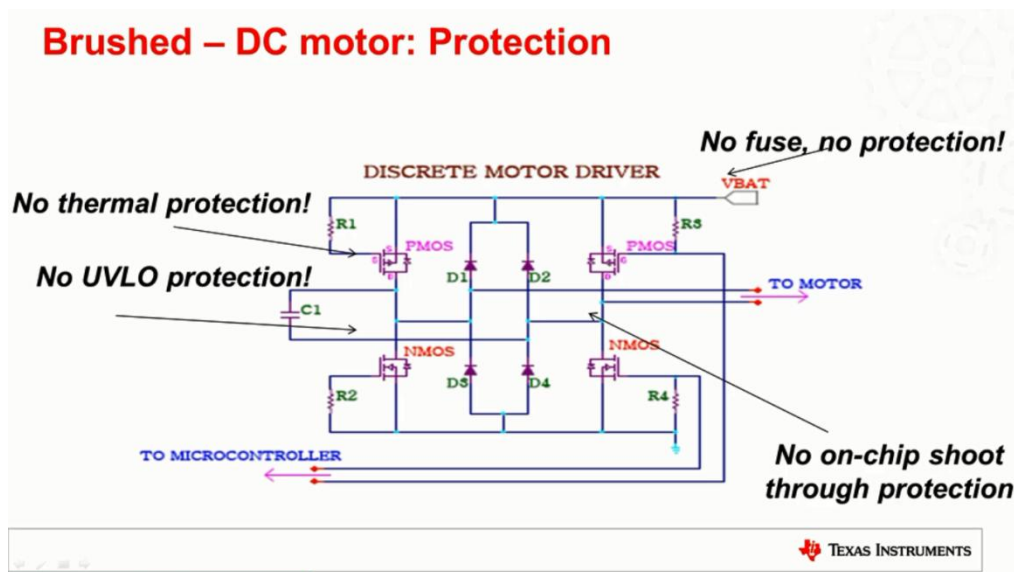
HS1	LS1	HS2	LS2	OUT1	OUT2	Mode
OFF	OFF	OFF	OFF	Z	Z	Coast
ON	OFF	OFF	ON	H	L	Forward
OFF	ON	ON	OFF	L	H	Reverse
OFF	ON	OFF	ON	L	L	Brake

- **Forward** – current flows from OUT1 to OUT2
- **Reverse** – current flows from OUT2 to OUT1
- **Brake** – current recirculates through the low side FETs
- **Coast** – current will flow through the body diodes into VM

TEXAS INSTRUMENTS

Αυτό είναι ένα παράδειγμα προσέγγισης διακριτής λύσης, όπου η γέφυρα έχει σχεδιαστεί με όλα τα παθητικά εξαρτήματα, όπως τα Mosfet, οι διόδοι, οι αντιστάσεις αλλά και οι πυκνωτές. Επειδή πρόκειται για μια καθαρά διακριτή λύση, το κύκλωμα

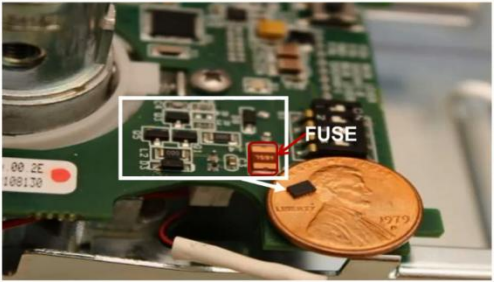
γέφυρας δεν περιλαμβάνει τις απαραίτητες προστασίες, όταν θα πρέπει να προστεθούν κινητήρες οδήγησης και εξωτερικά εξαρτήματα, τα οποία είναι κυκλώματα που θα περιλαμβάνουν θερμικούς αισθητήρες για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας. Η ασφαλής διακοπή του κυκλώματος κατά τη διάρκεια μίας θερμοκρασίας, αλλά και η προστασία από υπερφόρτωση της καταστροφής των Mosfet όπως και των άλλων τμημάτων είναι για να γίνει μια κατάσταση κλειδώματος κάτω από την τάση, όπως φαίνεται και στην εικόνα.



Εδώ θα διακρίνουμε κάποιους brush DC, όπως τον DRV8837, που προσφέρει μια πιο ισχυρή και πλήρως προστατευμένη λύση σε διακριτά συστήματα. Όλοι οι brushed DC και η οικογένεια DRV8 περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά προστασίας που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αυτό το επίπεδο ολοκλήρωσης προσφέρει μικρότερο χώρο, με αποτέλεσμα να απλουστεύουν τα μικρά και εύκολα σχέδια, έχοντας εσωτερική προστασία στα ICS του κινητήρα. Επίσης, ανακουφίζει τον μικροελεγκτή και την παροχή πόρων, επιτρέποντας στους μικρότερους μικροελεγκτές να χρησιμοποιούν περαιτέρω εξοικονόμηση κόστους. Οι οδηγοί DRV8 προστατεύονται πλήρως από ένα ευρύ φάσμα συμβάντων βελτιώνοντας την αξιοπιστία του συστήματος και μειώνοντας το χρόνο σχεδίασης. Ένα παράδειγμα είναι το σύστημα ηλεκτρονικής κλειδαριάς. Το DRV8837 αντικατέστησε διάφορα διακεκριμένα εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένης της ασφάλειας, η οποία ήταν μεγαλύτερη από τον συντελεστή φόρτισης του ίδιου του IC. Το DRV8837 κέρδισε, επειδή έχει ένα μικρό παράγοντα της QFN, και είναι πολύ εύκολο να το σχεδιάσεις. Ορισμένες άλλες κοινές εφαρμογές που μπορούμε να δούμε είναι ο περιορισμός στο μέγεθος που

περιλαμβάνουν οι κάμερες δικτύου IP, εργαλεία ηλεκτρικού ρεύματος και ρομπότ κενού. Οι μικροελεγκτές που έχουν τον εξής τύπο DRV8837, DRV8701 είναι τόσο για ολοκληρωμένες λύσεις που χρησιμοποιούν τα Mosfet όσο και για λύσεις οδηγού εξωτερικής πύλης. Επίσης, θα ήθελα να επισημάνω μερικές από τις κοινές εφαρμογές με κινητήρες brushed DC. Ορισμένες από αυτές τις εφαρμογές καλύπτονται από ηλεκτρικά εργαλεία, άλλες συσκευές, αυτοματοποίηση πλέγματος, έξυπνους μετρητές ακόμα και παιχνίδια.

DRV8x Brushed DC Drivers




- ✓ **Smaller board space**
Enables small and simple design
- ✓ **Embedded intelligence**
Reduces software design; allows lower-end MCU
- ✓ **Complete protection**
Improves robustness and reliability
- ✓ **Ease of use**
Accelerates design / ramping; simplifies assembly

Example: In an e-lock system, TI's DRV8837 replaced various discrete components, including the **fuse**, due to its small form factor and ease of design


Common applications with size constraints:


- IP Network Cameras
- Power Tools
- Vacuum Robots

DRV8837



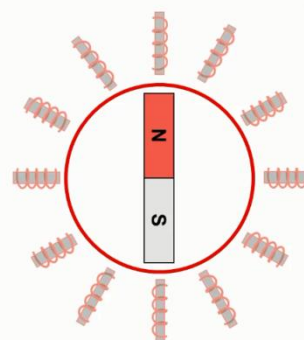
DRV8701



 TEXAS INSTRUMENTS

Fundamentals of BLDC motor

- Permanent magnet rotor
- Stationary coils on stator
- Moving magnetic field continuously drags the rotor along the circle



12

 TEXAS INSTRUMENTS

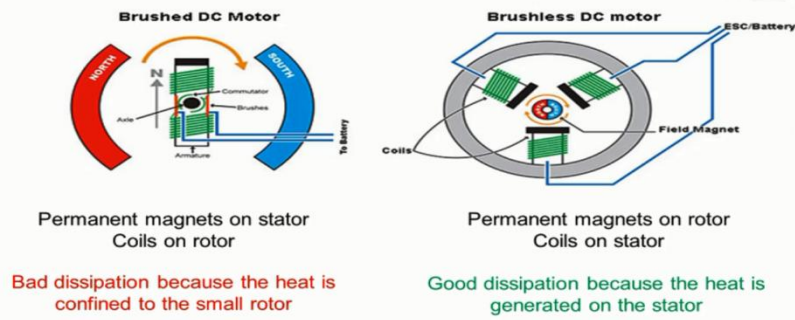
Στο σημείο αυτό θα δούμε τους brushless DC. Ο συγκεκριμένος τύπος κινητήρα δεν έχει καρβουνάκια, είναι συνεχούς ρεύματος και έχει έναν μόνιμο μαγνήτη στο

στροφείο του κινητήρα, ο οποίος περιβάλλεται από τον στάτη. Το πηνίο του λειτουργεί ως ηλεκτρομαγνήτης, όταν το ρεύμα εισέρχεται μέσα σε αυτό. Το μαγνητικό πεδίο μετακινείται συνεχώς με τη μεταφορά ή την περιστροφή του δρομέα κατά μήκος του στάτη. Ακόμα οι στατικοί ηλεκτρομαγνήτες κατανέμονται ομοιόμορφα γύρω από το πλαίσιο. Το ρεύμα, όταν είναι σε διαφορετικό πηνίο, παράγει ένα κινούμενο πεδίο που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Η διαδικασία με την οποία τα πηνία έχουν ρεύμα για τη δημιουργία κίνησης ονομάζεται μεταγωγή. Η κατασκευή κινητήρων χωρίς ψήκτρες συνεχούς ρεύματος είναι πολύ περίπλοκη, καθιστώντας τους ακριβότερους αλλά πιο αξιόπιστους. Οι κινητήρες που είναι χωρίς ψήκτρες, έχουν έναν μόνιμο μαγνήτη, ο οποίος βρίσκεται στον δρομέα, και οι περιελίξεις των πηνίων βρίσκονται στους στάτες. Λόγω της κατασκευής τους, ο κινητήρας χωρίς ψήκτρες συνεχούς ρεύματος έχει καλή απορρόφηση ισχύος, καθώς η θερμότητα που δημιουργείται είναι στον στάτη.

Παρόλο που ο κινητήρας χωρίς ψήκτρες απαιτεί πιο περίπλοκο κύκλωμα για να τον κινεί, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ακτινοβολίας. Έτσι, με τον συγκεκριμένο αυτό τύπο κινητήρα πετυχαίνουμε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Όμως, με τον κινητήρα αυτό προκύπτει να έχει κακή διάχυση στο χώρο, όπως ακόμα και η θερμότητα του να περιορίζεται στον στροφέα.

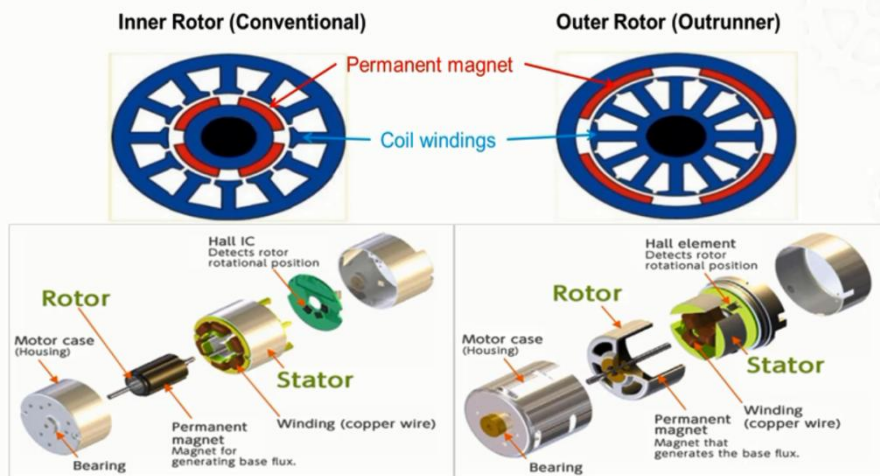
Συνήθως, υπάρχουν δύο τύποι κινητήρων χωρίς ψήκτρες. Αυτοί οι τύποι κινητήρων είναι τα μοτέρ εσωτερικού δρομέα και του εξωτερικού ρότορα. Όπως υποδηλώνει το όνομα του, ο εσωτερικός δρομέας χωρίς ψήκτρες έχει τον δρομέα μέσα στον στάτη, ο οποίος είναι ο πιο συμβατικός τύπος κινητήρα. Για τους κινητήρες εξωτερικού ρότορα, ο δρομέας βρίσκεται στο εξωτερικό του στάτη, ο οποίος ονομάζεται σχεδιασμός εξωτερικού περιστροφέα. Ο σχεδιασμός του εσωτερικού ρότορα επωφελείται συνήθως από μικρές κατασκευές, έχει καλύτερη ροή ισχύος, μεγαλύτερη ροπή όπως και ταχύτητα. Στις πιο κάτω εικόνες μπορούμε να διακρίνουμε τους δύο τύπους κινητήρων, οι οποίοι έχουν πιο σχεδιαστική όπως και αναλυτική μορφή.

Brushless-DC motor construction



TEXAS INSTRUMENTS

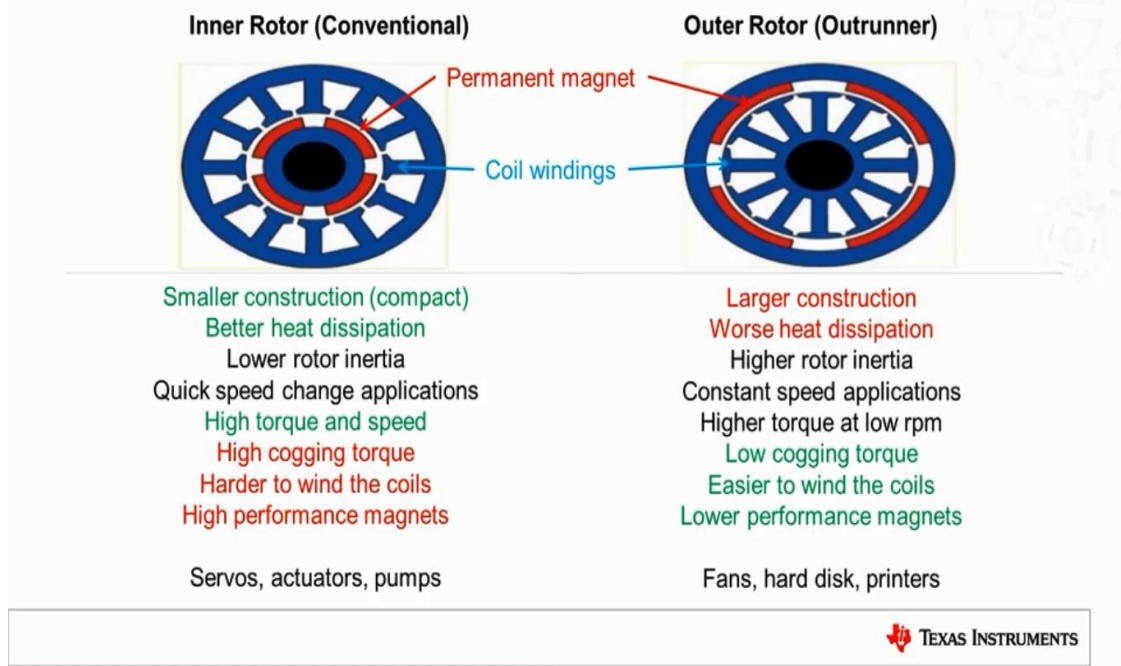
Brushless-DC motor construction (Cont.)



TEXAS INSTRUMENTS

Ακόμη ο σχεδιασμός του εξωτερικού ρότορα επωφελείται συνήθως από μία χαμηλή ροπή στρέψης, καθιστώντας ευκολότερη την περιέλιξη του πηνίου. Στον ηλεκτρομαγνήτη ο στάτης χωρίς τη χρήση μαγνητών προκύπτει να έχει υψηλή απόδοση. Η τριφασική περιέλιξη του μοτέρ χωρίς ψήκτρες, μπορεί να ποικίλει στη σύνδεση τυλίγματος των τριών φάσεων του κινητήρα.

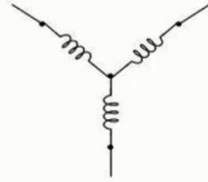
Brushless-DC motor construction (Cont.)



Στην εικόνα που ακολουθεί μπορούμε να διακρίνουμε δύο συνδέσεις με τις οποίες μπορούμε να βάλουμε σε λειτουργία τους κινητήρες. Έτσι, θα προκύψουν κάποια χρήσιμα αποτελέσματα για τον τρόπο λειτουργίας τους. Αναλύοντας την εικόνα μπορούμε να διακρίνουμε ότι στα αριστερά είναι η περιέλιξη τύπου αστέρα, η οποία είναι η πιο συνηθισμένη περιέλιξη που χρησιμοποιείται για τύπους κινητήρων που δεν έχουν ψήκτρες. Δεξιά διακρίνουμε τη σύνδεση σε τρίγωνο, η οποία είναι πιο αποτελεσματική. Ο λόγος αυτής της αποτελεσματικότητας εν συγκρίσει προς τον αστέρα είναι ότι έχει λιγότερες απώλειες στην αντίσταση καθώς και μεγαλύτερη ροπή σε χαμηλή ταχύτητα, ενώ το κύριο πλεονέκτημα του είναι η υψηλότερη τελική ταχύτητα.

