ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

ΤΙΤΛΟΣ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΝΕΡΓΗΣΗΣ ΤΕΤΡΑΠΟΔΩΝ ΡΟΜΠΟΤ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΧΩΡΙΣ ΨΗΚΤΡΕΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΟΠΟΔΟΥ ΡΟΜΠΟΤ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

Πέτρος – Άγγελος Πολυδώρου

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2018

Περίληψη

Από τα αρχαία χρόνια τα τετράποδα ζώα αποτέλεσαν πιστό συνεργάτη και φίλο του ανθρώπου καθώς πρόσφεραν πολύτιμες υπηρεσίες όπως τη γρήγορη και αξιόπιστη μεταφορά σε δύσκολα εδάφη (ημίονος) και τον εντοπισμό και διάσωση θυμάτων σε φυσικές και μη καταστροφές (σκύλος). Τα τετράποδα κινούνται με χαρακτηριστική ευκολία στο φυσικό και στο ανθρώπινο διαμορφωμένο περιβάλλον. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την εντυπωσιακή πρόοδο των αρθρωτών ρομπότ οδήγησε την επιστημονική κοινότητα να αναγνωρίσει τα οφέλη που τα ρομπότ με πόδια και δη τα τετράποδα ρομπότ μπορούν να προσφέρουν στον άνθρωπο. Παρόλο που τα τροχοφόρα και ερπυστριοφόρα μηχανήματα – οχήματα χρησιμοποιούνται ευρέως, εμφανίζουν το μειονέκτημα πως περίπου το 50% της χερσαίας επιφάνειας της γης είναι μη προσβάσιμο σε αυτά.

Σήμερα στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων έχουν κατασκευαστεί πολλά ρομπότ ικανά να εκτελούν διάφορες κινήσεις όπως περπάτημα, τρέξιμο και υπερπήδηση εμποδίων, αναρρίχηση και περπάτημα στον πάγο. Προκειμένου να καταφέρνουν όμως να προσαρμόζονται σε τόσο διαφορετικές απαιτήσεις θα πρέπει να μπορούν να αλληλοεπιδρούν με το έδαφος και πιο συγκεκριμένα να μπορούν να ελέγξουν τις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ του περιβάλλοντος και αυτών. Ως εκ τούτου θα πρέπει να μπορούν να προσαρμόσουν την ενδοτικότητά τους κάθε φορά όπως συμβαίνει και στην περίπτωση π.χ. ενός τετράποδου ζώου το οποίο υποσυνείδητα ανάλογα με τις απαιτήσεις ελέγχει κατάλληλα τους μύες του και τους τένοντες του ώστε να ισορροπεί και να κινείται αποτελεσματικά. Τα σύγχρονα ρομπότ προκειμένου να μπορούν να μεταβάλλουν την ενδοτικότητά τους και να εμφανίζουν την κατάλληλη συμπεριφορά ακολουθούν διάφορα σχήματα επενέργησης αλλά και σχεδίασης ποδιών. Σε αυτά επιχειρείται η εκτίμηση της δύναμης που αναπτύσσεται στο πέλμα και η εφαρμογή διαφόρων αλγορίθμων **(virtual leg compliance)** για τον έλεγχο της ενδοτικότητας του ρομπότ σε διάφορες καταστάσεις.

Στην παρούσα διπλωματική, αναλύουμε τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ο μηχανισμός του ποδιού και εστιάζουμε στις διάφορες μεθόδους επενέργησης, που συνδέονται με τη συμπεριφορά του ρομπότ. Γενικά είναι επιθυμητό να μην χρησιμοποιήσουμε αισθητήρα δύναμης για τον έλεγχο δύναμης αλλά αυτή να υπολογίζεται μέσω ειδικών ιδιοδεκτικών χαρακτηριστικών. Αυτό με την σειρά του συνεπάγεται ορισμένα μηχανικά χαρακτηριστικά που η μέθοδος επενέργησης αλλά και ο μηχανισμός του ποδιού πρέπει να έχουν. Για παράδειγμα το υψηλό εύρος ζώνης **(high bandwidth)** του συστήματος επενέργησης και η χαμηλή μηχανική εμπέδηση **(low mechanical impedance)** του μηχανισμού του ποδιού είναι μερικά από αυτά. Μία από τις μεθόδους επενέργησης που καλύπτει αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η μέθοδος απευθείας οδήγησης **(Direct-Drive Actuation)**. Επειδή όμως οι απαιτήσεις ροπής στις εφαρμογές τετράποδων ρομπότ είναι πολύ υψηλές για να εφαρμοστεί αυτή η μέθοδος επενέργησης απαιτούνται κινητήρες που παράγουν μεγάλη ροπή όπως για παράδειγμα οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες, όπου ο δρομέας περιστρέφεται εξωτερικά **(outrunner brushless motors)**.

Όμως η μεγάλη θεωρία και οι πολλοί τρόποι λειτουργίας των κινητήρων χωρίς ψήκτρες, τραπεζοειδής και ημιτονοειδής οδήγηση, έλεγχος πεδίου **(field oriented control)** απαιτούν ανάλυση και μελέτη σε εξονυχιστικό βαθμό ώστε κάποιος να εκμεταλλευτεί πλήρως τις δυνατότητές τους. Επίσης επειδή οι συγκεκριμένοι κινητήρες προέρχονται από την βιομηχανία των drones, συνηθώς πολλά από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά δεν δίνονται στα φύλλα κατασκευαστή (αδράνεια δρομέα) και ως εκ

τούτου η μελέτη διαφόρων πειραματικών μεθόδων για την εξακρίβωση των διαφόρων παραμέτρων ήταν αναπόφευκτη στην παρούσα διπλωματική. Τέλος λόγω ότι στην μέθοδος απευθείας οδήγηση, όσο μεγάλη και να είναι η ροπή που παράγει ο εκ κατασκευής κινητήρας, δεν χρησιμοποιείται μείωση για αύξηση ροπής, η χρήση προσομοίωσης για να εξετάσουμε τα μεγέθη που μπορεί να έχει ένα μονόποδο ρομπότ είναι απαραίτητη.

Abstract

From the ancient years, quadruped animals have been a loyal partner and friend of humans, offering valuable services, such as fast and reliable transportation through difficult terrains (mule) or tracking and rescuing victims of natural disasters (dog). Quadrupedal robots move with great agility in domestic and rugged terrain, in association with the impressive evolution in the field of articulated robots have lead the researchers to recognize the potential benefits of constructing quadruped robots. Although wheeled and tracked systems are used widely up to date, the have the drawback that approximately 50% of earth landscape is inaccessible for them.

To this day, many research programs have led to the construction of a number of promising quadruped robots that can run fast, jump over obstacles, carry heavy loads, climb stairs and walk on ice. However, in order to adjust in so many different situations, they have to interact with ground and more specifically they have to control the forces that are developed between robot and ground. Therefore, they have to be able to adjust their compliance as a quadrupedal animal does, which subconsciously controls its muscles and tendons depending on the task achieving to be stable. Similarly, biomimetic modern robots, in order to control their compliance and to be able to show the appropriate behavior, they have been constructed with different actuation schemes and leg designs through which they try to sense the forces that are developed between the leg toe and the ground, and to apply different algorithms such as virtual leg compliance.

In this thesis, we study the main requirements and parameters a leg mechanism has to meet focusing on the different actuation schemes connected directly the robot's behavior. In this study, it becomes clear that force sensing required for force – control, needed for the different compliance algorithms, is better to be accomplished through proprioceptive actuation characteristics, eliminating the usage of a force sensor. This implies that actuation methods and leg mechanism have to meet requirements such as high bandwidth and low mechanical impedance respectively. One of the current actuation methods uses electromagnetic motors which meet these requirements is direct-drive actuation. Due to the fact that quadrupedal robots have great demands of torque, this method relies on specific motors such as outrunner brushless motors which, have large rotor radius and short length producing large torque.

Due to the fact that theory and operation of these motors (trapezoidal, sinusoidal commutation and field-oriented control) are extended, it is necessary to study them in detail so that their capabilities are exploited fully. Furthermore, outrunner motors are mostly used in the drone industry and thus their operational parameters such as inertia or rated current are not given in the manufacturer's datasheets. Therefore, experimental methods are needed to find the motor's parameters was a focus on this thesis. Finally, in direct-drive actuation method, that this kind of motors outputs larger torque than common motors of same power, gears and transmissions have been eliminated and therefore simulations were necessary to estimate how large and heavy a monopod robot could be.

Αφιερώνεται,
στην οικογένειά μου και στην Ναντίνα

Πρόλογος

Από αυτή την θέση θέλω να ευχαριστήσω τους ανθρώπους εκείνους που στάθηκαν σημείο αναφοράς στην επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας και συνάμα της ολοκλήρωσης των σπουδών του μηχανολόγου μηχανικού.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου Ευάγγελο Παπαδόπουλο για την ευκαιρία να εκπονήσω την διπλωματική και για τις κατευθυντήριες γραμμές που έθετε καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου. Πέρα από τις επιστημονικές του γνώσεις, τις συμβουλές και την εποικοδομητική κριτική του, η εργατικότητα και η οργάνωσή του αποτελούν και θα αποτελούν πηγή έμπνευσης.

Επιπροσθέτως θα ήθελα να ευχαριστήσω τους τρεις υποψήφιους διδάκτορες αλλά και καλούς φίλους Κώστα Μαχαιρά, Κώστα Κουτσούκη, αλλά και Θανάση Μαστρογεωργίου, για την προθυμία να προσφέρουν την βοήθειά τους σε οποιαδήποτε προβλήματα αντιμετώπιζα στην διάρκεια της διπλωματικής μου αλλά και το γεγονός πως ο ζήλος τους για σκληρή δουλειά και η αγάπη τους για την επιστήμη των τετράποδων ρομπότ αποτελούσαν κίνητρο καθημερινά. Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στον υποψήφιο ηλεκτρολόγο μηχανικό Γιώργο Μπολανάκη που οι συζητήσεις πάνω στους κινητήρες χωρίς ψήκτρες και στα ηλεκτρονικά τους αποτέλεσαν βοήθεια κομβικής σημασίας, καθώς και στα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου για το ευχάριστο και φιλικό περιβάλλον που παρείχαν.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Αλέξανδρο και Αικατερίνη, στα αδέρφια μου Νίκο και Αποστόλη, καθώς και στους φίλους μου και στην φίλη μου Ναντίνα για την υπομονή και την στήριξη που έδειξαν όλο αυτό τον καιρό καθώς και το γεγονός πως στηρίζουν τις επιλογές μου με οποιοδήποτε τρόπο. Η πίστη τους σε πολλές δύσκολες στιγμές μου έδωσε την δύναμη και την αυτοπεποίθηση να συνεχίσω.

Πέτρος – Άγγελος Πολυδώρου

Φεβρουάριος 2018

Περιεχόμενα

Περίληψη **3**

Abstract **5**

Πρόλογος **7**

Περιεχόμενα **8**

Κατάλογος Σχημάτων **10**

Κατάλογος Πινάκων **17**

1 Εισαγωγή **19**

1.1 Σκοπός Εργασίας 19

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση – Ιστορική αναδρομή 20

1.3 State of the Art σε ρομπότ με πόδια 23

1.4 Δομή Εργασίας 26

2 Σχεδιαστικές αρχές ρομπότ με πόδια **28**

2.1 Σχεδιαστικές αρχές για τα πόδια του ρομπότ 28

2.2 Αρχές επενέργησης στα ρομπότ με πόδια 32

2.3 Διάφορες γενικές μέθοδοι επενέργησης 37

3 Μοντελοποίηση και Θεωρία κινητήρων χωρίς ψήκτρες **44**

3.1 Εισαγωγή 44

3.2 Κατασκευή 45

3.3 Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη/παράμετροι του κινητήρα 53

3.4 PMSM ή BLDC Κινητήρας 61

3.5 Τρόποι λειτουργίας και οδηγήσεις 62

4 Χαρακτηριστικές Παράμετροι Κινητήρων χωρίς ψήκτρες και Αναγνώρισή τους **80**

4.1 Εισαγωγή 80

4.2 Τύπος Κινητήρα 80

4.3 Πειράματα – BLDC κινητήρα 81

4.4 Θερμική Ανάλυση 100

5 Προσομοίωση Επενέργησης Απευθείας Οδήγησης Μονόποδου ρομπότ με δύο συνδέσμους σε κατακόρυφο οδηγό **113**

5.1 Εισαγωγή 113

5.2 Σχεδιαστικές αρχές 113

5.3 Προσομοίωση ποδιού με 2 συνδέσμους – επενέργηση απευθείας οδήγησης 115

5.4 Συμπεράσματα 124

6 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία **129**

6.1 Συμπεράσματα 129

6.2 Μελλοντική Εργασία 130

7 Βιβλιογραφία **131**

8 Παράρτημα **137**

8.1 Θεωρία 137

8.2 Προσδιορισμός Παραμέτρων - Επιπλέον Μέθοδοι 156

8.3 Hardware 163
8.4 Software 173

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1. Raibert Robot, [62]. 20

Σχήμα 1-2. Series – Elastic Actuation 21

Σχήμα 1-3. Ρομπότ με πόδια τελευταίας τεχνολογίας, [34]. (1) Boston Dynamics(BDI) SpotMini. (2) Penn/Ghost Robotics Minitaur. (3) ATRIAS. (4) RHex and Canid. (5) StarlETH. (6) BDI Spot. (7) MIT Cheetah. (8) BDI Atlas 24