Brushless-DC motor winding connections

**Wye (Y) Winding
Star connection**

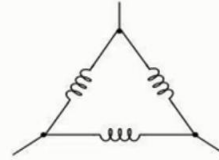


Normally more efficient
Less resistive losses
Immune to parasitic currents

Higher torque at low speed
Lower top speed

Most common

Delta (Δ) Winding



Normally less efficient
More resistive losses
Parasitic currents can circulate

Lower torque at low speed
Higher top speed

Both are driven the same way

 TEXAS INSTRUMENTS

Ένα εμφανές συμπέρασμα που μπορούμε να εξάγουμε για τους συγκεκριμένους τύπους κινητήρα είναι ότι, ανεξάρτητα από τη σύνδεση που θα χρησιμοποιήσουμε στο τύλιγμα του κινητήρα, και οι δύο κινητήρες κινούνται με τον ίδιο τρόπο. Συνοψίζοντας λοιπόν όλα αυτά, μπορούμε να διακρίνουμε στην εικόνα που ακολουθεί ότι προκύπτουν ορισμένα πλεονεκτήματα όπως και μειονεκτήματα από αυτούς τους δύο τύπους κινητήρων. Ο κινητήρας χωρίς ψήκτρες συνεχούς ρεύματος παρέχει περισσότερη ροπή, έχει λιγότερο ακουστικό θόρυβο, μεγάλη διάρκεια ζωής με υψηλή αξιοπιστία. Επίσης, προκύπτει ότι έχει πολύ περισσότερη ακτινοβολία και μπορεί να είναι εντελώς κλειστός. Οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες συνεχούς ρεύματος, μπορούν να επιτύχουν υψηλότερες στροφές ανά λεπτό ή να έχουν ταχύτητα. Ωστόσο, αυτός ο τύπος κινητήρα είναι συχνά ακριβός, ενώ οι κινητήρες brushed DC είναι λιγότερο κοστοβόροι.

Brushed-DC versus brushless-DC

Brushed-DC

- Less torque per weight
- Less torque per watt
- More audible noise
- Shorter lifetime
- Lower reliability
- Commutator sparking
- More EMI radiation
- May need airflow to cool rotor
- Lower RPM
- ...
- Easy to drive

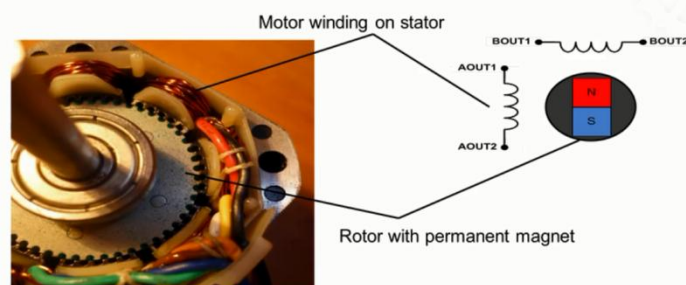
Brushless-DC

- More torque per weight
- More torque per watt
- Less audible noise
- Longer lifetime
- Higher reliability
- No sparking
- Less EMI radiation
- Can be completely enclosed
- Higher RPM
- ...
- Hard to drive (\$\$\$)

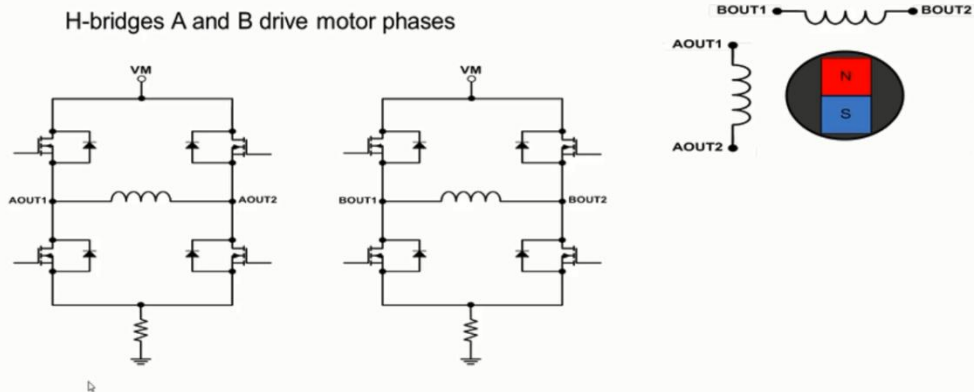


Εκτός των δύο προηγούμενων τύπων κινητήρων, εδώ υπάρχει πραγματεύση και η ανάλυση του τελευταίου τύπου κινητήρα που είναι ένας διπολικός βηματικός κινητήρας. Πιο κάτω ακολουθεί μια αρχιτεκτονική μοτέρ brushed DC. Αυτή κάνει τον συγκεκριμένο τύπο κινητήρα να χρησιμοποιεί μία γέφυρα, για να κατευθύνει το ρεύμα μέσω ενός πηνίου. Στην περίπτωση αυτή ο διπολικός βηματικός κινητήρας, θα έχει δύο πηνία ή δύο φάσεις, για να ενεργοποιηθεί, έτσι προκύπτει ότι χρειαζόμαστε δύο γέφυρες. Οι περιελίξεις του διπολικού βηματικού μοτέρ βρίσκονται στον στάτη με τους μόνιμους μαγνήτες να απαντούν στον δρομέα.

Stepper motor construction



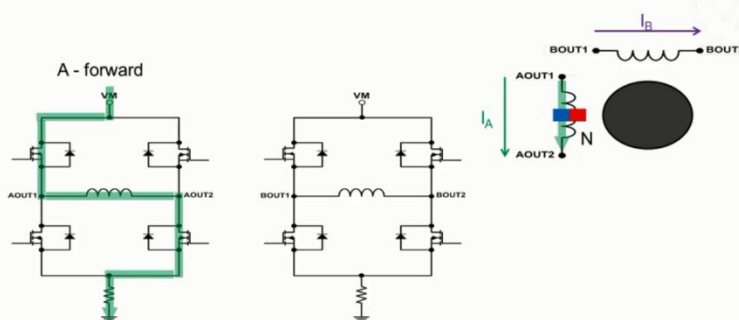
Stepper motor construction



TEXAS INSTRUMENTS

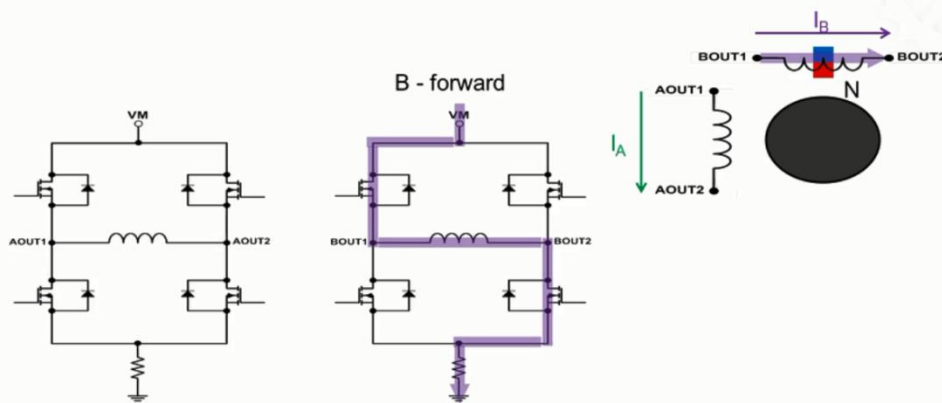
Έτσι θα έχουμε τον διπολικό κινητήρα stepper, με τον οποίο θα πρέπει να ελέγξουμε το ρεύμα μέσα από κάθε μία φάση, για να μπορέσουμε να περιστρέψουμε τον ρότορα. Όπως έχει προκύψει από πριν, θα πρέπει να ενεργοποιήσουμε κάποια από τα ζεύγη Mosfet, ώστε να μπορέσουν να επιτρέψουν στο ρεύμα να περάσει διαμέσου κάθε πηνίου, δημιουργώντας ένα μαγνητικό πεδίο που δεν είναι ευθυγραμμισμένο με τα μαγνητικά. Έτσι, οι μαγνήτες και ο ρότορας θα μπορέσουν να δημιουργήσουν την κίνηση προς τα εμπρός αλλά και την αντίστροφη κίνηση του ρεύματος σε κάθε μία από τις φάσεις.

Bipolar stepper motor commutation



TEXAS INSTRUMENTS

Bipolar stepper motor commutation

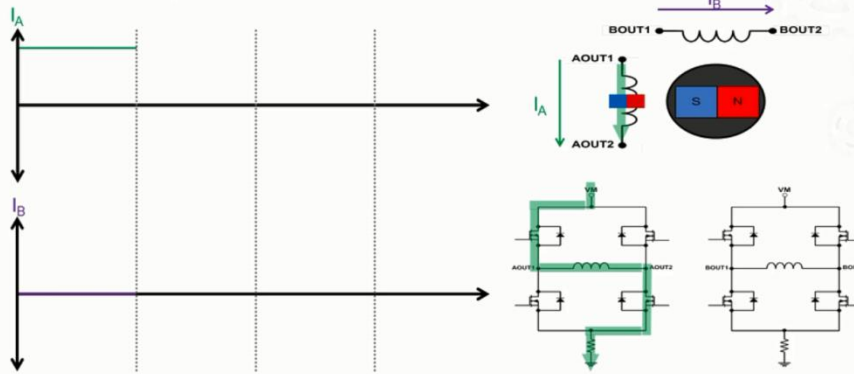


TEXAS INSTRUMENTS

Ακολουθεί ένα σύντομο παράδειγμα για το πώς λειτουργεί ένας διπολικός κινητήρας stepper. Με αυτό το παράδειγμα θα καταλάβουμε το πώς και πού συγκεκριμένος κινητήρας μετατοπίζει την λειτουργία ενός πλήρους βήματος ή κύματος. Όταν τον έχουμε σε λειτουργία πλήρους βήματος ενεργοποιείται ένα πηνίο κάθε φορά. Και για κάθε βήμα οδηγούμε το τρέχον επίπεδο πλήρους κλίμακας. Για να κατανοήσουμε το προηγούμενο παράδειγμα θα πρέπει να οδηγούμε το πηνίο A στην προς τα εμπρός κατεύθυνση και στη συνέχεια να απενεργοποιούμε τα Mosfet στο πηνίο A. Τότε ενεργοποιούμε το πηνίο B προς την κατεύθυνση προς τα εμπρός και στη συνέχεια απενεργοποιούμε τα Mosfet στο πηνίο B. Για να ολοκληρώσουμε την περιστροφή, αντιστρέφουμε το ρεύμα μέσω του πηνίου A, στη συνέχεια το απενεργοποιούμε. Ακολούθως, ενεργοποιούμε το αντίστροφο ρεύμα μέσω του πηνίου B και στη συνέχεια το απενεργοποιούμε. Έχουμε πλέον ολοκληρώσει μία πλήρη περιστροφή του βηματικού μοτέρ, χρησιμοποιώντας την πλήρη λειτουργία οδήγησης βαθμίδων κύματος. Άρα μπορούμε να διακρίνουμε τις αναλυτικές κυματομορφές που προκύπτουν ακολουθώντας τις εικόνες βήμα προς βήμα για να κατανοήσουμε το προηγούμενο παράδειγμα.

Bipolar stepper motor control

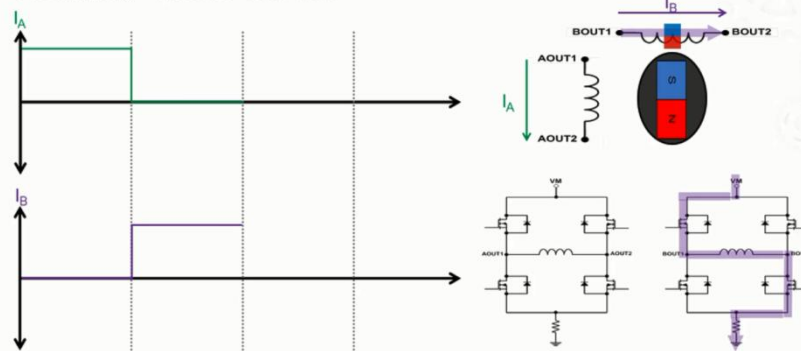
Full Stepping – option #1 “wave drive”



TEXAS INSTRUMENTS

Bipolar stepper motor control

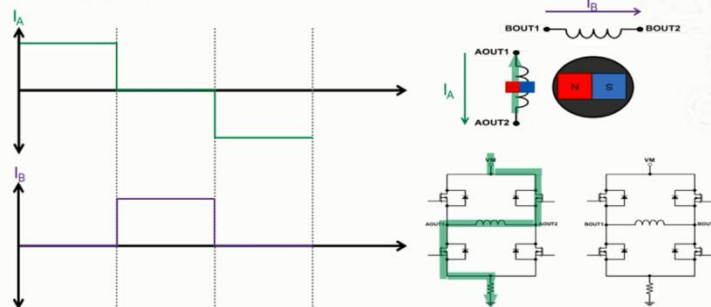
Full Stepping – option #1 “wave drive”



TEXAS INSTRUMENTS

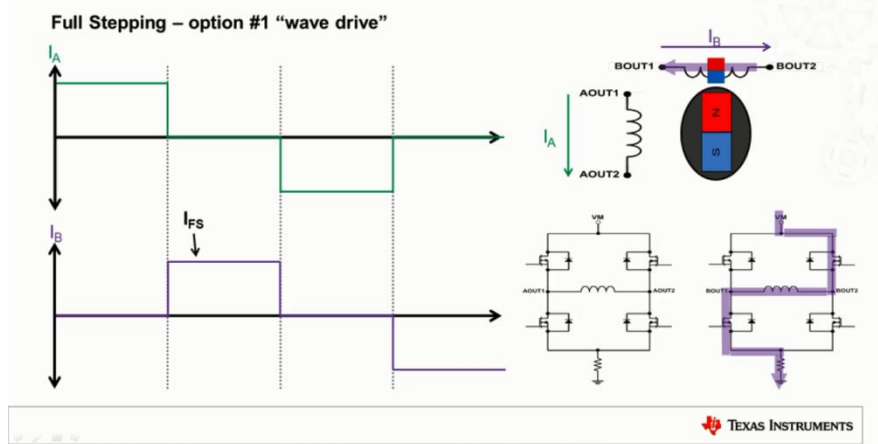
Bipolar stepper motor control

Full Stepping – option #1 “wave drive”



TEXAS INSTRUMENTS

Bipolar stepper motor control

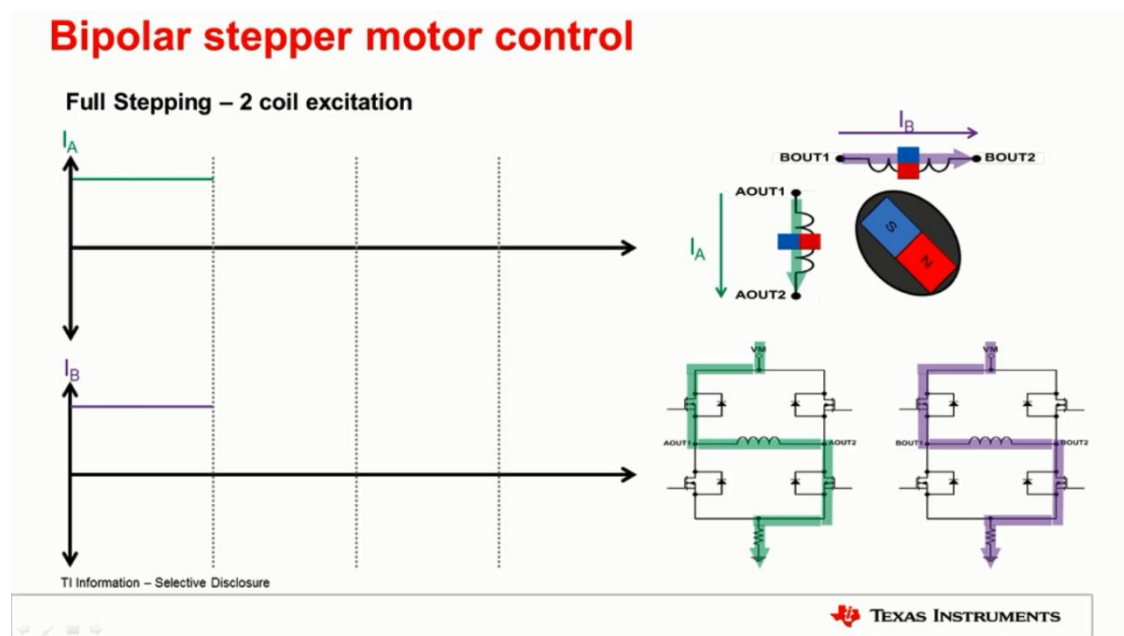


Αυτή η λειτουργία απαιτεί τέσσερα σήματα, για να ενεργοποιήσουμε τα Mosfet και για να μετακινήσουμε τον κινητήρα κατά 90° ανά βήμα. Αυτός ο τρόπος οδήγησης ενός βηματικού μοτέρ είναι ο απλούστερος τρόπος εκτέλεσης, καθώς δεν χρειάζεται η τρέχουσα ρύθμιση. Έτσι ελαχιστοποιεί τις απώλειες ισχύος εξαιτίας των ελάχιστων σημάτων μεταγωγής. Ωστόσο, δεν παρέχει μεγάλη ισχύ ροπής ή γωνιακή ανάλυση, ώστε να μην είναι κατάλληλη για φορτία υψηλότερης ισχύος ή όπου πρέπει να επιτευχθούν υψηλότερες γωνίες ανάλυσης. Επομένως, για αυτόν τον λόγο, προκύπτει ένας άλλος τρόπος, για να επιτευχθεί το πλήρες βήμα σε διπολικό κινητήρα stepper που έχει δύο διεγέρσεις πηνίου.