Σχήμα 1-4. Διάφορες τοπολογίες ποδιών, [34]. 24

Σχήμα 1-5. HyQ τετράποδο ρομπότ με υδραυλική επενέργηση. 25

Σχήμα 1-6. MIT Cheetah [69] και UPenn/Goast Minitaur, [35]. 26

Σχήμα 2-1. (α) Διάγραμμα της μέγιστης ειδικής ροπής. (β) Διάγραμμα της θερμικής ειδικής σταθεράς ροπής σε συνάρτηση με την ακτίνα διακένου. 34

Σχήμα 2-2. Ο εσωτερικός κλειστός βρόχος ταχύτητας για τον έλεγχο της ροπής εξόδου στη SEA βοηθάει να ξεπεραστούν μη γραμμικά φαινόμενα και η τριβή, [92]. 36

Σχήμα 2-3. Σύστημα ελέγχου με SEA βασιζόμενο σε ταχύτητα, [66]. 36

Σχήμα 2-4. Σύγκριση των μεθόδων επενέργησης ως γνώμονα τις απαιτήσεις της εφαρμογής στην οποία συμμετέχουν. Dynamic Legged Robots (DLR), Human interaction robots (HRI), Industrial or Manufacturing Robots(IR), Quadrotors/Aerial robots(QAR) και wheeled robots(WR). Η ιδανική μέθοδος είναι αυτή που περικλείει το μεγαλύτερο εμβαδόν μέσα στο πολύγωνο. 38

Σχήμα 2-5. Η μεταβολή του εύρους ζώνης της μεθόδου επενέργησης σε συνάρτηση με την ακαμψία του ελατηρίου. Ως είσοδο δίνεται μεταβαλλόμενη ημιτονοειδής ροπή και μετριέται η έξοδος με αισθητήρα ροπής, [34]. 41

Σχήμα 2-6. (α) SEA, (β) Geared Motors, (γ) Quasi Direct-Drive και (δ) Direct-Drive 42

Σχήμα 3-1. Τυπικός τρι-φασικός κινητήρας χωρίς ψήκτρες. Ο κινητήρας αυτός είναι outrunner και μπορούμε να διακρίνουμε πολύ εύκολα τους μαγνήτες που είναι προσκολλημένοι πάνω στον δρομέα. Επίσης βλέπουμε τα πηνία στον στάτη που είναι σε συγκεντρωτική διάταξη με τις αντίστοιχες συνέπειες όπως θα δούμε παρακάτω. Τέλος ο αριθμός των μαγνητικών πόλων είναι 14 ενώ των πηνίων είναι 12 που είναι ένας από τους πιο κοινούς – σύνηθες συνδυασμούς, [9]. 46

Σχήμα 3-2. Τομή κινητήρα με τον δρομέα να περιστρέφεται εσωτερικά του στάτη με συγκεντρωτική κατανομή πηνίων. Κάθε πηνίο αρχίζει και τελειώνει στο ίδιο δόντι του στάτη. 47

Σχήμα 3-3. Τομή κινητήρα με το δρομέα να περιστρέφεται εσωτερικά του στάτη με διανεμημένη κατανομή των πηνίων. Κάθε πηνίο αρχίζει σε ένα δόντι και τελειώνει σε άλλο δόντι, [25]. Δεξιά απεικονίζεται ο κινητήρας από το MIT Cheetah. 47

Σχήμα 3-4. Τομή καλωδίου στον κινητήρα που αποτελείται από τον χαλκό, την μόνωση και το συνδετικό στρώμα, [25]. 48

Σχήμα 3-5. (α) Επιτρεπόμενο ρεύμα καθώς αυξάνει ο συντελεστής G του προτύπου AWG. (β) Αντίσταση καθώς αυξάνει ο συντελεστής G του προτύπου AWG. 49

Σχήμα 3-6. Σχεδίαση στάτη κινητήρα με πυρήνα ή χωρίς. 49

Σχήμα 3-7. Διάγραμμα που δείχνει πως η μαγνητική αντίσταση του σιδήρου αυξάνει πολύ μετά τα 2 Tesla και έχουμε το όριο του μαγνητικού κορεσμού, [31]. 51

Σχήμα 3-8. (α) Non – salient motor αφού οι μαγνήτες είναι στην επιφάνεια του δρομέα (Surface permanent magnet – SPM). (β) Salient motor αφού οι μαγνήτες είναι εμφυτευμένοι στον δρομέα (Interior permanent magnet – IPM), [72]. 51

Σχήμα 3-9. Απλό μαγνητικό κύκλωμα με ένα πηνίο και πυρήνα. Η επαγωγή είναι συνάρτηση της αντίστασης. Ισοδύναμα ισχύει και για το μαγνητικό κύκλωμα στον Η/Μ κινητήρα 52

Σχήμα 3-10. Η κλασική αρχή μία ρευματοφόρου αγωγού που της ασκείται δύναμη Lorentz από το μαγνητικό πεδίο (F=BIL). Η ίδια αρχή ισχύει στους Η/Μ κινητήρες. 54

Σχήμα 3-11. (α) Απλή γεωμετρία κινητήρα. Κάθε μαγνήτης καταλαμβάνει το ¼ του δρομέα. (β) Κινητήρας μετά τα πηνία και τις φάσεις. Αν ο χαρακτηριστικός αριθμός που ισούται με

τον αριθμό των πηνίων προς τον αριθμό των μόνιμων μαγνητών προς τον αριθμό των φάσεων δεν είναι ακέραιος τότε η ΑΗΕΔ δύναμη τείνει στην ημιτονοειδή..... 55

Σχήμα 3-12. (α) Η ΑΗΕΔ που αναπτύσσεται σε ένα κινητήρα με ακέραιο τον χαρακτηριστικό αριθμό που αναφέρουμε στο Σχήμα 3-11. (β) Η ΑΗΕΔ όταν είναι μη ακέραιος..... 55

Σχήμα 3-13. Πλήρες μοντελοποιημένο μαγνητικό κύκλωμα μεταξύ στάτη και δρομέα..... 56

Σχήμα 3-14. Τραπεζοειδής ή ημιτονοειδής ανάπτυξη ΑΗΕΔ, [12]..... 57

Σχήμα 3-15. Βασική γεωμετρία κινητήρα όπου το πάχος του δρομέα και του στάτη παραμένουν σταθερά ως προς την αύξηση της ακτίνας διακένου, [87]. 59

Σχήμα 3-16. Διάγραμμα για την σειρά κινητήρων της Emoteq, [87]. 59

Σχήμα 3-17. Κατασκευή στάτη κινητήρα. (α) Χωρίς cogging torque, (β) εμφάνιση έκτυπων πόλων και άρα cogging torque. 60

Σχήμα 3-18. Η μορφή της cogging torque σε έναν κινητήρα όπως του Σχήμα 3-17. 60

Σχήμα 3-19. Έξι χαρακτηριστικές φάσεις κινητήρα για τραπεζοειδή οδήγηση. Ο κινητήρας που απεικονίζεται είναι τετραπολικός αφού βλέπουμε να έχει 4 μαγνήτες. Αυτό σημαίνει ότι ανά μισή περιστροφή του δρομέα ολοκληρώνεται μία φορά το six step commutation, εφόσον ανά μισή περιστροφή οι μαγνήτες επαναλαμβάνονται. Αυτό το γεγονός φαίνεται και από την Εξ. (3-8). Ο κινητήρας T-motor U8 έχει 42 πόλους αρά μία ηλεκτρική περιστροφή επαναλαμβάνεται ανά 17.4 μηχανικές μοίρες..... 63

Σχήμα 3-20. Έξι χαρακτηριστικές για το πως φαίνεται η ροή του ρεύματος μέσα από δύο φάσεις και αφήνοντας μια φορά κάθε φάση ανενεργή. Χωρίς βλάβη της γενικότητας το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση της σύνδεση τριγώνου..... 64

Σχήμα 3-21. Ουσιαστικά το ρεύμα διαρρέει τον αγωγό και στα ηλεκτρόνια ασκείται δύναμη έχοντας μία καμπύλη τροχιά. Έτσι κάθετα στην ροή του ρεύματος εμφανίζεται τάση. 65

Σχήμα 3-22. Ο αισθητήρας Hall για να ενεργοποιηθεί χρειάζεται τροφοδοσία και να διαρρέεται από ρεύμα..... 65

Σχήμα 3-23. Τυπικό κύκλωμα για την χρήση ενός αισθητήρα Hall στο οποίο φαίνεται ότι διαρρέονται από ρεύμα I_{BIAS}. (α) Εδώ δεν υπάρχει κάποιο μαγνητικό πεδίο γι' αυτό η τάση εξόδου είναι μηδέν. (β) Ύπαρξη μαγνητικού πεδίου και ως εκ τούτου εμφανίζεται τάση στα άκρα του hall αισθητήρα, [1]..... 66

Σχήμα 3-24. Τοποθέτηση αισθητήρων Hall στον στάτη διπολικού κινητήρα χωρίς ψήκτρες για τραπεζοειδή οδήγηση. Ο κινητήρας είναι διπολικός και ως εκ τούτου οι αισθητήρες είναι και τοποθετημένοι ανά 120 ηλεκτρικές μοίρες αλλά και ανά 120 μηχανικές μοίρες, [47]. 66

Σχήμα 3-25. Κατά την επενέργηση κάθε φάσης, το ρεύμα που διαρρέει παρουσιάζει μεταβατική απόκριση. Με διακεκομμένη φαίνεται η ανάπτυξη της ΑΗΕΔ, [80]. 67

Σχήμα 3-26. Η μορφή της ροπής που παράγεται όταν το ρεύμα είναι ημιτονοειδούς μορφής ενώ η ΑΗΕΔ είναι τραπεζοειδούς μορφής, [80]. 67

Σχήμα 3-27. Τυπική μορφή τραπεζοειδούς ΑΗΕΔ και τροφοδοσίας ρεύματος. Παρατηρούμε ότι τα σημεία που μηδενίζεται η ΑΗΕΔ της φάσης που δεν επενεργείται, είναι σημεία που στηρίζεται η οδήγηση χωρίς αισθητήρα αφού πριν και μετά από αυτά, υπάρχει περιθώριο + και – 30 ηλεκτρικών μοιρών για την αλλαγή σε μία από τις 6 πιθανές καταστάσεις. . 68

Σχήμα 3-28. Τρία ημιτονοειδή κύματα για την οδήγηση ενός κινητήρα χωρίς ψήκτρες, [44]. 68

Σχήμα 3-29. Τα φυσικά στοιχεία που αποτελείται κάθε φάση του κινητήρα..... 69

Σχήμα 3-30. Σχηματική αναπαράσταση φασιδείκτων όπου το πραγματικό μέρος αντιστοιχεί στο φυσικό μέγεθος. 70

Σχήμα 3-31. Διανυσματικό διάγραμμα φασιδείκτων σύγχρονου κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες..... 71

Σχήμα 3-32. Προβολή πάνω στο επίπεδο «αβ» που προκύπτει από τον μετασχηματισμό Clark αλλά και το σύστημα συντεταγμένων «dq» που προκύπτει από τον μετασχηματισμό Park. Παρατηρούμε ότι ο direct άξονας είναι στην διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου – διεύθυνση των μαγνητών και ο quadrature (κάθετος) άξονας είναι στραμμένος κατά 90

ηλεκτρικές μοίρες. Επειδή ο κινητήρας είναι διπολικός οι μηχανικές με τις ηλεκτρικές μοίρες ταυτίζονται. 72

Σχήμα 3-33. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες, [50]. 73

Σχήμα 3-34. (α) Κλασική περιοχή λειτουργίας σύγχρονου κινητήρα με κλειδωμένη ταχύτητα περιστροφής στην συχνότητα τροφοδοσίας. (β) Περιοχή λειτουργίας σύγχρονου κινητήρα με ειδικές διατάξεις οδήγησης να παρέχουν μεγάλο εύρος συχνοτήτων τροφοδοσίας. 74

Σχήμα 3-35. Τα δύο διανύσματα που εκφράζουν την διεύθυνση των μαγνητικών πεδίων των πηνίων του στάτη και των μόνιμων μαγνητών του δρομέα εν γένει διαφέρουν κατά γωνία δ, [79]. 75

Σχήμα 3-36. Όταν το μαγνητικό πεδίο του στάτη είναι κάθετο στο μαγνητικό πεδίο από τους μόνιμους μαγνήτες τότε παράγεται η μέγιστη ροπή. 75

Σχήμα 3-37. Η δύναμη που δημιουργείται είναι το όταν τα μαγνητικά πεδία δεν είναι κάθετα. Η συνισταμένη δύναμη αναλύεται σε δύναμη κάθετη και σε δύναμη προς τα έξω φυγοκεντρική. 76

Σχήμα 3-38. Τα διανυσματικά διαγράμματα των ηλεκτρομηχανικών μεγεθών του κινητήρα. (α) Το ρεύμα που αναπτύσσεται βρίσκεται σε διαφορά φάσης από το διάνυσμα της αντί - ηλεκτρικής δύναμης. (β) Το διάνυσμα του ρεύματος βρίσκεται στην ίδια φάση με την αντί - ηλεκτρική δύναμη και ως εκ τούτου παράγεται μέγιστη ροπή. Από τα δύο σχήματα παρατηρούμε ότι για το ίδιο ποσό ροπής, η συνιστώσα i_q είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις το συνολικό ποσό ρεύματος στην (α) περίπτωση είναι μεγαλύτερο αυξάνοντας της ωμικές απώλειες. 76