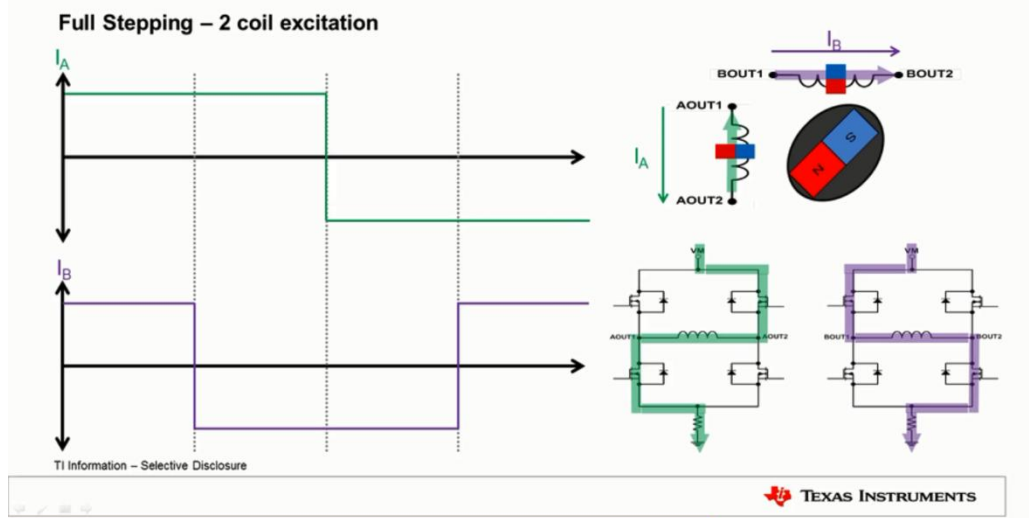
Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας ενεργοποιούμε και τα δύο πηνία ταυτόχρονα σε όλη την κυματομορφή. Με το πρώτο σήμα εισόδου ενεργοποιούμε και τα δύο πηνία ώστε να είναι στην κατεύθυνση προς τα εμπρός. Αυτό το ίσο και αντίθετο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται μεταξύ των δύο σπειρών προκαλεί τον κινητήρα να ευθυγραμμιστεί στη μέση των δύο φάσεων. Ακολουθώντας, και διατηρώντας την ίδια κατεύθυνση ρεύματος στο πηνίο A, στέλνουμε ένα άλλο σήμα εισόδου, για να του αντιστρέψουμε την πολικότητα στο πηνίο B, προκαλώντας τον κινητήρα να ευθυγραμμιστεί μεταξύ του επόμενου μέσου και των δύο φάσεων. Ο κύκλος επαναλαμβάνεται για πλήρη περιστροφή και εξακολουθεί να επιτυγχάνει 90° ανά βήμα, όπως η λειτουργία οδήγησης.

Η διαφορά μεταξύ αυτής της μεθόδου και της κίνησης πλήρους βηματισμού είναι μεγαλύτερη. Δεδομένου ότι έχουμε δύο πηνία τροφοδοτούμενα ταυτόχρονα αντί για ένα σε λειτουργία, επιτυγχάνουμε περίπου το 41% της περισσότερης ροπής. Αν και αυτό θα αυξήσει την ροπή, ενδέχεται, όμως, να συναντήσουμε ακόμα και κάποιους κραδασμούς, όπως και θόρυβο στον κινητήρα λόγω της μεγάλης γωνίας.

Επομένως, πρέπει να διερευνήσουμε διαφορετικές μεθόδους, για να έχουμε καλύτερη ανάλυση γωνίας. Έτσι, για να επιτύχουμε την υψηλότερη γωνιακή ανάλυση και την καλύτερη απόδοση ροπής του βηματικού κινητήρα, μπορούμε να διερευνήσουμε τους τρόπους μισού βηματισμού. Σε αυτήν την λειτουργία, ξεκινάμε με την ενεργοποίηση του πηνίου A για την κίνηση που έχει την κατεύθυνση προς τα εμπρός. Στη συνέχεια, ενεργοποιούμε το πηνίο B, για να οδηγούμε την κατεύθυνση προς τα εμπρός, ενώ το πηνίο A είναι ακόμα ενεργοποιημένο. Με την ενεργοποίηση και των δύο περιελίξεων ταυτόχρονα, προκαλούμε την αποτελεσματική κίνηση του κινητήρα και με αυτόν τον τρόπο προκαλούμε το να έλκεται μαγνητικά, μεταξύ των δύο θέσεων βήματος. Με δεδομέναόσα αναφέραμε πιο πάνω προκύπτουν και οι παρακάτω εικόνες οι οποίες μας βοηθούν στην κατανόηση και την ανάλυση των βημάτων που ακολουθούμε.



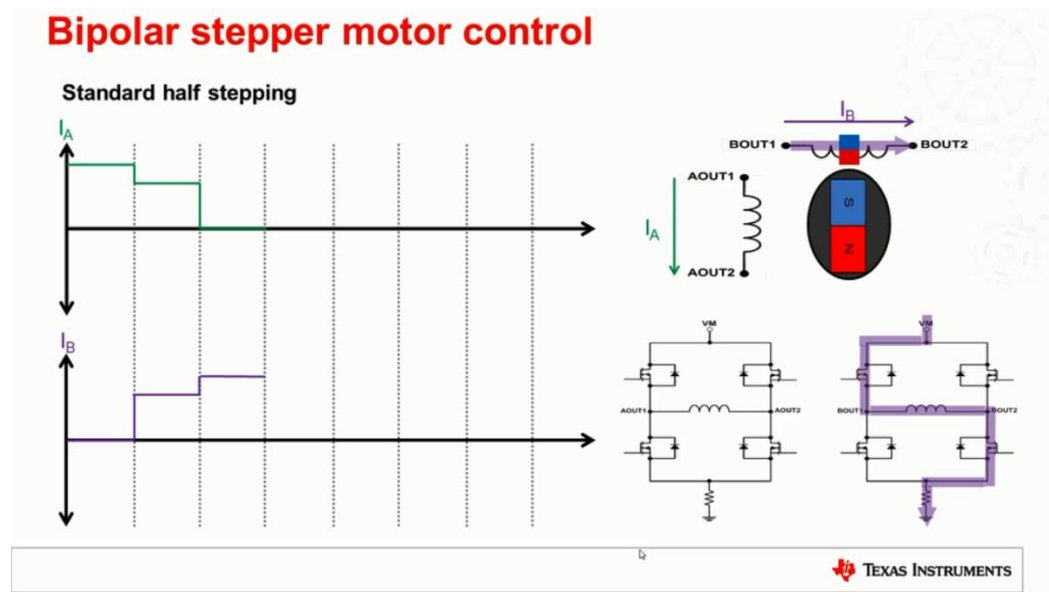
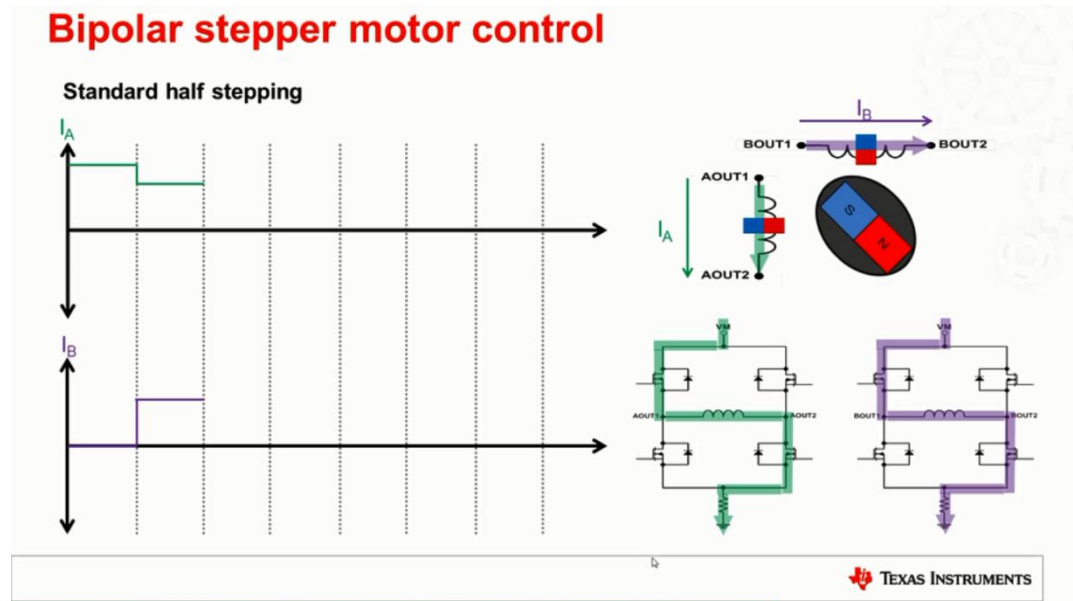
Bipolar stepper motor control



Στην συνέχεια, όταν η γέφυρα απενεργοποιεί τα Mosfet στο πηνίο A, τότε το ρεύμα απελευθερώνεται προκαλώντας τον κινητήρα να προχωρήσει στην επόμενη θέση από την έλξη μεταξύ του μαγνητικού πεδίου στο ρότορα και των περιελίξεων του στάτη στο πηνίο B. Αυτά τα ρεύματα αντιστρέφουν την πολικότητα μέσω των περιελίξεων και επαναλαμβάνουν τη διαδικασία για μια πλήρη περιστροφή με οκτώ ή 45° ανά βήμα. Σε σύγκριση με το πλήρες βήμα, ο μισός τρόπος βηματισμού επιτρέπει στην εφαρμογή μεγαλύτερη ροπή στο φορτίο με την ταυτόχρονη ενεργοποίηση πολλαπλών σπειρών. Το μισό βήμα προσφέρει περισσότερη γωνιακή ανάλυση για την πιο ακριβή κίνηση και την μείωση της δόνησης του βηματικού μοτέρ. Ωστόσο, υπάρχουν περισσότερα σήματα αλλαγής, έτσι οι απώλειες ισχύος είναι μεγαλύτερες από ό,τι σε πλήρη λειτουργία βημάτος. Για τα ημίσεια βήματα, το ρεύμα πρέπει να ρυθμίζεται, για να επιτευχθούν πολλαπλά τρέχοντα επίπεδα. Προκειμένου να ρυθμίσουμε το ρεύμα σε βηματικούς κινητήρες με τύπο Stepper DRV8, χρησιμοποιούμε την τρέχουσα αρχιτεκτονική και τις λειτουργίες αποσύνδεσης, για να επανακυκλοφορήσει το ρεύμα μέσω της γέφυρας, για να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα με ελεγχόμενο τρόπο.

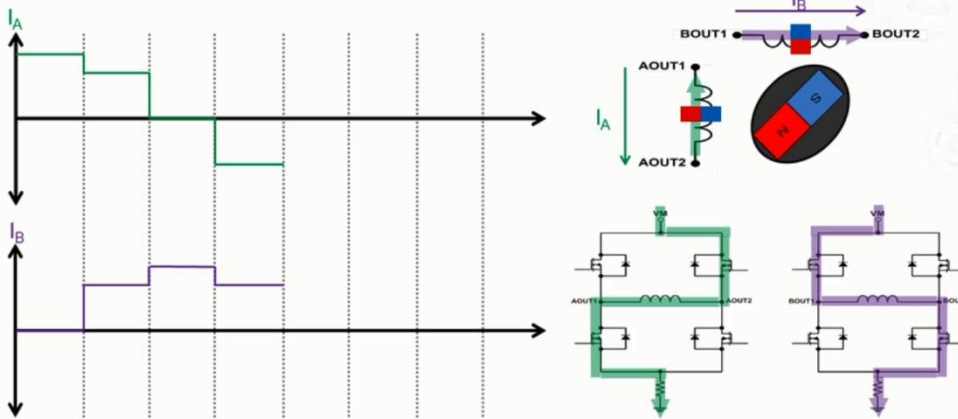
Επίσης ένα ρεύμα, ρυθμίζεται χρησιμοποιώντας ανιχνευτές χαμηλής πλευράς για κάθε κανάλι Mosfet. Ή μπορούμε απλά να χρησιμοποιήσουμε την ολοκληρωμένη τεχνολογία ανίχνευσης ρεύματος. Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιήσουμε στο εσωτερικό κύκλωμα αναφοράς για να καθορίσει το ρεύμα κίνησης, που υπερβαίνει από το καθορισμένο ρεύμα διέλευσης. Σε αυτό το σημείο χρησιμοποιούμε διαφορετικούς τρόπους αποσύνδεσης είτε αργούς είτε γρήγορους είτε και μικτούς, για να χειριστούμε

την τρέχουσα κυκλοφορία ρεύματος. Έτσι, με αυτήν την μέθοδο προκύπτουν οι παρακάτω εικόνες για την καλύτερη κατανόηση τις παραγράφου αυτής.



Bipolar stepper motor control

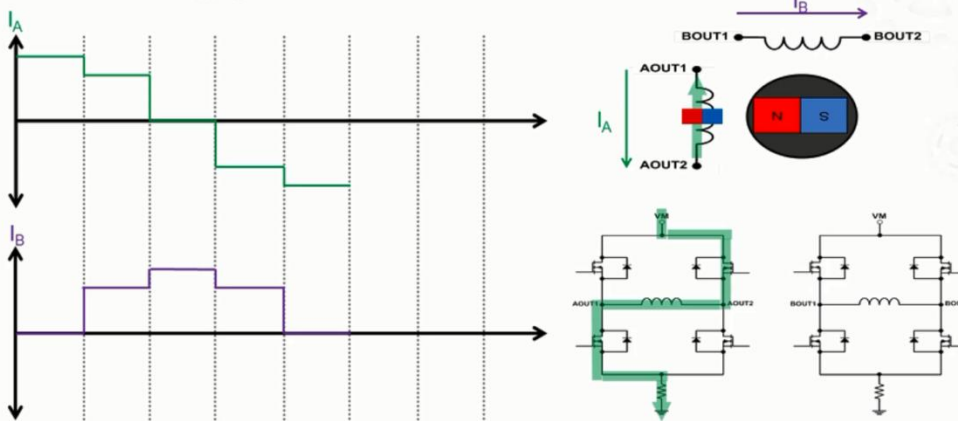
Standard half stepping



TEXAS INSTRUMENTS

Bipolar stepper motor control

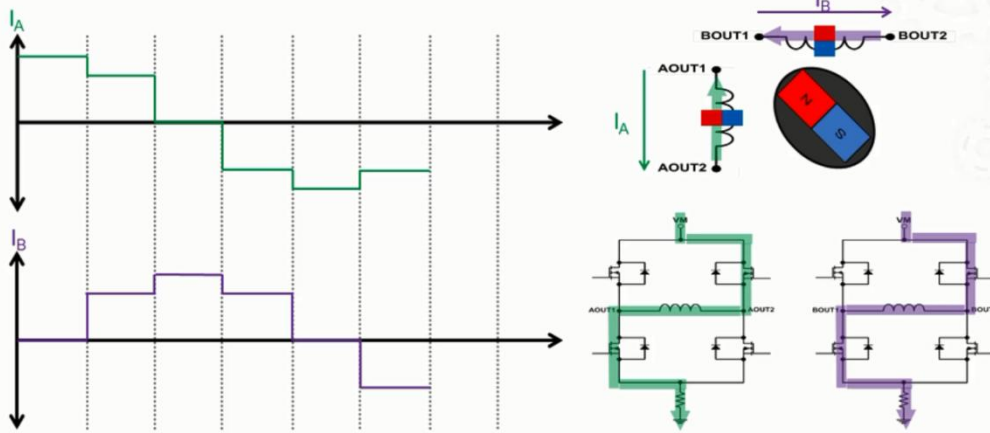
Standard half stepping



TEXAS INSTRUMENTS

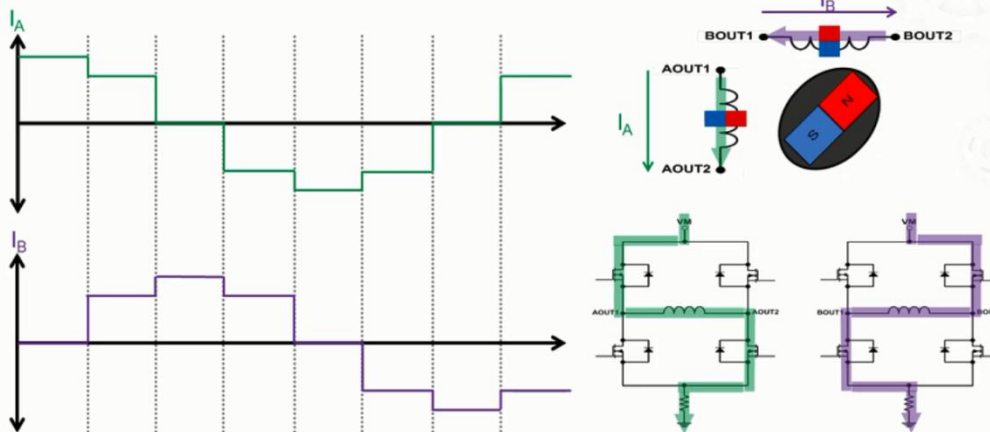
Bipolar stepper motor control

Standard half stepping



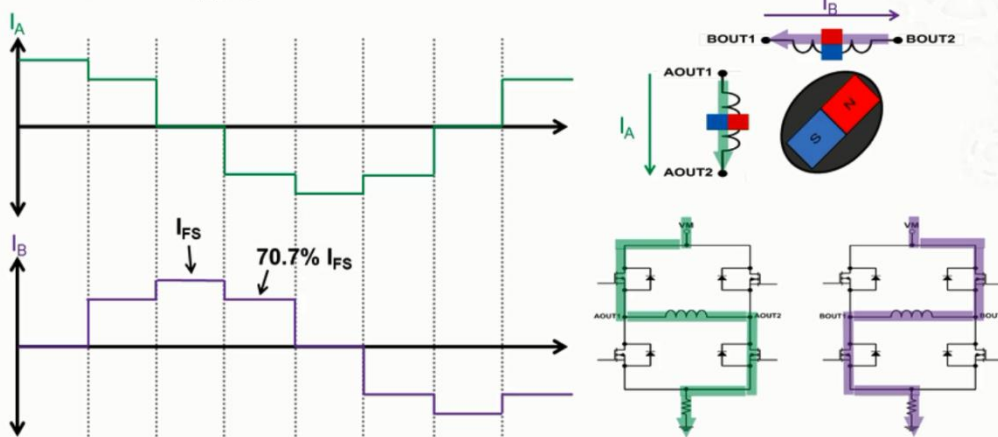
Bipolar stepper motor control

Standard half stepping



Bipolar stepper motor control

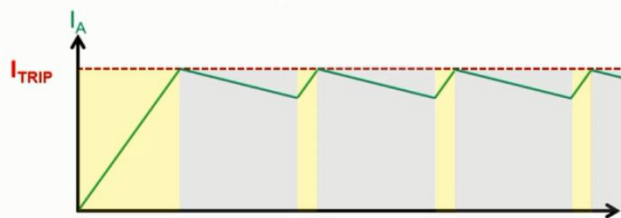
Standard half stepping



TEXAS INSTRUMENTS

Regulating current in stepper motors

PWM current chopping used to regulate current



At each current step, current is driven until it hits I_{TRIP} , then the bridge enters a decay mode for a period of time