Σχήμα 3-39. (α) Τυπικό δομικό διάγραμμα εφαρμογής του ελέγχου πεδίου. (β) Τα PWM generators παράγει το κατάλληλο σήμα προκειμένου το ρεύμα στον άξονα Iq να γίνει μέγιστο και το ρεύμα Id να μηδενιστεί, [63]. 78

Σχήμα 4-1. Κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια της διπλωματικής μου. Είναι της εταιρείας Tiger-Motors μοντέλο U8 KV135 και στον οποίο φαίνονται ευδιάκριτα τα καλώδια για τις 3 φάσεις του κινητήρα και τα πηνία στον ακίνητο στάτη. 81

Σχήμα 4-2. Στρέφουμε τον κινητήρα αφού έχουμε συνδέσει την μία φάση στον θετικό πόλο της τροφοδοσίας και τις άλλες δύο φάσεις στον αρνητικό πόλο της τροφοδοσίας. Καθώς γυρνάμε τον δρομέα προκύπτουν ευσταθείς θέσεις αφού ανάλογα με την φόρτιση των πηνίων έχουν μαγνητιστεί και το ο αντίστοιχος πόλος από τον δρομέα έλκεται και κλειδώνει, [48]. 82

Σχήμα 4-3. Όταν συνδέουμε την μία φάση στον θετικό πόλο και τις άλλες δύο φάσεις στον αρνητικό πόλο, το ρεύμα διαρρέει τις φάσεις. Η μορφοποίηση των φάσεων είναι σε σύνδεση τριγώνου. 82

Σχήμα 4-4. Απλή μορφή κινητήρα. Οι μόνιμοι μαγνήτες του δρομέα και ιδιαίτερα ο νότιος πόλος κλειδώνει πάνω από τον βόρειο πόλο στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που έχει διαμορφωθεί. Έτσι κάθε φορά που γυρνάμε τον κινητήρα με το χέρι κάθε νότιος πόλος πάει και ευθυγραμμίζεται με τον βόρειο πόλο της φάσης, ... 83

Σχήμα 4-5. Η ανάπτυξη της ΑΗΕΔ στον κινητήρα. Παρατηρούμε πως η μορφή της είναι ημιτονοειδής και από την τιμή της συχνότητας και τη πραγματική μηχανική ταχύτητα μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των πόλων. 84

Σχήμα 4-6. Kelvin Sensing ή 4 terminal measurement στο οποίο δεν λαμβάνεται υπόψιν η αντίσταση των καλωδίων του μετρητικού οργάνου 85

Σχήμα 4-7. Μέτρηση της αντίστασης του κινητήρα μέσω του RLC meter. Φαίνονται τα καλώδια για το 4 terminal measurement. 85

Σχήμα 4-8. Ο ελεγκτής από την εταιρεία Texas – Instruments [77] με τον οποίο έγινε η ταυτοποίηση των μηχανικών και ηλεκτρικών παραμέτρων του κινητήρα. 88

Σχήμα 4-9. Σύνδεση μηχανών προκειμένου να μετρήσουμε την ΑΗΕΔ της μηχανής δεξιά, που εργάζεται ως γεννήτρια. 89

Σχήμα 4-10. Σύνδεση μηχανών χωρίς άξονα. Προτιμήσαμε όμως να κάνουμε την σύνδεση του Σχ. 4-12, προκειμένου να μειώσουμε φαινόμενα ηλεκτρικού θορύβου. 90

Σχήμα 4-11. Τρόπος με τον οποίο συνδέσαμε τους ακροδέκτες του παλμογράφου με τους ακροδέκτες του κινητήρα. Ουσιαστικά μέτρηση ανά δύο ακροδέκτες, επειδή ο κινητήρας είναι σε σύνδεση τριγώνου αντιστοιχεί σε μέτρησης φάσης..... 90

Σχήμα 4-12. ΑΗΕΔ του κινητήρα. Παρατηρούμε ότι είναι ημιτονοειδούς μορφής. Η συχνότητά της ταυτίζεται με την ηλεκτρική συχνότητα, που ισούται με την μηχανική συχνότητα περιστροφής του κινητήρα επί τον αριθμό των πόλων του κινητήρα..... 91

Σχήμα 4-13. Όταν η μηχανή εργάζεται ως γεννήτρια σε σύνδεση τριγώνου..... 91

Σχήμα 4-14. Η ΑΗΕΔ του κινητήρα για 600rpm. Φαίνεται ότι το πλάτος της είναι 6.15Volt και άρα ο λόγος του πλάτους προς την ταχύτητας μας δίνει τη σταθερά ταχύτητας του κινητήρα. 93

Σχήμα 4-15. Γενική διάταξη μέτρησης της ΑΗΕΔ. 93

Σχήμα 4-16. Διάταξη προκειμένου να βρούμε την στατική ροπή του κινητήρα. 94

Σχήμα 4-17. Διάταξη με τον κινητήρα σε ύψος προκειμένου να μετρήσουμε ροπή αδράνειας και τον συντελεστή ιξώδους τριβής. 95

Σχήμα 4-18. Ανάπτυξη δυνάμεων στον κινητήρα και στην μάζα. 96

Σχήμα 4-19. Απόκριση ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για τον κινητήρα U8KV100 για δύο διαφορετικά βάρη. 98

Σχήμα 4-20. Απόκριση ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για τον κινητήρα U8KV135 για δύο διαφορετικά βάρη. 98

Σχήμα 4-21. Η ροπή αναφοράς στον κινητήρα. Αυτή σε συνδυασμό με την ταχύτητα που μετράει από την ανατροφοδότηση και την εξίσωση κίνησης προκύπτει η ροπή αδράνειας και η τριβή εξόδους του κινητήρα, [78]..... 99

Σχήμα 4-22. Προφίλ ταχύτητας του κινητήρα, [78]..... 99

Σχήμα 4-23. Θερμικό κύκλωμα κατά την μεταβατική περίοδο όπου η θερμοκρασία του κινητήρα αυξάνει. Θερμικό κύκλωμα κατά την θερμική ισορροπία του συστήματος. 101

Σχήμα 4-24. Θερμικό κύκλωμα κατά την θερμική ισορροπία του συστήματος..... 102

Σχήμα 4-25. (α) Γραμμικός γράφος θερμικού συστήματος. (β) Κανονικό δέντρο και δεσμοί (γ) Κανονικό δέντρο. (δ) Δεσμοί. 102