Decay Modes: Slow, fast, mixed decay

[TI Integrated Current Sensing for Stepper Motors](#)

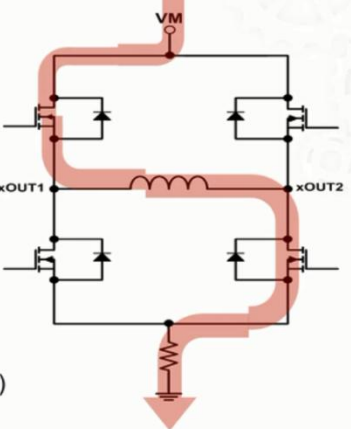

TEXAS INSTRUMENTS

Στη συνέχεια της ανάπτυξης του κειμένου, θα δούμε την περιγραφή της αργής αποσύνδεσης. Έτσι, έχουμε έναν παρόμοιο τύπο κινητήρα με το brushed DC. Ακόμη, στους βηματικούς κινητήρες επιτυγχάνουμε χαμηλή ανακυκλοφορία ρεύματος. Η αποσύνδεση γίνεται με την ενεργοποίηση των Mosfet χαμηλής πλευράς μετά την επίτευξη του ορίου αναμονής. Η αργή απόσβεση είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για το ρεύμα σε βηματικούς κινητήρες, καθώς επιτρέπει τη μείωση του ρεύματος, μειώνοντας τη συνολική και διατηρώντας υψηλότερη μέση ροπή στρέψης. Ωστόσο, υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα, επειδή η αργή αποσύνδεση μπορεί να μην είναι κατάλληλη για ορισμένες εφαρμογές, ειδικά όταν έχουμε υψηλές ταχύτητες. Σε εφαρμογές για υψηλότερη ταχύτητα, ο κινητήρας πρέπει να μειώνει το ρεύμα στις περιελίξεις με ταχύτερο ρυθμό, ώστε να μπορεί να ρυθμιστεί αρκετά πριν μετακινηθεί στο επόμενο βήμα. Έτσι, χρησιμοποιώντας αργή αποσύνδεση σε αυτές τις περιπτώσεις, μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια της τρέχουσας ρύθμισης, η οποία θα προκαλέσει στον κινητήρα δόνηση, επίσης θα έχει περισσότερο θόρυβο ή ακόμα και συνθήκες υπερθέρμανσης.

Regulate current with decay modes

Slow decay

- Winding current is recirculated in both low-side FETs
- Smallest ripple

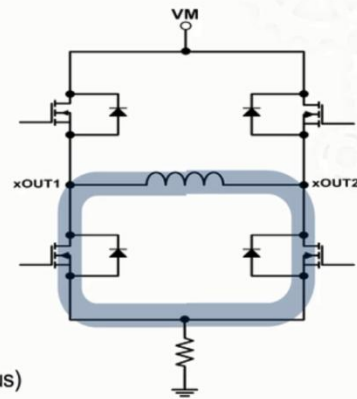
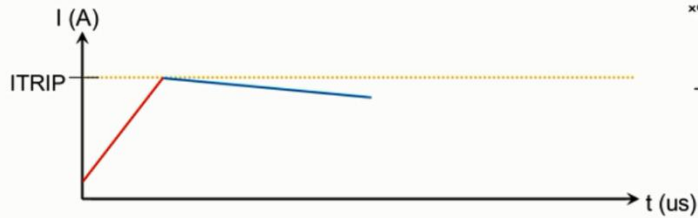


TEXAS INSTRUMENTS

Regulate current with decay modes

Slow decay

- Winding current is recirculated in both low-side FETs
- Smallest ripple

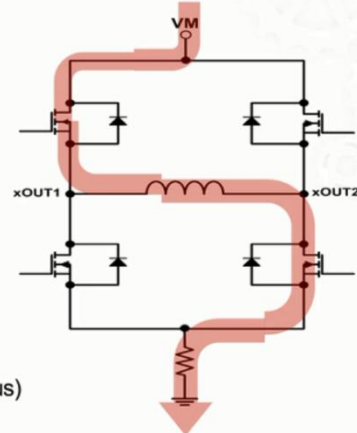
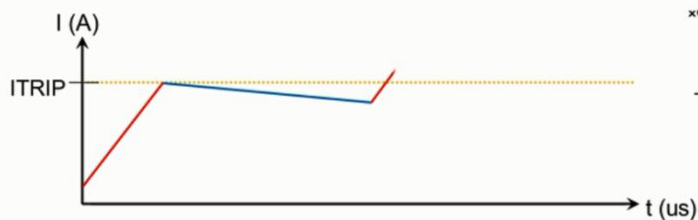


TEXAS INSTRUMENTS

Regulate current with decay modes

Slow decay

- Winding current is recirculated in both low-side FETs
- Smallest ripple

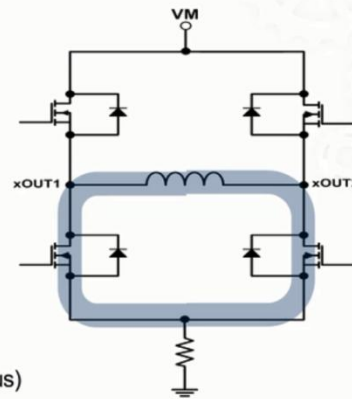
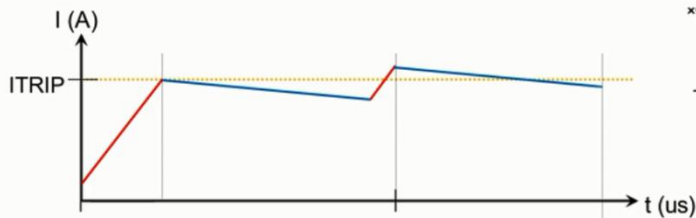


TEXAS INSTRUMENTS

Regulate current with decay modes

Slow decay

- Winding current is recirculated in both low-side FETs
- Smallest ripple



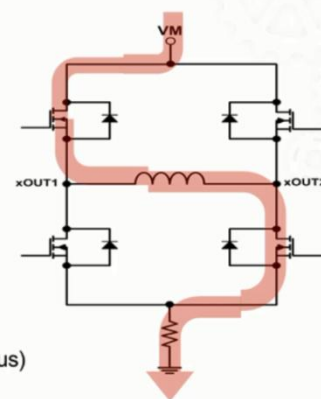
TEXAS INSTRUMENTS

Εφόσον αναλύσαμε την αργή αποσύνδεση ρεύματος τώρα θα αναλύσουμε την γρήγορη αποσύνδεση και με ποιόν τρόπο αυτή υλοποιείται. Η υλοποίηση για γρήγορη αποσύνδεση, γίνεται μετά το χτύπημα της στάθμης, δηλαδή η γέφυρα επιτρέπει στα αντίθετα Mosfet να επανακυκλοφορήσουν το ρεύμα προς την αντίθετη κατεύθυνση έναντι της πολικότητας της παροχής. Αυτό με τη σειρά του επιτρέπει τη μείωση του ρεύματος με ταχύτερο ρυθμό, δίνοντάς μας τον καλύτερο έλεγχο ισχύος. Ωστόσο, προκαλεί, επίσης, μεγαλύτερο σήμα δίνοντας μικρότερη συνολική ροπή στο σύστημα, καθιστώντας το έτσι λιγότερο αποτελεσματικό.

Regulate current with decay modes

Fast decay

- H-bridge reverses state to allow current to flow in reverse
- H-bridge disabled when current decays to zero to prevent reverse current
- Largest ripple

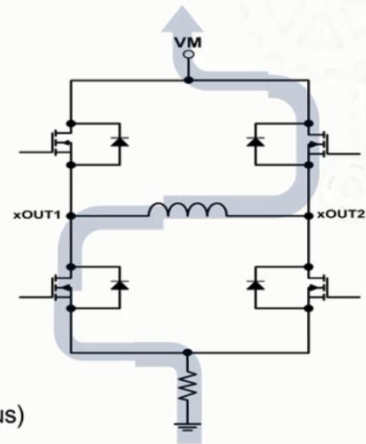


TEXAS INSTRUMENTS

Regulate current with decay modes

Fast decay

- H-bridge reverses state to allow current to flow in reverse
- H-bridge disabled when current decays to zero to prevent reverse current
- Largest ripple

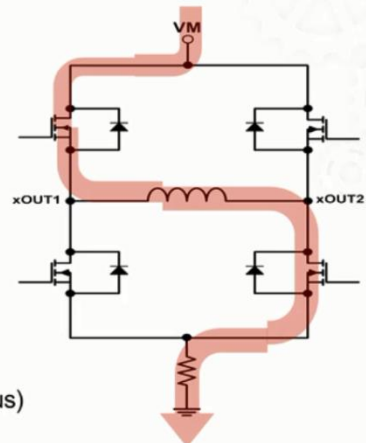
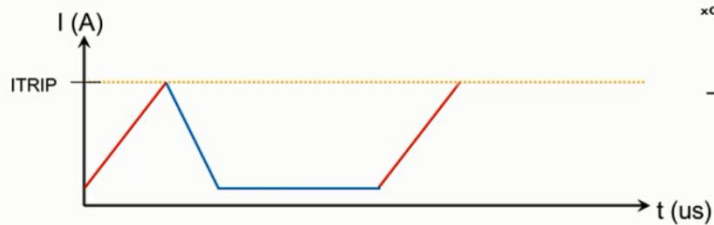


TEXAS INSTRUMENTS

Regulate current with decay modes

Fast decay

- H-bridge reverses state to allow current to flow in reverse
- H-bridge disabled when current decays to zero to prevent reverse current
- Largest ripple

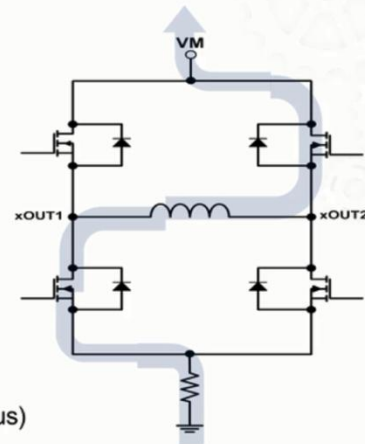
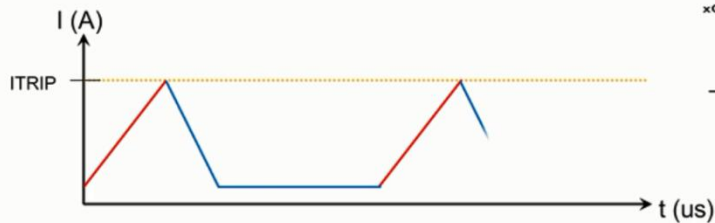


TEXAS INSTRUMENTS

Regulate current with decay modes

Fast decay

- H-bridge reverses state to allow current to flow in reverse
- H-bridge disabled when current decays to zero to prevent reverse current
- Largest ripple

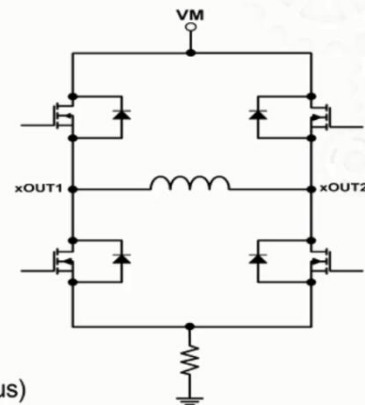
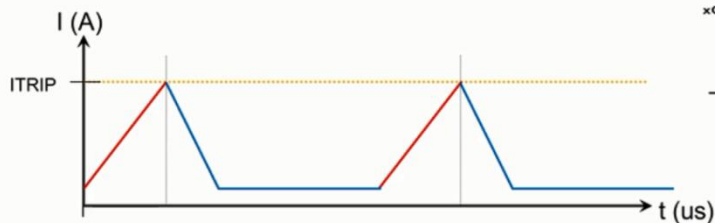


TEXAS INSTRUMENTS

Regulate current with decay modes

Fast decay

- H-bridge reverses state to allow current to flow in reverse
- H-bridge disabled when current decays to zero to prevent reverse current
- Largest ripple



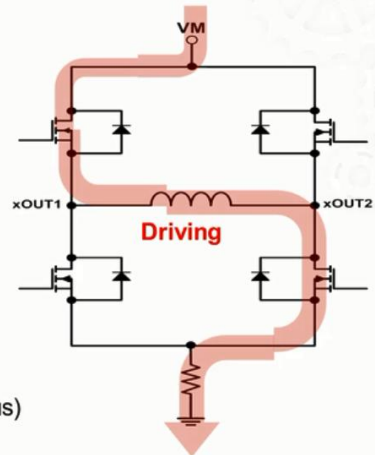
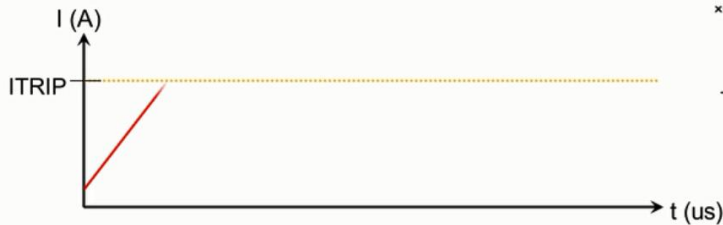
TEXAS INSTRUMENTS

Ένας καλός τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι ο μικτός τρόπος αποσύνδεσης. Σε αυτό το παράδειγμα, μετά το I, όταν το επίπεδο φτάσει στην γέφυρα, αρχίζει τη γρήγορη αποσύνδεση, στη συνέχεια, με την βοήθεια διακοπών, κάνει την αργή αποσύνδεση. Αυτό δημιουργεί ένα εμπόδιο μεταξύ της τρέχουσας κυμάτωσης ή απόδοσης και του τρέχοντος χρόνου ρύθμισης, ο οποίος αποδίδει καλύτερες επιδόσεις και βέλτιστη τρέχουσα ρύθμιση.

Regulate current with decay modes

Mixed decay

- Begins as fast decay
- After TDECAY, switches to slow decay
- Attend Webinar 3 where we will discuss Smart Tune – automatically adjust decay mode based on dynamic decay and ripple control technology

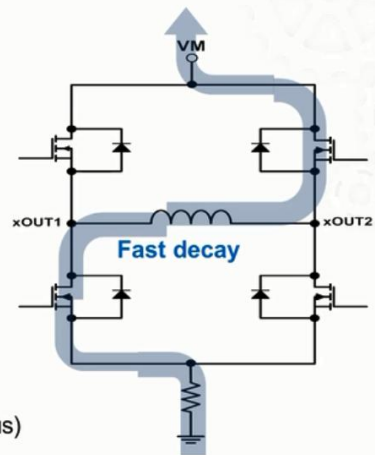


TEXAS INSTRUMENTS

Regulate current with decay modes

Mixed decay

- Begins as fast decay
- After TDECAY, switches to slow decay
- Attend Webinar 3 where we will discuss Smart Tune – automatically adjust decay mode based on dynamic decay and ripple control technology

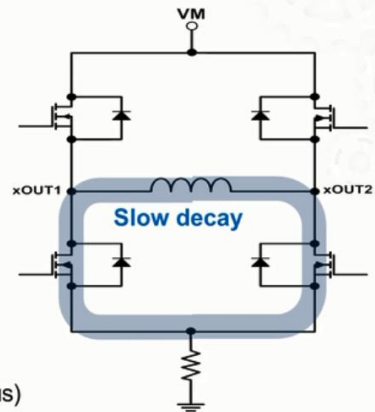
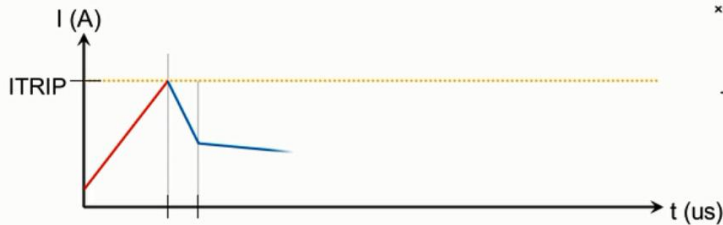


TEXAS INSTRUMENTS

Regulate current with decay modes

Mixed decay

- Begins as fast decay
- After TDECAY, switches to slow decay
- Attend Webinar 3 where we will discuss Smart Tune – automatically adjust decay mode based on dynamic decay and ripple control technology

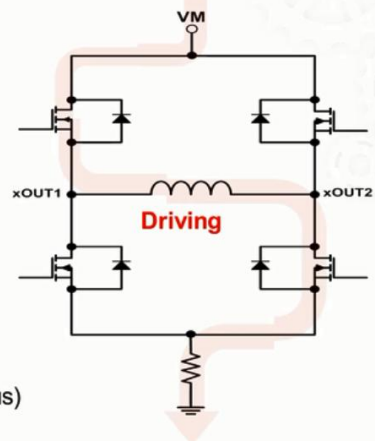
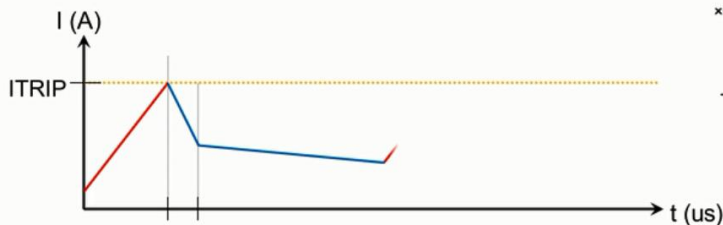


TEXAS INSTRUMENTS

Regulate current with decay modes

Mixed decay

- Begins as fast decay
- After TDECAY, switches to slow decay
- Attend Webinar 3 where we will discuss Smart Tune – automatically adjust decay mode based on dynamic decay and ripple control technology

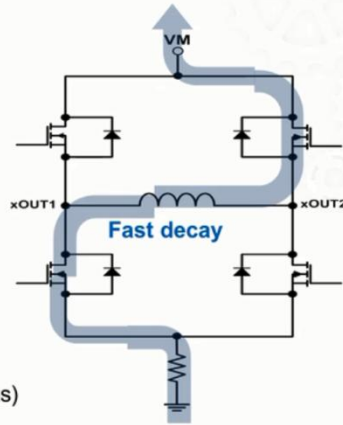
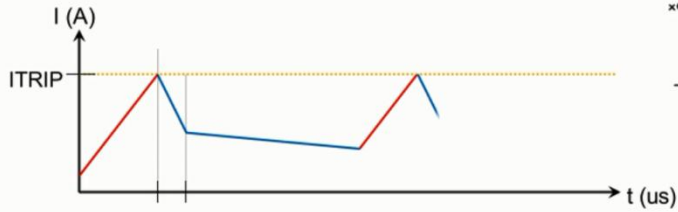


TEXAS INSTRUMENTS

Regulate current with decay modes

Mixed decay

- Begins as fast decay
- After TDECAY, switches to slow decay
- Attend Webinar 3 where we will discuss Smart Tune – automatically adjust decay mode based on dynamic decay and ripple control technology

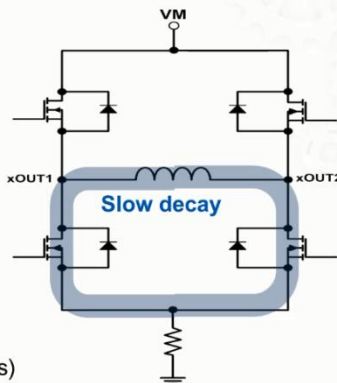
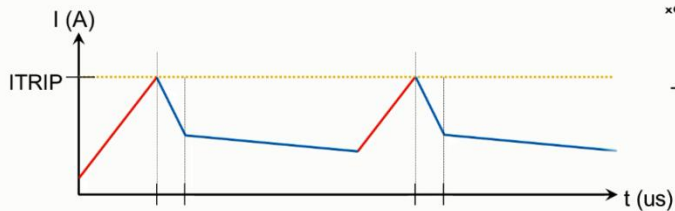


TEXAS INSTRUMENTS

Regulate current with decay modes

Mixed decay

- Begins as fast decay
- After TDECAY, switches to slow decay
- Attend Webinar 3 where we will discuss Smart Tune – automatically adjust decay mode based on dynamic decay and ripple control technology



TEXAS INSTRUMENTS

Στις περισσότερες μικτές λειτουργίες αποσύνδεσης θα πρέπει να συντονιστούν για κάθε εφαρμογή μεμονωμένοι κινητήρες βημάτων από διαφορετικούς κατασκευαστές, πολλαπλές και μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας και από πολλούς άλλους παράγοντες. Με βάση όλα αυτά που αναφέραμε, εξετάσαμε βήμα προς βήμα και αναλύοντας παράλληλα τις εικόνες για την γρήγορη, αργή αλλά και την μικτή αποσύνδεση προκύπτει μια καινούρια τεχνολογία, η οποία ονομάζεται smart tuning. Αυτή έχει την εξής λειτουργία: ρυθμίζει αυτόματα τον λόγο της γρήγορης και της αργής αποσύνδεσης χρησιμοποιώντας τη δυναμική τεχνολογία αποσύνδεσης και ελέγχου κυμάτων.

Με βάση όλα αυτά που αναφέρθηκαν στις ανωτέρω παραγράφους βγαίνει μια συνοπτική εικόνα για τους κινητήρες brush DC, που είναι πιο εύκολοι στο να σχεδιαστούν, ενώ αποτελούν και μία οικονομική, αποδοτική λύση για μηχανές καθημερινής χρήσης, οι οποίες έχουν χαμηλή ισχύ για τα συστήματα. Ωστόσο, λόγω της κατασκευής τους, παράγουν πολύ θόρυβο και δεν έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής στον κινητήρα.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος που δεν έχουν καρβουνάκια παρέχουν πολύ καλύτερες επιδόσεις και είναι αποτελεσματικότερες ακόμη και για εφαρμογές με υψηλότερη ταχύτητα και ισχύ. Ωστόσο, οι αλγόριθμοι που υποστηρίζουν αυτά τα κυκλώματα ελέγχου μπορεί να είναι πολύπλοκοι και δαπανηροί. Οι βηματικοί κινητήρες προσφέρουν ένα καλό αντιστάθμισμα μεταξύ κόστους και απόδοσης, αλλά συνήθως χρειάζονται ισχύ στη ρύθμιση, για να διατηρούν ομαλές και αθόρυβες επιδόσεις.

Comparison between motor types

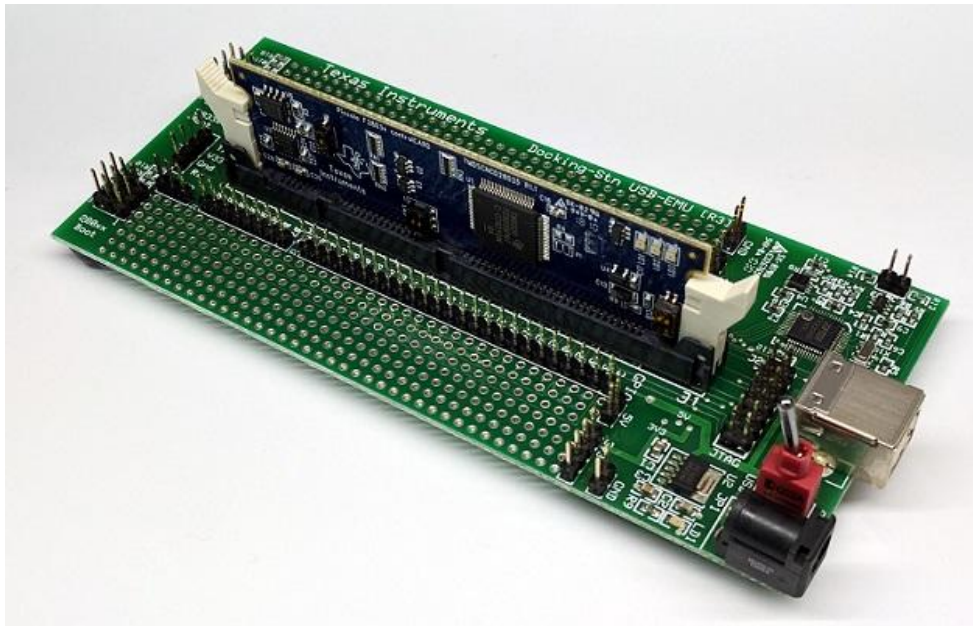
	Brushed-DC	Brushless-DC	Stepper
Low cost	\$	\$\$\$	\$\$
Current control required?	X	X	Needed*
Long motor life	Worst	Best	Better
Open loop position/speed control	X	X	Yes
Low noise	Worst	Best	Better**
High RPM	Limited by voltage	Best	Limited by step frequency
# of FETs for bidirectional control	4	6	8

* Current control needed for microstepping. Not needed if full stepping only
 ** Stepper motors can have low noise, but only if decay modes are tuned properly!!!

TEXAS INSTRUMENTS

Σενάρια Ελέγχου & Διαδικασίες Μετρήσεων – Μεθοδολογία

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε μια ολοκληρωμένη πλακέτα, η οποία είναι αρκετά χρήσιμη, απαραίτητη για τις απαιτούμενες ρυθμίσεις αλλά και μετρήσεις κυματομορφών για τους κινητήρες BrushlessDC. Το αντικείμενο με το οποίο θα εργαστούμε είναι ο μικροελεγκτής *Piccolo* με κωδικό πλακέτας TMS320F2803x.



Τυπική περιγραφή για τον συγκεκριμένο τύπο πλακέτας

Η CPU είναι υψηλής απόδοσης των 32bit με συχνότητα στα 60 MHz (ο χρόνος του κύκλου είναι 16,67-ns). Οι λειτουργίες MAC είναι 16×16 και 32×32. Επίσης, υπάρχει διπλή MAC 16×16 και έχει αρχιτεκτονική λεωφορείων Χάρβαρντ. Μπορεί να πραγματοποιήσει ατομικές λειτουργίες, γρήγορη απόκριση καθώς και επεξεργασία διακοπής. Το μοντέλο προγραμματισμού έχει ενοποιημένη μνήμη. Είναι κωδικοποιημένο σε C/C++. Διαθέτει προγραμματιζόμενο επιταχυντή ελέγχου (CLA) καθώς και επιταχυντή μαθημάτων με Πλωτή Πλάση 32bit. Μπορεί να εκτελεί κώδικα ανεξάρτητα από τον κύριο επεξεργαστή, ενώ διαθέτει μικρή Endian και υποστήριξη οριακής σάρωσης JTAG. Το πρότυπό του είναι IEEE 1149.1-1990 με θύρα πρόσβασης δοκιμής και αρχιτεκτονική σάρωσης ορίων. Έχει χαμηλό κόστος, χαμηλή ενέργεια για συσκευές, για συστήματα και ενιαία τροφοδοσία στα 3.3V. Επίσης, δεν υπάρχει προϋπόθεση για την ταξινόμηση της ισχύος του. Έχει ενσωματωμένη επαναφορά ενεργοποίησης και επαναφορά καφέ. Δεν υπάρχουν ακίδες αναλογικής

στήριξης, ενώ διαθέτει ρολόι. Υπάρχουν δύο εσωτερικοί ταλαντωτές μηδενικών καρφίτσων, On-Chip Crystal Oscillator, και εξωτερική είσοδος ρολογιού. Η μονάδα χρονοδιακόπτη είναι επιπρόσθετη και δεν υπάρχει κύκλωμα ανίχνευσης ρολογιού, ενώ αντίθετα υπάρχουν έως 45 ατομικά προγραμματιζόμενες πολυπλεξονικές καρφίτσες GPIO με φίλτρο εισόδου. Υπάρχει περίβλημα επέκτασης περιφερειακής διακοπής (PIE) που υποστηρίζει όλους τους περιφερειακούς διακόπτες και τρεις χρονιστές CPU των 32bit. Ο χρονοδιακόπτης 16bit σε κάθε ενισχυμένο διαμορφωτή πλάτους παλμού (ePWM) είναι ανεξάρτητος, ενώ η μνήμη On-Chip Flash, SARAM, OTP και η εκκίνηση ROM είναι διαθέσιμη.

Έχει μονάδα ασφαλείας κώδικα και κλειδί ασφαλείας 128bit, κλειδώματος που προστατεύει τις μνήμες. Αποτρέπει την αντίστροφη μηχανική του Firmware, ενώ έχει ασύρματο δέκτη/πομπό (UART) με μία διεπαφή σειριακής επικοινωνίας (SCI) καθώς και δύο σειριακές διεπαφές σειριακής διασύνδεσης (SPI).

Επιπλέον, υπάρχει μία μονάδα ολοκληρωμένου κυκλώματος (I2C), μία ενότητα τοπικού δικτύου διασύνδεσης (LIN) και μία ενισχυμένου ελέγχου χώρου δικτύου (eCAN), καθώς και ενισχυμένα περιφερειακά ελέγχου ePWM PWM υψηλής ανάλυσης (HRPWM). Έχει μια ενισχυμένη μονάδα καταγραφής (eCAP), καθώς και μονάδα καταγραφής εισόδου υψηλής ανάλυσης (HRCAP), αλλά και ενισχυμένη μονάδα παλμού κωδικοποιητή τετράγωνισμού (eQEP). Έχει, επίσης, μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (ADC) και αισθητήρα θερμοκρασίας καθώς και προηγμένα χαρακτηριστικά εξομοίωσης λειτουργίες αναλύσεως και διακοπής, αντιμετώπισης προβλημάτων σε πραγματικό χρόνο μέσω υλικού. Οι επιλογές της θερμοκρασίας του είναι:

- T: -40 °C έως 105 °C
- S: -40 °C έως 125 °C
- E: -40 °C έως 125 °C

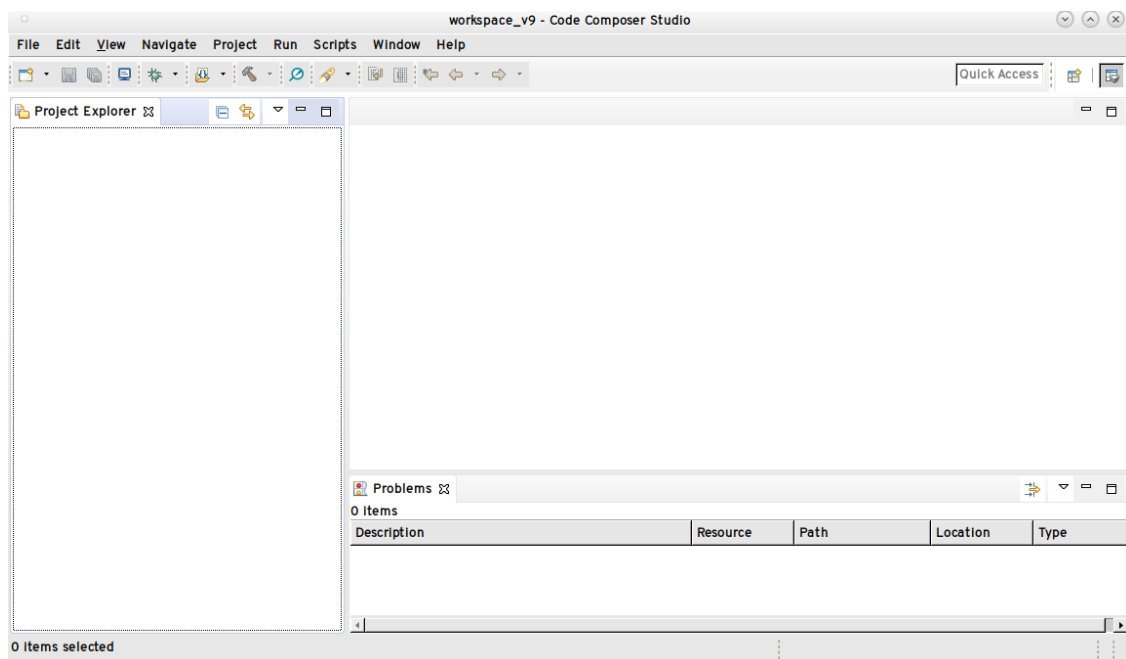
ενώ προκύπτουν και προδιαγραφές AEC Q100 για εφαρμογές αυτοκινήτων.

Ακολούθως, θα περιγράψουμε τον επεξεργαστή C2000, ο οποίος είναι αρκετά βελτιωμένος και περιλαμβάνει 32bit για την επεξεργασία, καθώς και την ανίχνευση και ενεργοποίηση της απόδοσης κλειστού βρόχου σε εφαρμογές ελέγχου σε πραγματικό χρόνο, με τον οποίο θα εργαστούμε, για να εξάγουμε τις απαραίτητες κυματομορφές για τη μέτρηση των κινητήρων BrushlessDC.