Σχήμα 4-26. Απόκριση της θερμικού συστήματος του κινητήρα. 104

Σχήμα 4-27. (α) Θερμική Κάμερα FLIR E300. (β) Texas Instruments DRV8301 - 69M Kit. (γ) Ψηφιακό πολύμετρο FLUKE 189 με θερμοστοιχείο. (δ) Θερμοστοιχείο type K εταιρείας FLUKE. 104

Σχήμα 4-28. Διάταξη πειράματος στο οποίο φαίνονται η θερμική κάμερα, το πολύμετρο με το θερμοστοιχείο στα πηνία του κινητήρα, ο κινητήρας και το board για την οδήγηση του κινητήρα. Μέσω του μοχλού που έβρισκε αντίσταση στο γραφείο που φαίνονται στην εικόνα προκαλούσαμε σφάλμα θέσης στον κινητήρα και αυτός με την σειρά του ασκούσε ροπή τραβώντας το μέγιστο ρεύμα που επιλέγεται στις ρυθμίσεις. 105

Σχήμα 4-29. Απόκριση θερμοκρασίας τυλιγμάτων κινητήρα U8KV100 107

Σχήμα 4-30. Απόκριση θερμοκρασίας τυλιγμάτων κινητήρα U8KV135 107

Σχήμα 4-31. Καμπύλες θερμοκρασιακής απόκρισης με βάση τις οποίες προέκυψε το θεωρητικό θερμικό μοντέλο του κινητήρα U8KV100. 108

Σχήμα 4-32. Καμπύλες επαλήθευσης θεωρητικού μοντέλου και πειράματος στον κινητήρα U8KV100. 108

Σχήμα 4-33. Καμπύλες θερμοκρασιακής απόκρισης με βάση τις οποίες προέκυψε το θεωρητικό θερμικό μοντέλο του κινητήρα U8KV135. 109

Σχήμα 4-34. Καμπύλες επαλήθευσης θεωρητικού μοντέλου και πειράματος στον κινητήρα U8KV135. 109

Σχήμα 4-35. Χρήση της FLIR E300 infrared θερμικής κάμερας προκειμένου να κάνουμε θερμική ανάλυση του κινητήρα. (α) Θερμική εικόνα του κινητήρα στην οποία βλέπουμε τα πηνία έχουν διαφορετική θερμοκρασία από φάση σε φάση αλλά και στην ίδια την φάση. (β)

Θερμική εικόνα από το board. Παρατηρούμε ότι τα mosfets συγκεκριμένης φάσης έχουν την υψηλότερη θερμοκρασία..... 111

Σχήμα 4-36. Θερμική εικόνα της διάταξης του θερμικού συστήματος. Η δεξιά εικόνα περιλαμβάνει διαμερισμό της εικόνας σε τρία θερμικά επίπεδα..... 111

Σχήμα 4-37. Από την θερμοκρασιακή διαφορά μπορούμε να παρατηρήσουμε την διάταξη των πηνίων στον στάτη. 112

Σχήμα 5-1. Διάφορες παραλλαγές ποδιών..... 113

Σχήμα 5-2. Ο μηχανισμός του ποδιού του τετράποδου ρομπότ Laelaps του εργαστηρίου ρομποτικής ΕΜΠ. Φαίνονται χαρακτηριστικά τα υλικά αλουμινίου και ανθρακονήματος στις αρθρώσεις και στους συνδέσμους αντίστοιχα. 115

Σχήμα 5-3. Μονόποδα ρομπότ με δύο συνδέσμους για κατακόρυφη κίνηση και επενέργηση απευθείας οδήγησης. 116

Σχήμα 5-4. Τρία επίπεδα κίνησης ενός ρομπότ με πόδια, [13]. 117

Σχήμα 5-5. Μονόποδα ρομπότ με δύο συνδέσμους για κατακόρυφη κίνηση και επενέργηση με απευθείας οδήγηση. 118

Σχήμα 5-6. Έλεγχος θέσης PD στις επενεργούμενες αρθρώσεις. 121

Σχήμα 5-7. Η χειρότερη από άποψη απαιτήσεων ροπή που θα πρέπει να αναπτυχθεί στις αρθρώσεις προκειμένου να μπορούν οι κινητήρες να σηκώσουν το βάρος του ρομπότ. 122

Σχήμα 5-8. Το φορτίο αναπτύσσεται πάνω στο δοκό προκαλώντας καμπτική καταπόνηση..... 123

Σχήμα 5-9. Μελέτη αντοχής του ανθρακονήματος με όριο διαρροής τα 120 MPa και μήκος 15cm, για διάφορα βάρη..... 124

Σχήμα 5-10. Το πόδι ισορροπεί σε αυτή την θέση 60 μοίρες για το ισχίο και 85 για το γόνατο. 125

Σχήμα 5-11. Ανάπτυξη ροπών στις δύο αρθρώσεις. 126

Σχήμα 5-12. Το μονόποδο ρομπότ με αυτή τα κατασκευαστικά μεγέθη έχει την δυνατότητα να ανέβει και να σηκώσει το βάρος του 1Kg που ζυγίζει το σώμα. 126

Σχήμα 5-13. Ανάπτυξη ροπών στις δύο αρθρώσεις κατά την άνοδο του ποδιού από την χαμηλή στην υψηλή θέση. 127

Σχήμα 8-1. (α) Τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων. (β) Προβολή στο επίπεδο του συστήματος συντεταγμένων μετά τον μετασχηματισμό Clark & Park, [14]..... 137

Σχήμα 8-2. Κινητήρας σύγχρονος με δύο μόνιμους μαγνήτες, δηλαδή η πιο απλή περίπτωση κινητήρα και το σταθερό τρισδιάστατο σύστημα αξόνων όπου προβάλλεται στο επίπεδο και κάθε άξονας αντιστοιχεί σε κάθε ακροδέκτη του τριφασικού συστήματος. (α) Κινητήρας με σύνδεση αστέρα. (β) Κινητήρας με σύνδεση τριγώνου. 138

Σχήμα 8-3. Κάτοψη πάνω στο επίπεδο αβ που προκύπτει με την μετατροπή Clark. Το ίδιο διάνυσμα αναλύεται στα σε δύο επιμέρους συνιστώσες πλέον που είναι μεγαλύτερες σε μέγεθος από τις επιμέρους συνιστώσες του τρισδιάστατου σταθερού συστήματος συντεταγμένων «abc. 139

Σχήμα 8-4. Προβολή πάνω στο επίπεδο «αβ» που προκύπτει από τον μετασχηματισμό Clark αλλά και το σύστημα συντεταγμένων «dq» που προκύπτει από τον μετασχηματισμό Park. Παρατηρούμε ότι ο direct άξονας είναι στην διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου – διεύθυνση των μαγνητών και ο quadrature (κάθετος) άξονας είναι στραμμένος κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες. Επειδή ο κινητήρας είναι διπολικός οι μηχανικές με τις ηλεκτρικές μοίρες ταυτίζονται..... 141