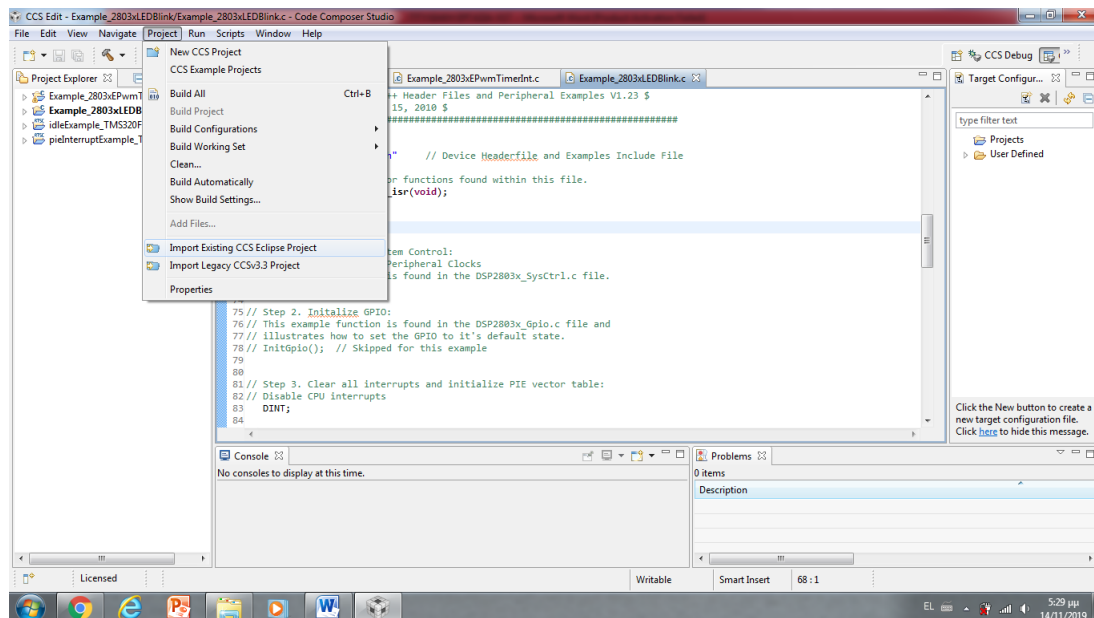
Για να επιτευχθεί η εργασία αυτή εκτός της πλακέτας που θα χρειαστούμε, θα πρέπει να εργαστούμε σε περιβάλλον στο οποίο θα γράφουμε κώδικα. Το συγκεκριμένο περιβάλλον εργασίας είναι το CodeComposerStudio. Με αυτό θα μπορούμε να εργαστούμε και να επικοινωνήσουμε με την πλακέτα, ώστε να επιτευχθεί η πτυχιακή. Επιπλέον, πρέπει να ακολουθήσουμε τα παρακάτω βήματα.

Βήμα 1: Αρχικά πρέπει πηγαίνουμε στο εικονίδιο του **CodeComposerStudio** και κάνουμε διπλό κλικ για να ανοίξει η εφαρμογή.

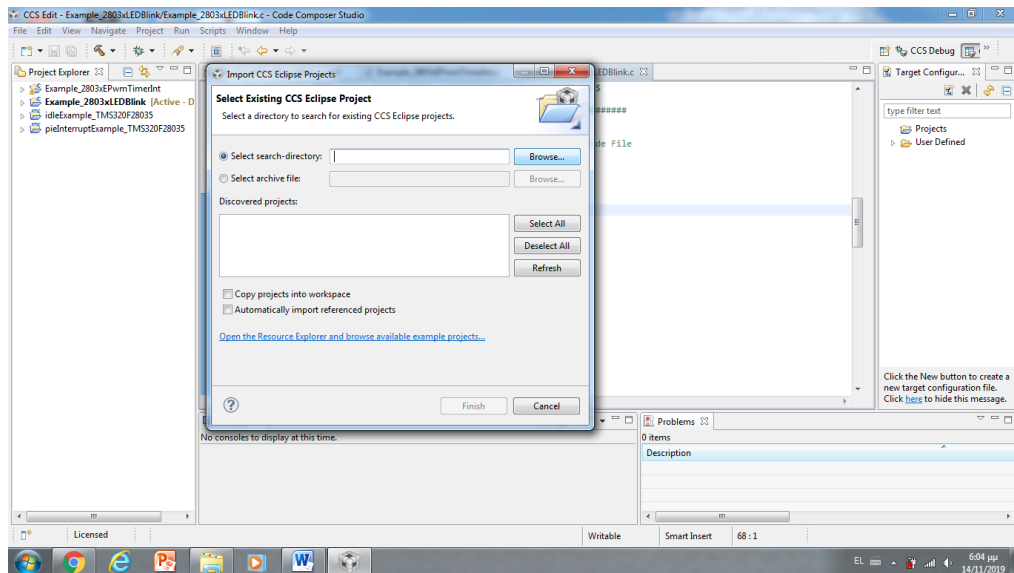
Βήμα 2: Μόλις ανοίξει, το εργασιακό περιβάλλον που θα εμφανηστεί μπροστά μας είναι.



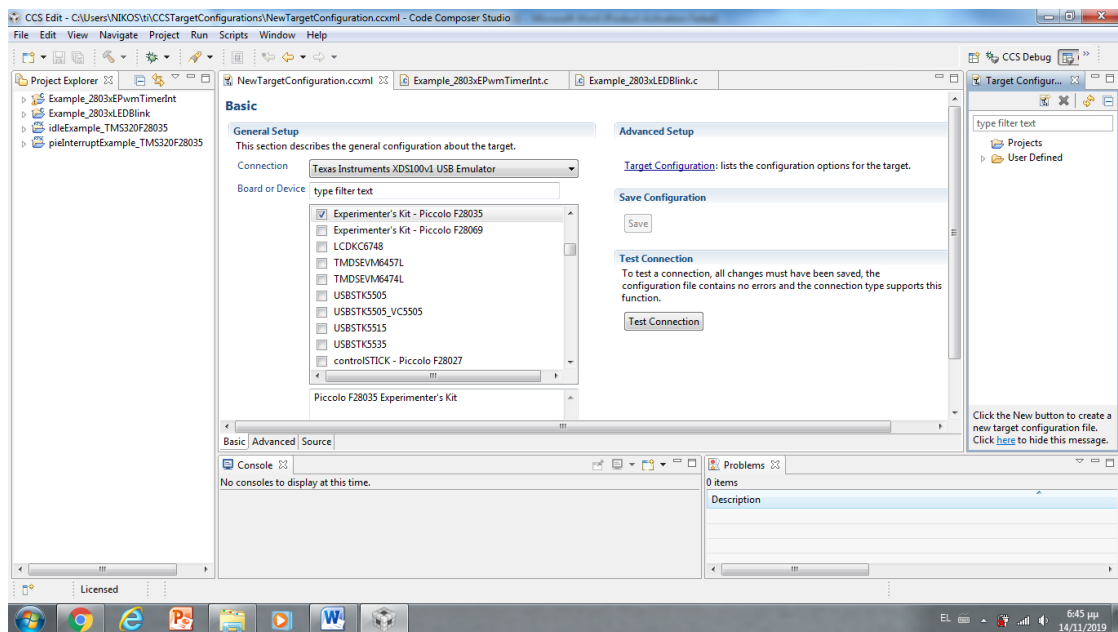
Βήμα 3: Πηγαίνουμε στην επιλογή **Project**, ανοίγει καρτέλα με διάφορες επιλογές και σε αυτό το σημείο πηγαίνουμε στο **Import Existing CCS/CCEIclipseProject** και κάνουμε κλικ.



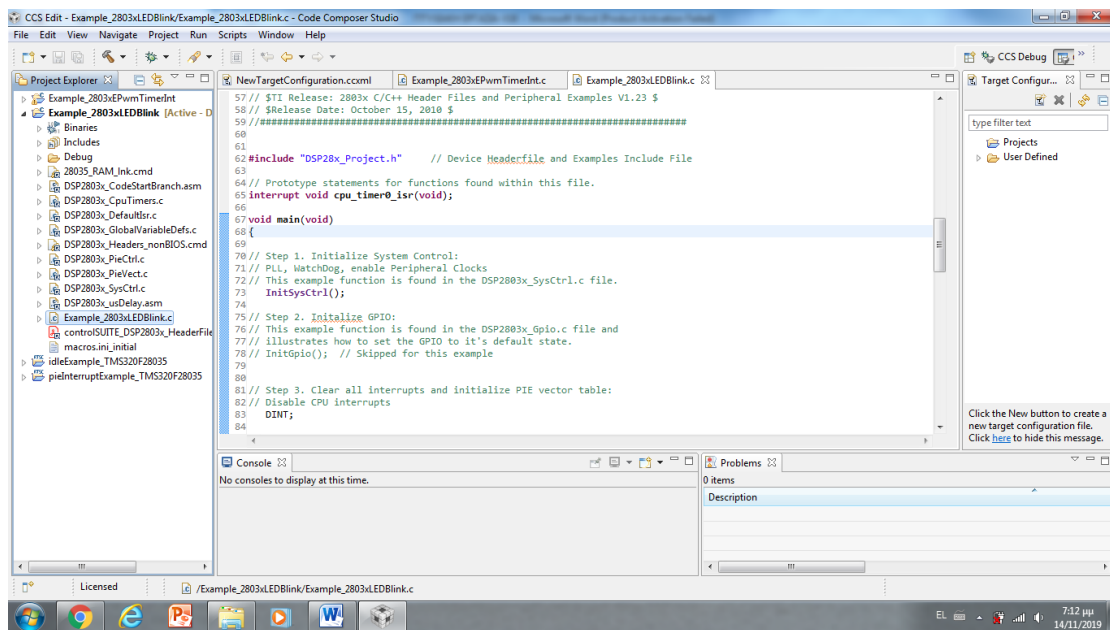
Βήμα 4: Σε αυτό το σημείο έχει ανοίξει παράθυρο και εμφανίζεται άδεια μπάρα με την ένδειξη **Select search-directory**. Ακριβώς δίπλα από αυτή την άδεια μπάρα υπάρχει κουμπί **Browse**, στο οποίο κάνουμε κλικ και αρχίζουμε την αναζήτηση του δίσκου **C:**. Βρίσκοντάς τον πρέπει να βρούμε τον φάκελο **Ti**. Εφόσον τον εντοπίσουμε, πρέπει να πάμε στον φάκελο με το όνομα **ControlSuite** και ακολούθως στον φάκελο με το όνομα **device_support**. Εκεί υπάρχει άλλος φάκελος με το όνομα **f2803x**, στον οποίο επιλέγουμε έναν άλλο με το όνομα **v123** και έπειτα σε εκείνον με το όνομα **DSP2803x_examples_ccsv4**. Κατεβάζουμε την μπάρα στα δεξιά μας ή, εάν δεν υπάρχει μπάρα, ψάχνουμε να βρούμε τον φάκελο με το όνομα **timed_led_blink** και πατάμε **Ok**.



Βήμα 5: Στο **NewTargetConfiguration** πρέπει να βάλουμε τα στοιχεία τις πλακέτας και πιο συγκεκριμένα πηγαίνουμε στο **Connection** και επιλέγουμε το **TexasInstrumentsXDS100v1 USBEmulator**. Ακριβώς από κάτω γραφεί **BoardorDevice**. Σε αυτό επιλέγουμε την πλακέτα, η οποία είναι **Experimenter'sKit - PiccoloF28035**. Μόλις υλοποιηθούν οι παράμετροι αυτοί, πηγαίνουμε στο **SaveConfiguration** και πατάμε το **Save**. Ακριβώς από κάτω υπάρχει η ένδειξη **TestConnetion**, στο οποίο κάνουμε κλικ, για να ελέγξουμε, αν υπάρχει επικοινωνία του προγράμματος με την πλακέτα σύμφωνα με τις παραμέτρους αυτές, όμως το πιο βασικό είναι να έχουμε τοποθετήσει την πλακέτα στην θύρα **USB** του **Pc**.

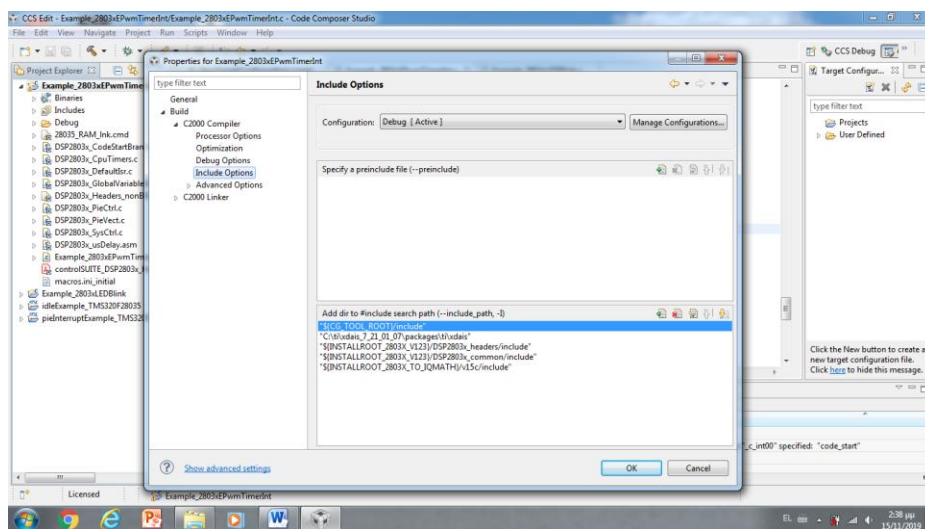
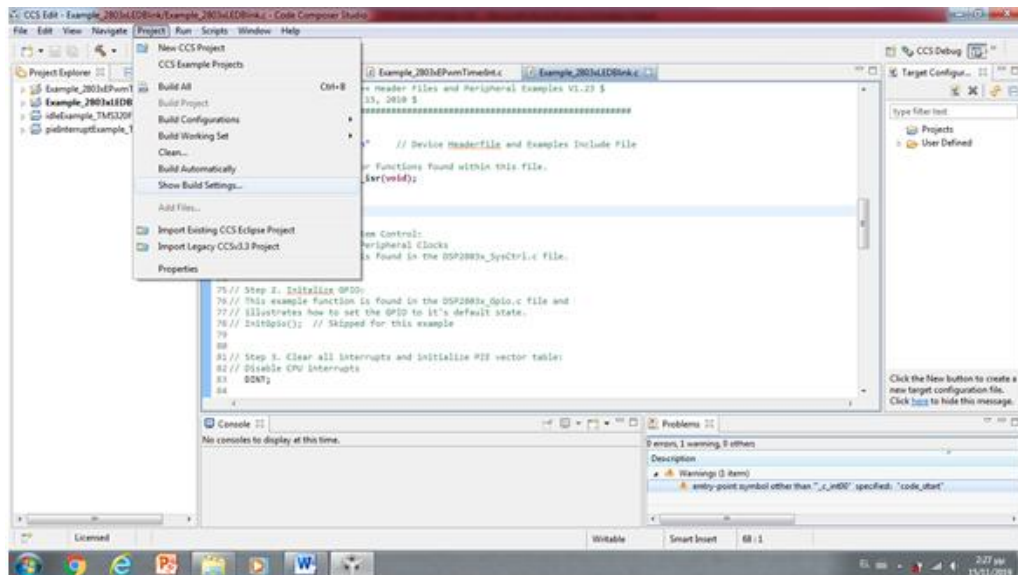


Βήμα 6: Στα αριστερά μας υπάρχει η ένδειξη **Project Explorer**, όπου έχει δημιουργηθεί ένα αρχείο με το όνομα **Example_2803xLEDBlink**. Κάνουμε κλικ στο βελάκι που υπάρχει, για να μας ανοίξει η λίστα. Έτσι, θα πρέπει να βρούμε τον κώδικα για το συγκεκριμένο παράδειγμα. Ο κώδικας έχει ακριβώς το ίδιο όνομα, με μόνη διαφορά ότι στο τέλος έχει μια τελεία μαζί με το γράμμα **c** που σημαίνει ότι είναι ο κώδικας του **Example_2803xLEDBlink.c**.

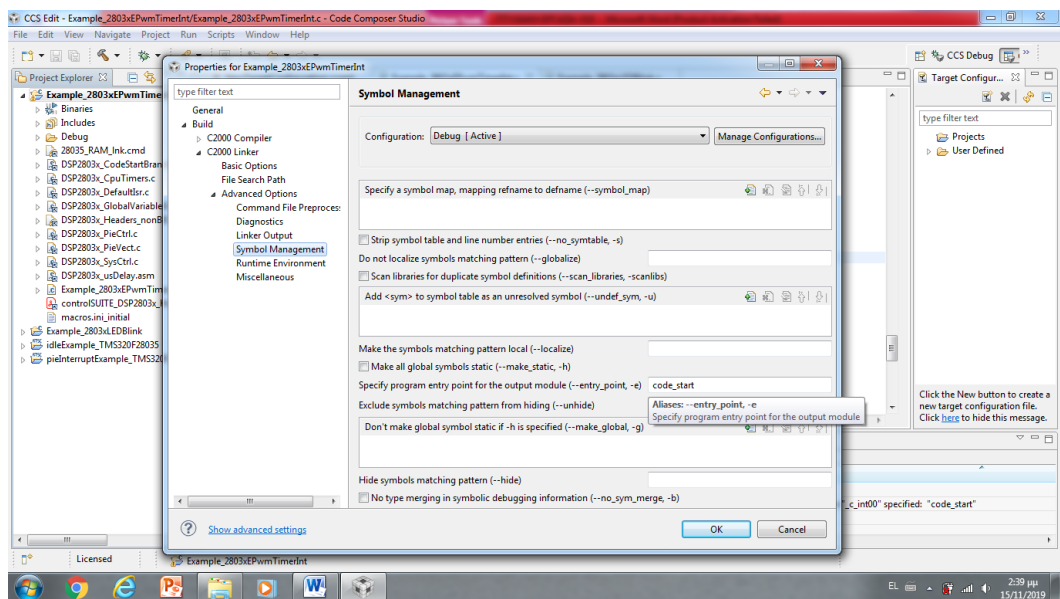


Βήμα 7: Πρέπει να κάνουμε **Build** τον κώδικα που ανοίξαμε από το προηγούμενο βήμα 6, για να δούμε, εάν βγάζει **Errors** or **Warnings**. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει τέτοια ένδειξη, παρατηρούμε την πλακέτα, εάν αναβοσβήνει το **LED3**. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι η πλακέτα έχει **3 LED**. Επίσης, στην περίπτωση που βγάλει τα **Errors** και **Warnings** πρέπει να ακολουθήσουμε μία διαδικασία, για να τα εξαφανίσουμε, ώστε να μπορέσει να λειτουργήσει ο κώδικας και αντίστοιχα η πλακέτα.

Βήμα 8: Η διαδικασία για να εξαφανίσουμε τα **Errors** και τα **Warnings** είναι η εξής: στην ένδειξη **Project** ανοίγει καρτέλα στην οποία βρίσκουμε το **Show Build Settings** και κάνουμε κλικ. Εκεί ανοίγει μεγάλη καρτέλα στην οποία γίνονται γενικές ρυθμίσεις για όλο το **Code Composer Studio**. Σύμφωνα με τα **Warnings** πηγαίνουμε στις ρυθμίσεις και βρίσκουμε το **Build**, το **C2000 Compiler** και τα **Include Options**. Αυτός είναι ο τρόπος για να δηλωθούν τα **Warnings**, επιλέγοντας τον φάκελο για τον οποίο δεν αναγνωρίζει το σύστημα, πατώντας το **OK** αποθηκεύει τις ρυθμίσεις που έγιναν. Μόλις επιτευχθεί το βήμα αυτό πρέπει να γίνει πάλι **Build** για να βεβαιωθούμε ότι μειώθηκαν τα **Warnings**.



Όπως προέκυψε από τις προηγούμενες φωτογραφίες για τη διόρθωση με τα **Warnings**, η ίδια διαδικασία ακολουθείται για να εξαλείψουμε και τα **Errors**. Εδώ, απλώς επιλέγουμε διαφορετική καρτέλα η οποία βρίσκεται στο **Build**, το **C2000 Linker**, το **Advanced Options** και το **Symbol Management**. Μετά από αυτό, πηγαίνουμε στα δεξιά που υπάρχει η φράση **Specify program entry point for the output module (--entry-point, -e)** και σβήνουμε τον τίτλο `code_start`, αφήνοντάς τον κενό. Μόλις γίνει το βήμα αυτό πρέπει να πραγματοποιηθεί πάλι **Build** για να βεβαιωθούμε ότι μειώθηκαν τα **Errors**.



Βήμα 9:Εφόσον έχουν γίνει με επιτυχία όλα τα προηγούμενα βήματα, εδώ μπορούμε να δούμε εάν η διαδικασία που έχουμε ακολουθήσει έφερε τα επιθυμητά αποτελέσματα, τα οποία είναι “να τρέξει” η πλακέτα και να αναβοσβήσει το **Led3**.

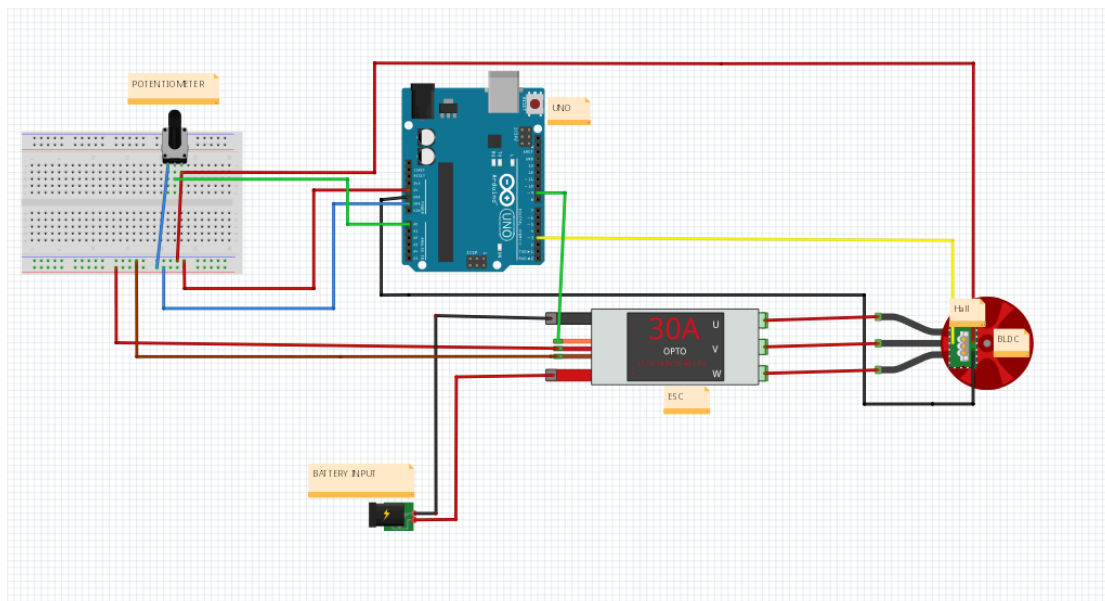


Πείραμα 1.mp4

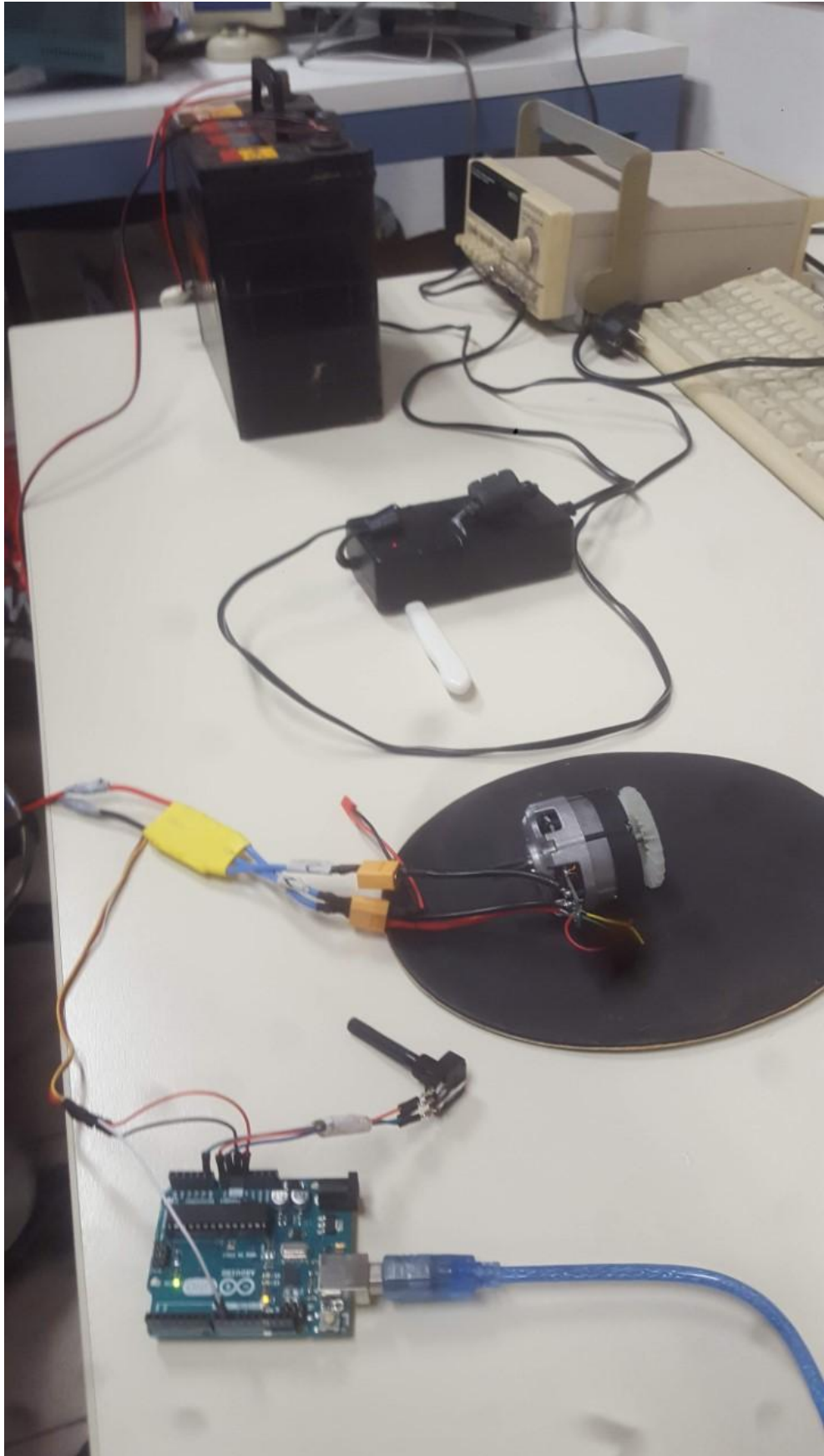
Πιστοποίηση Χρήσης Αποτελεσμάτων

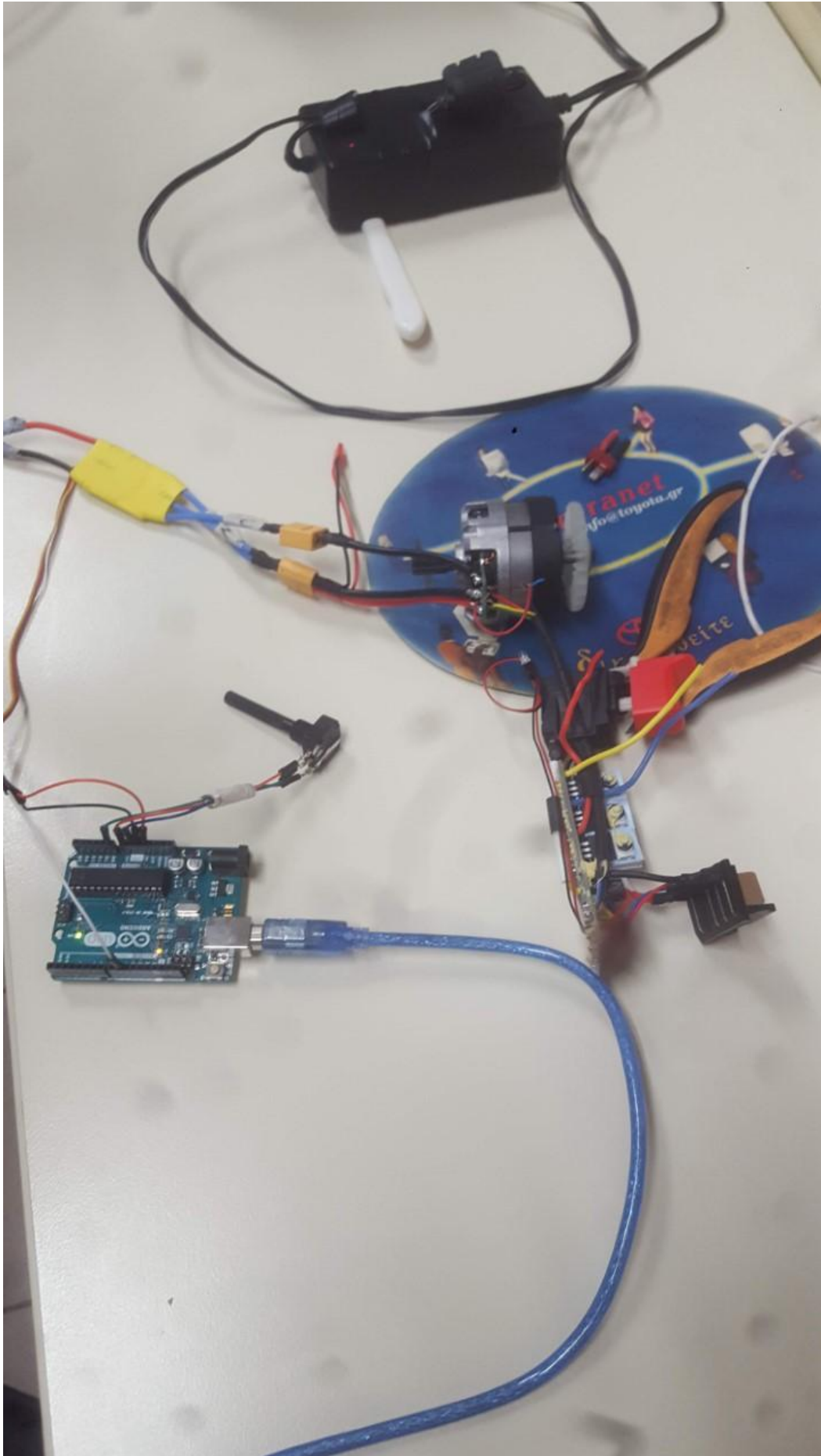
Για την πιο εύκολη κατανόηση από αρχάριους στο αντικείμενο της μηχανικής, το στάδιο της πειραματικής μελέτης του συστήματος – ελεγκτή έγινε με τη βοήθεια Arduino Uno αντί για TI Piccolo.

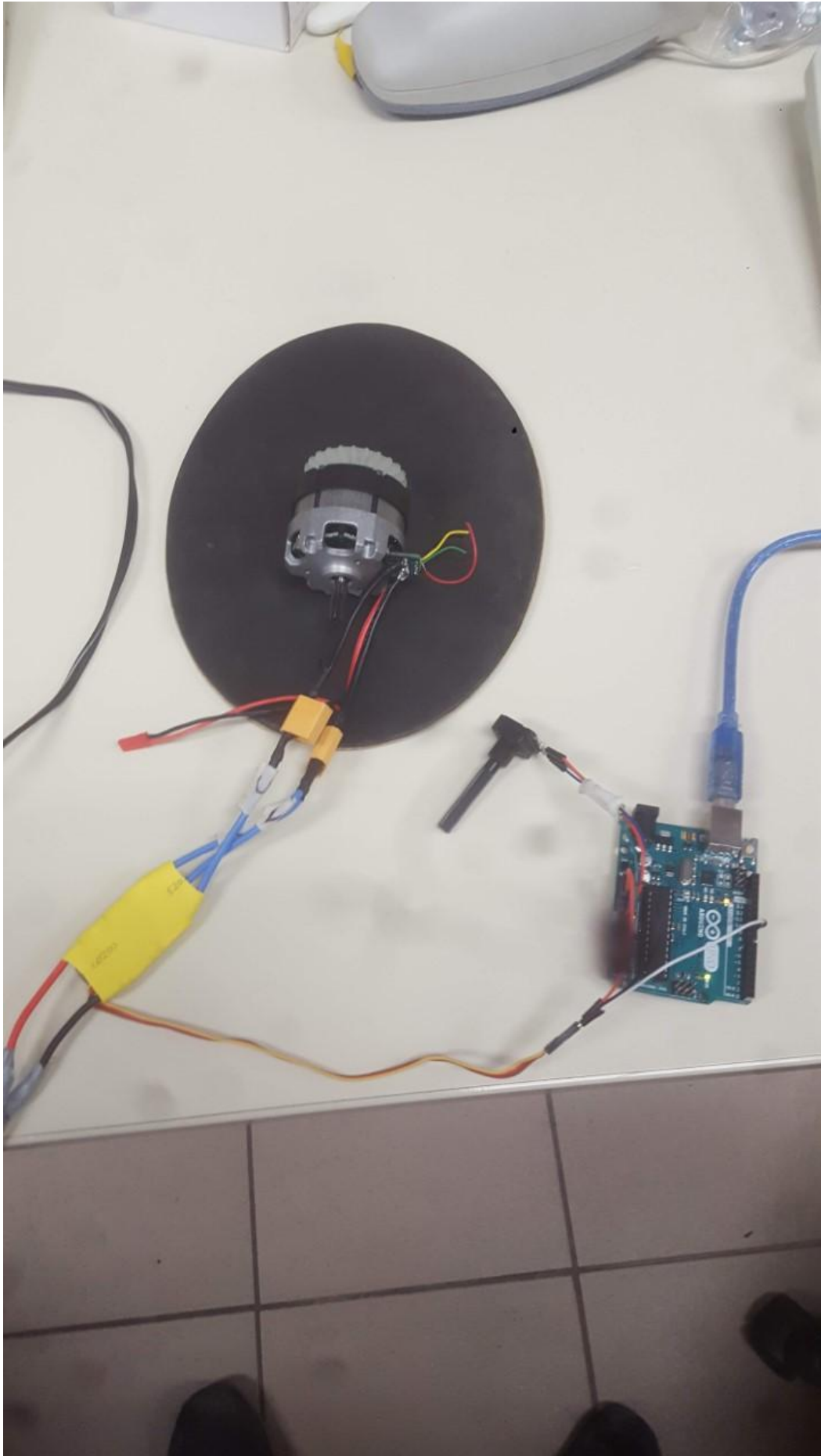
Στην εικόνα βλέπουμε το πώς γίνεται η σύνδεση ενός BLDC με ενσωματωμένη πλακέτα που περιλαμβάνει τον αισθητήρα *Hall*. Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι να κατανοήσουμε τη λειτουργία του σύγχρονου κινητήρα, ο οποίος δεν περιλαμβάνει ψήκτρες (καρβουνάκια) αλλά περιέχει πηνία στο εσωτερικό του. Ο τρόπος λειτουργίας είναι ο εξής: εσωτερικά δημιουργεί μαγνητικό πεδίο με αποτέλεσμα να κάνει την περιστροφή του άξονα πιο εύκολη, γρήγορη και αξιόπιστη, σε αντίθεση από τον παλιό τύπο, ο οποίος στο εσωτερικό του περιλαμβάνει τις ψήκτρες (καρβουνάκια) που έχει σαν αποτέλεσμα να φθείρεται ο άξονας και να καταστρέφονται οι ψήκτρες.