Σχήμα 8-5. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες, [50]..... 144

Σχήμα 8-6. Συγκεκριμένη είσοδο (ροπής, ταχύτητας, θέσης για μηχανικό σύστημα) και μετρώντας την έξοδο βρίσκουμε το εύρος ζώνης..... 146

Σχήμα 8-7. Απεικόνιση λογικής Virtual Leg Compliance, [3]. 146

Σχήμα 8-8. Ροή απωλειών ενέργειας σε ένα σύστημα που περιλαμβάνει τροφοδοσία, ελεγκτή, κινητήρα, κιβώτιο, [42]. 148

Σχήμα 8-9. Οι απώλειες σιδήρου περιλαμβάνουν διάφορες επιμέρους απώλειες, [41]..... 149

Σχήμα 8-10. Χαρακτηριστικές περιοχές λειτουργίας του κινητήρα, [40]..... 150

Σχήμα 8-11. Θερμικό κύκλωμα κατά την μεταβατική περίοδο όπου η θερμοκρασία του κινητήρα αυξάνει. Θερμικό κύκλωμα κατά την θερμική ισορροπία του συστήματος..... 151

Σχήμα 8-12. Θερμικό κύκλωμα κατά την θερμική ισορροπία του συστήματος..... 151

Σχήμα 8-13. Μεταβολή της θερμικής αντίστασης από τον στάτη προς το περιβάλλον σε συνάρτηση με τον τρόπο πρόσδεσης και την εφαρμογή του κινητήρα. 152

Σχήμα 8-14. (α) Μοντελοποίηση ως σύστημα πρώτης τάξης, [42]. (β) Απόκριση της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων T_W. Θεωρούμε η υπερφόρτωση του κινητήρα με υπέρμετρο ρεύμα γίνεται πολύ γρήγορα και αυτό οδηγεί σε απόκριση συστήματος 1^{ης} τάξης, το κομμάτι του θερμικού κυκλώματος από τον δρομέα στο περιβάλλον να παραμένει ανεπηρέαστο και σε σταθερή θερμοκρασία, [42]. 154

Σχήμα 8-15. Επενέργηση των φάσεων ενός κινητήρα χωρίς ψήκτρες για ευθυγράμμιση του direct/quadrature άξονα με μία από τις φάσεις του, εν προκειμένου της φάσης A, [48]. 157

Σχήμα 8-16. Το ηλεκτρικό κύκλωμα του κινητήρα για διάταξη αστέρα. (α) Έχουμε ευθυγράμμιση του direct άξονα με την A φάση. (β) Ευθυγράμμιση μετά από 90 ηλεκτρικές μοίρες με τον quadrature άξονα. 157

Σχήμα 8-17. Το ηλεκτρικό κύκλωμα του κινητήρα για διάταξη τριγώνου. (α) Έχουμε ευθυγράμμιση του direct άξονα με την A φάση. (β) Ευθυγράμμιση μετά από 90 ηλεκτρικές μοίρες με τον quadrature άξονα. 158

Σχήμα 8-18. (α) Συνδεσμολογία αστέρα με αντιστάσεις. (β) Η γείωση από το τους ακροδέκτες τοποθετείται στον κοινό κόμβο της σύνδεσης..... 159

Σχήμα 8-19. Το κέντρο βάρος της δοκού υπολογισμένο στο CAD Solidworks. 160

Σχήμα 8-20. Διάγραμμα δυνάμεων και ροπών κατά την ισορροπία στο πείραμα με τα βαράκια.... 161

Σχήμα 8-21. Στο πείραμα αυτό μετρήθηκε η ροπή εξόδου του κινητήρα σε συνάρτηση με το ρεύμα. Παρατηρούμε την γραμμική συμπεριφορά του κινητήρα. Φυσικά στην μέτρηση της ροπής εδώ συμπεριλαμβάνονται και οι στατικές τριβές. 162

Σχήμα 8-22. Πειραματική διάταξη ροπής μέσω ζυγαριάς. 162

Σχήμα 8-23. Πειραματική διάταξη ροπής με την χρήση βαριδιών. 163

Σχήμα 8-24. Στη μέση της εικόνας είναι το διαφορικό σήμα που εξέρχεται από τον encoder και τα έξι κανάλια. Τα σήματα αυτά, σε περίπτωση που χρειαζόμαστε μονά σήματα και όχι διαφορικά περνούν από το line receiver, αποσβένοντας τον ηλεκτρικό θόρυβο, [39]. 163

Σχήμα 8-25. Εικόνα από το σήμα του encoder χρησιμοποιώντας τον ψηφιακό παλμογράφο digital analyzer. 164

Σχήμα 8-26. Εικόνα από το σήμα του encoder μετά το line receiver χρησιμοποιώντας τον ψηφιακό παλμογράφο digital analyzer. 164

Σχήμα 8-27. Ο encoder HEDL 5640 A13 προσδεμένος στον κινητήρα για καταγραφή της θέσης του δρομέα. Η βάση στην οποία στηρίζεται ο κινητήρας είναι φτιαγμένη στον 3D printer του εργαστηρίου. 165

Σχήμα 8-28. Άξονας ο οποίος συναρμολογείται στο πίσω μέρος του κινητήρα και στρέφει το εσωτερικό του encoder. 165

Σχήμα 8-29. Λογικό διάγραμμα line receiver. 166

Σχήμα 8-30. Κύκλωμα για εφαρμογή του line receiver και μετατροπή του διαφορικού σήματος σε μονό. Βλέπουμε την έξοδο του encoder δεξιά, τον line receiver στο κέντρο και αριστερά την έξοδο του σήματος η οποία καταλήγει στο board. 166

Σχήμα 8-31. Το κύκλωμα του line receiver όπως φαίνεται στην άνοψη. Φαίνεται ότι τοποθετούμε αντιστάσεις μεταξύ θετικού και αρνητικού σήματος του encoder για καλύτερη απόδοση και μείωση θορύβου. 167

Σχήμα 8-32. Τα καλώδια από την έξοδο του line receiver συνδέονται με το board της TI..... 167