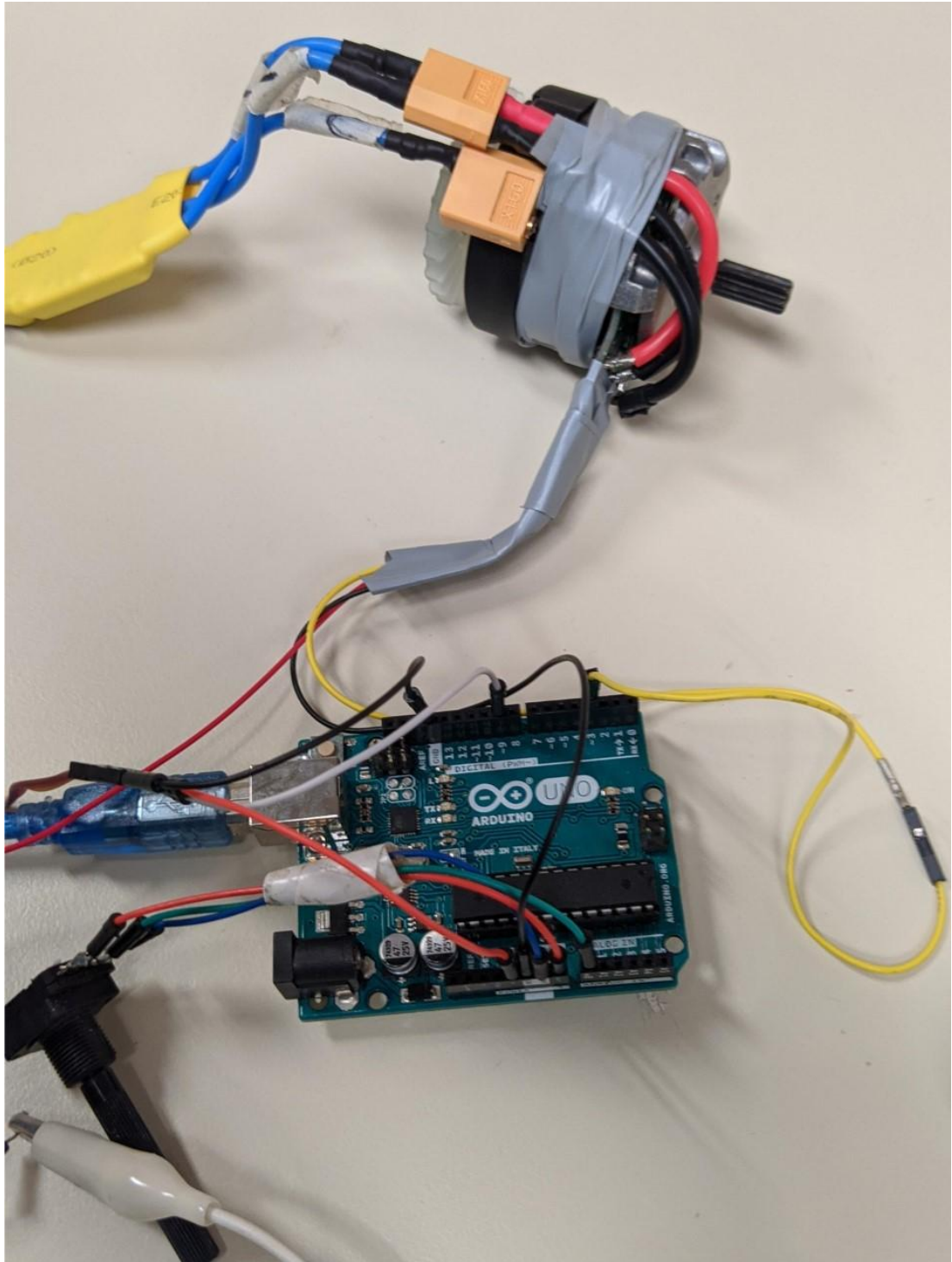


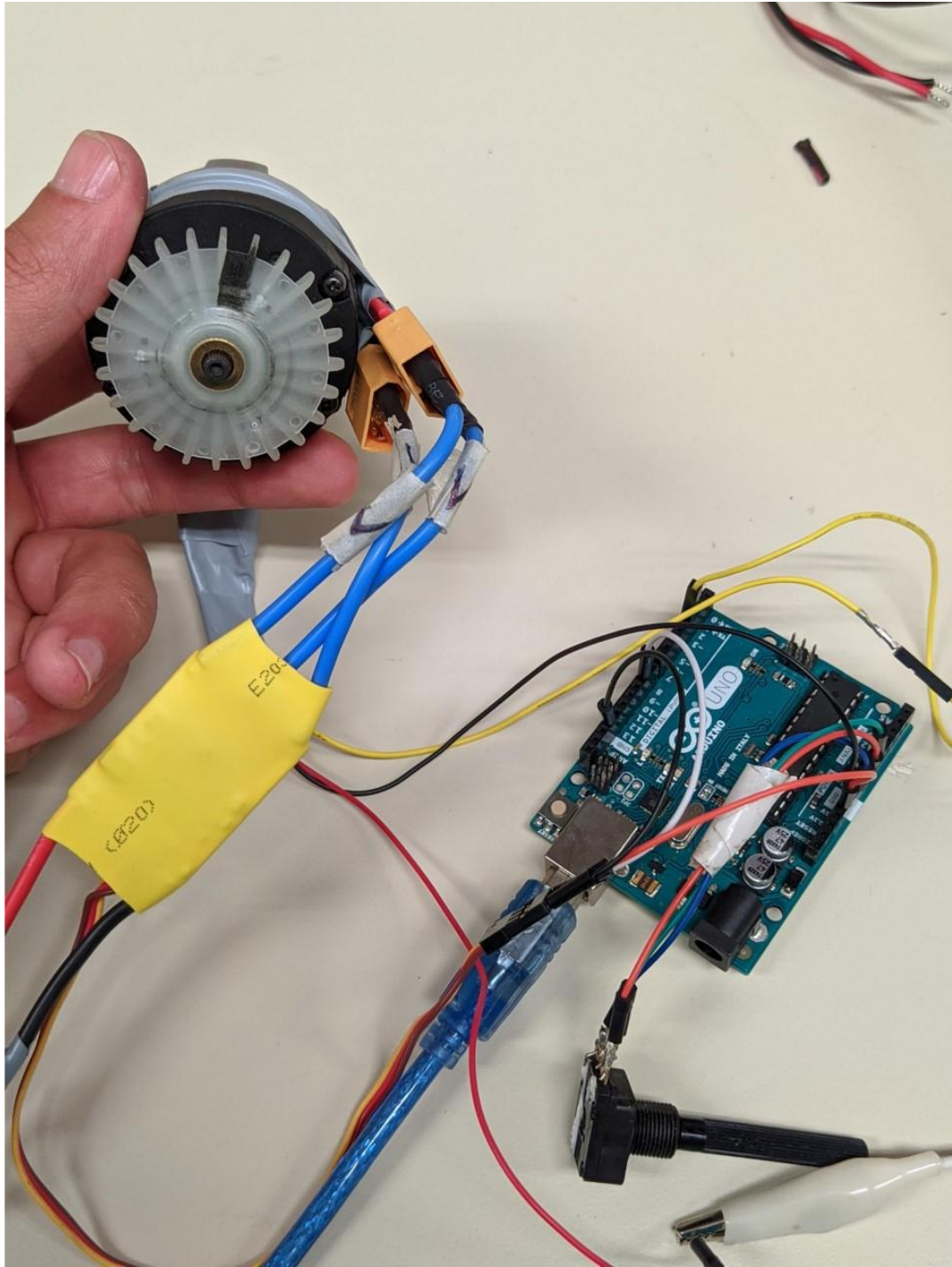
Στην πάνω εικόνα βλέπουμε το πρόγραμμα Fritzing και τη δημιουργία συνδέσεων με απλό τρόπο κατανόησης για τις καλωδιώσεις από το ένα αντικείμενο στο άλλο. Στις πιο κάτω εικόνες μπορούμε να διακρίνουμε τις πραγματικές συνδεσμολογίες του BLDC κινητήρα, για να κατανοήσουμε το πώς από ένα πρόγραμμα το οποίο ονομάζεται Fritzing μπορούμε να δημιουργήσουμε και να υλοποιήσουμε καλωδίωση και συνδέσεις από το ένα αντικείμενο στο άλλο.











Στο Πείραμα 2 που ακολουθεί διακρίνουμε το πώς λειτουργεί ο BLDC κινητήρας:

[Πείραμα 2.mp4](#)

Στο σημείο αυτό του πειράματος χρησιμοποιήσαμε ποτενσιόμετρο, για να μπορεί κάποιος χρήσης να μεταβάλλει τις στροφές του κινητήρα. Ο κώδικας που βρίσκεται πιο κάτω υπάρχει στο εσωτερικό του μικροελεγκτή ArduinoUno.

```
#include <Servo.h>

#define INT 3 // Arduino pin 3 for supporting interrupts

Servo ESC; // Servo object for controlling the ESC
int potValue; // Potentiometer input value from adjusting the rpms of the motor
volatile int clicks=0; // rpm counter based on the hall sensor pulses

void setup() {
  ESC.attach(9, 1000, 2000); // Attach the ESC on pin 9 with pulse width from 1000 to 2000 microseconds
  pinMode(INT, INPUT); // Interrupt input pin
  attachInterrupt(1, myISR, FALLING);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  potValue = analogRead(A0); // read the value of the potentiometer
  potValue = map(potValue, 0, 1023, 0, 180); // map values between 0 and 180
  ESC.write(potValue); // Send signal to ESC
  clicks = 0;
  delay(1000);
  Serial.println((float)60*clicks/2.0); // print rpms, for 2 pulses sent per rotation
}

void myISR() // count pulses
{
  clicks++;
}
```

Ο δεύτερος κώδικας που χρησιμοποιήσαμε υλοποιήθηκε, για να παρεμβάλουμε το εξωτερικό ποτενσιόμετρο. Με αυτή τη μέθοδο ο Arduino Uno μεταβάλλει τις στροφές του κινητήρα από μόνος του, χωρίς να επεμβαίνει κάποιος χρήστης, για να αλλάζει τις στροφές του κινητήρα.

```
#include <Servo.h>

#define INT 3 // Arduino pin 3 for supporting interrupts

Servo ESC; // Servo object for controlling the ESC
int potValue; // Potentiometer input value from adjusting the rpms of the motor
int pwmValue; // The PWM equivalent for rpm adjustment
volatile int clicks=0; // rpm counter based on the hall sensor pulses

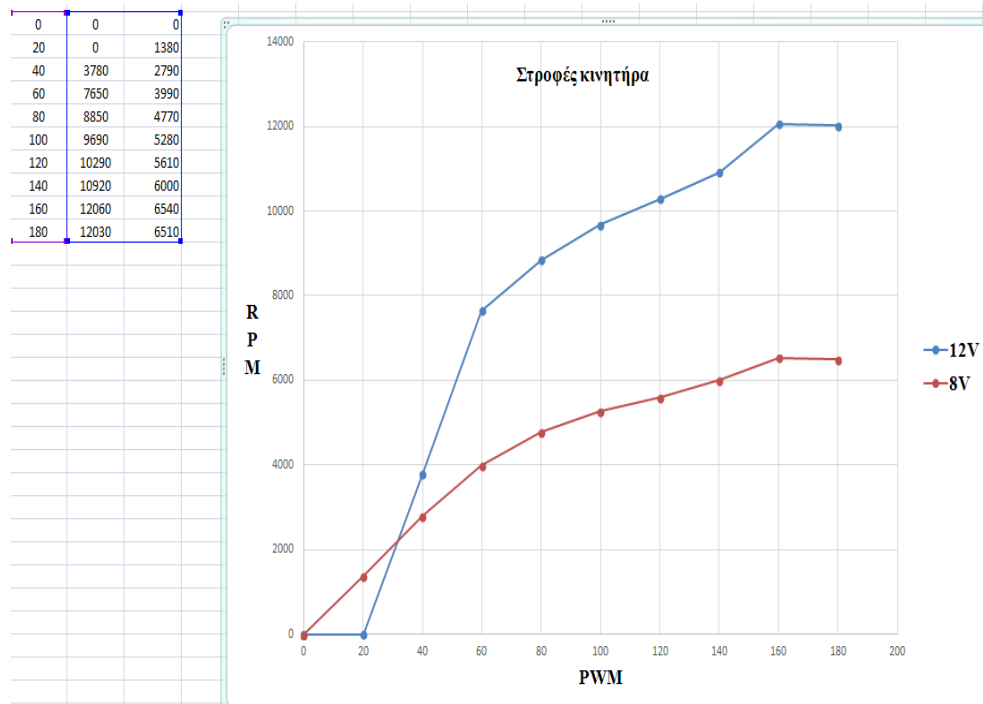
void setup() {
  ESC.attach(9, 1000, 2000); // Attach the ESC on pin 9 with pulse width from 1000 to 2000 microseconds
  pinMode(INT, INPUT); // Interrupt input pin
  attachInterrupt(1, myISR, FALLING);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  delay(2000);
  clicks = 0;

  for (int i=0; i<=180; i+=20)
  {
    pwmValue = i;
    ESC.write(pwmValue); // Send signal to ESC
    delay(500); // Let it stabilize speed
    clicks = 0; // Reset pulses counter
    delay(1000); // wait for 1 sec for counting pulses
    Serial.print(pwmValue); Serial.print(" "); // print pwm
    Serial.println((float)60*clicks/2.0); // print rpms, for 2 pulses sent per rotation
  }
}

void myISR() // count pulses
{
  clicks++;
}
```


Στο γράφημα που ακολουθεί μπορούμε να διαπιστώσουμε και να διακρίνουμε τις στροφές του κινητήρα, σύμφωνα με τις μετρήσεις που επιλέξαμε να εξάγουμε με τη χρήση μπαταρίας **8Volt** και **12Volt**. Ο οριζόντιος άξονας υποδηλώνει τη διαμόρφωση πλάτους παλμού (Pulse-width modulation **PWM**) και ο κάθετος άξονας δείχνει τις στροφές ανά λεπτό (Revolutions per Minute **RPM**).



Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις που απεικονίζονται στα γραφήματα, φαίνεται ότι για μεγαλύτερη τάση τροφοδοσίας πετυχαίνουμε πιο υψηλό αριθμό στροφών στον κινητήρα για ίδια rpm τιμή σήματος εισόδου στον ESCdriver. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο οι συγκεκριμένοι κινητήρες είναι χρήσιμοι στις διάφορες εφαρμογές που λαμβάνουν χώρα.

Συνοψίζοντας όλη την εργασία μπορούμε να εξάγουμε πλέον μία γενική εικόνα από τους σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, η οποία είναι ότι χρησιμεύουν αρκετά για διάφορες εφαρμογές στη βιομηχανία αλλά και σε πιο απλές εφαρμογές για τον απλό καταναλωτή.

Αναφορές

Κατωτέρω υπάρχουν τα *links* από τα οποία αντλήσαμε τις πιο χρήσιμες πληροφορίες για να γραφτεί η συγκεκριμένη πτυχιακή.

Οδήγηση των κινητήρων

<http://www.ti.com/motor-drivers/brushless-dc-blcd-drivers/overview.html>

Ηλεκτροκινητήρες μοτέρ – Αναλυτική παρουσίαση

<https://niktek.gr/blog/%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BA%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B5%CF%82-%CE%BC%CE%BF%CF%84%CE%B5%CF%81/>

Έξυπνα - Ευφυή υλικά

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%85%CF%86%CF%85%CE%AE_%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AC

Αισθητήρας

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B9%CF%83%CE%B8%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82>

Μαγνήτης

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B1%CE%B3%CE%BD%CE%AE%CF%84%CE%B7%CF%82>

Ανεμιστήρας

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%B5%CE%BC%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82>

Μαγνήτες φερρίτη – Κεραμικοί

1. http://www.neodymium--magnet.com/Greece/ceramic_magnet_ferrite_magnet.html#History
2. <https://www.magsy.gr/26598->
3. <http://gr.bowellmagnets.com/magnet-material/ferrite-magnets/ceramic-magnets-ferrite-special-shaped.html>
4. <http://ikee.lib.auth.gr/record/129143/files/GRI-2012-8600.pdf>

Κράματα Σπάνιων Γαιών

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%80%CE%AC%CE%BD%CE%B9%CE%B5%CF%82_%CE%B3%CE%B1%CE%AF%CE%B5%CF%82

Flywheel (Πληροφορίες)

<https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel>

Πλεονεκτήματα για τον σύγχρονο κινητήρα μόνιμου μαγνήτη

https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/2017/03/blog-post_9.html

ESC (Έλεγχος Ταχύτητας ελεγκτή) για drone

1. https://www.edudrone-project.eu/wp-content/uploads/2018/07/Guidelines-on-the-use-of-Drones-in-VET_GR.pdf
2. <http://dronenodes.com/drone-esc-electronic-speed-controller/>
3. <https://www.getfpv.com/learn/new-to-fpv/all-about-multirotor-fpv-drone-electronic-speed-controller/>

Ηλεκτροκινητήρας (Τμήμα για τον συλλέκτη)

http://physiclessons.blogspot.com/2013/03/blog-post_3505.html

Κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος

<http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C123/487/3182,12850/>

Πρόγραμμα Fritzing

<https://fritzing.org/projects/arduino-brushless-motor-control/>

Κώδικας μαζί με συνδέσεις

<https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-brushless-motor-control-tutorial-esc-bldc/>

Κύκλωμα οδηγήσεις που χρησιμοποιήθηκε για τον κινητήρα χωρίς ψήκτρες

<https://topelectronics.gr/rc-and-drones/esc-speed-controllers/30a-brushless-motor-esc-for-rc-airplane-quadcopter/>

Τα σχέδια και τις πληροφορίες για την πλακέτα **Piccolo είναι από την **TexasInstrument****<https://www.ti.com/tool/TMDSDOCK28035>