Σχήμα 8-33. Εσωτερική διάταξη των στοιχείων του ESC..... 168
Σχήμα 8-34. Προκειμένου να ανοίξουν τα mosfets πρέπει οι ακροδέκτες να έχουν μία συγκεκριμένη διαφορά τάσης. 168
Σχήμα 8-35. Το ρεύμα διαρρέει από το A στο B αφού πρώτα διαπεράσει μέσα από τις αντίστοιχες φάσεις του κινητήρα, [18]..... 168
Σχήμα 8-36. ESC T-motor AIR 40Amps, [74]..... 169
Σχήμα 8-37. Στην εικόνα αυτή έχουμε την διάταξη για την λειτουργία του κινητήρα T-motor U8.... 170
Σχήμα 8-38. Σύγκριση της θερμοκρασίας μεταξύ της θερμικής κάμερας με την θερμοκρασία από το θερμοστοιχείο που είναι προσδεμένο στα πηνία του στάτη για σωστή ρύθμιση της πρώτης. 172

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1. Σύγκριση διαφόρων ρομπότ με πόδια 34
Πίνακας 2-2. Εύρος ζώνης μεθόδων επενέργησης στον κινητήρα T-motor U10, [34]. 42
Πίνακας 3-1. Σύγκριση μεταξύ των δύο μηχανών, [80]. 62
Πίνακας 3-2. Σχέσεις ιδανικών στοιχείων 65
Πίνακας 4-1. Η αντίσταση των κινητήρων T-motor μέσω του RLC Meter. 86
Πίνακας 4-2. Η αυτεπαγωγή των κινητήρων T-motor μέσω του RLC Meter 86
Πίνακας 4-3. Η αντίσταση των κινητήρων T-motor μέσω του DRV8301 – 69M 87
Πίνακας 4-4. Η αυτεπαγωγή των κινητήρων T-motor μέσω του DRV8301 – 69M 87
Πίνακας 4-5. Σταθερά ταχύτητα φάσης. 92
Πίνακας 4-6. Σταθερά ροπής κινητήρα. 92
Πίνακας 4-7. Μέγιστη στατική ροπή κινητήρα. 95
Πίνακας 4-8. Ροπή αδράνειας κινητήρων. 97
Πίνακας 4-9. Τριβή Ιξώδους κινητήρα 97
Πίνακας 4-10. Ροπή αδράνειας κινητήρα μέσω του board της TI. 100
Πίνακας 4-11. Τριβή ιξώδους κινητήρα μέσω του board της TI. 100
Πίνακας 4-12. Μέγιστη θερμοκρασία του κινητήρα ως προς ρεύμα Iq. 106
Πίνακας 4-13. Τιμές πόλων του θερμικού μοντέλου των κινητήρων. 108
Πίνακας 4-14. Τιμές χρονικών σταθερών του θερμικού μοντέλου των κινητήρων. 109
Πίνακας 4-15. Συντελεστές θερμικού μοντέλου. 110
Πίνακας 5-1. Υλικά για τη μοντελοποίηση των δομικών τμημάτων του ρομπότ, [13]. 114
Πίνακας 5-2. Κατασκευαστικές και Λειτουργικές παράμετροι κινητήρων 121
Πίνακας 5-3. Μέγιστη συνεχής Η/Μ ροπή κινητήρων. 122
Πίνακας 5-4. Μέγιστη συνεχής ροπή εξόδου κινητήρων. 122
Πίνακας 5-5. Κατασκευαστικές παράμετροι του ποδιού. 127
Πίνακας 8-1. Χρόνος και συντελεστής υπερφόρτωσης του κινητήρα ως προς ρεύμα. 154
Πίνακας 8-2. Σταθερά ροπής κινητήρα (Μέθοδος $2^η$ – $3^η$). 161

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός των ρομπότ με πόδια φυσικά δεν είναι απλά να κατασκευαστούν για μία συγκεκριμένη αποστολή αλλά να μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα με τις μη μοντελοποιημένες προκλήσεις που θα εμφανιστούν και απαιτείται να ξεπεραστούν με επιτυχία. Ως εκ τούτου, προκειμένου να γίνει αυτό, θα πρέπει να ρυθμίζεται αυτόματα η ενδοτικότητα τους και η αλληλεπίδρασή τους με το έδαφος αφού διαφορετικές απαιτήσεις έχει το βάδισμα ενός ρομπότ πάνω στον πάγο που θεωρείται σκληρός και με μηδαμινή τριβή, και διαφορετικές μέσα σε στο χώμα που είναι πιο μαλακό και έχουμε μεγαλύτερη τριβή. Έτσι δεν απαιτείται από τον μηχανισμό να γίνεται μόνο έλεγχος θέσης των αρθρώσεων αλλά και έλεγχος δύναμης όπως στην τεχνολογία των haptics. Ένας τρόπος για να γίνει αυτός ο έλεγχος δύναμης είναι αν προσπαθήσουμε να θεωρήσουμε το πόδι ως ένα εικονικό ελατήριο με αποσβεστήρα που θα συνδέει το ισχίο με το πέλμα και όπου μεταβάλλονται οι σταθερές του ελατηρίου και του αποσβεστήρα ανάλογα με την περίπτωση. Αυτό απαιτεί ιδιότητες όπως χαμηλή αντίσταση κατά την μεταφορά της δύναμη από το έδαφος στις αρθρώσεις (**low mechanical impedance** ή **high force transparency**) που συνεπάγεται μηχανισμούς που το επιτρέπουν με χαμηλή αδράνεια και τριβή. Επίσης σημαντικό ως προς αυτό είναι και ο μηχανισμός επενέργησης που εφαρμόζεται στο πόδι του ρομπότ. Έτσι ένα από τα στοιχεία που επιθυμεί να καλύψει αυτή η εργασία είναι να μελετήσει ποιοτικά ποιες πρέπει να είναι οι προδιαγραφές που πρέπει να έχει ο σχεδιασμός του ποδιού αλλά και της επενέργησής του και να συγκρίνει ποιοτικά τις διάφορες υπάρχουσες μεθόδους επενέργησης με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών.

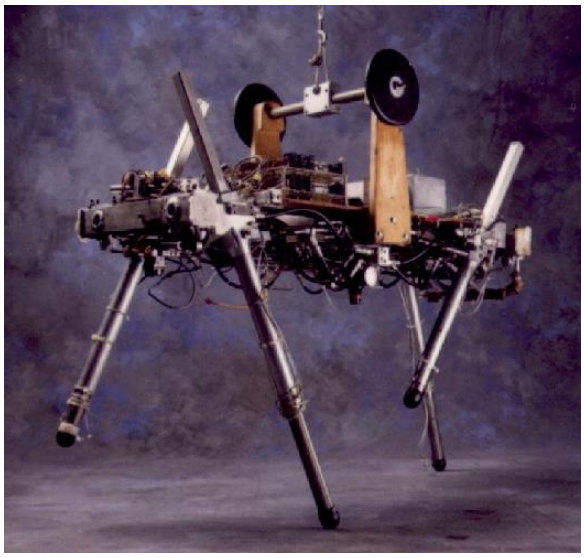
Λόγω των παραπάνω, τα τελευταία χρόνια η επιστημονική κοινότητα προσπαθεί να εδραιώσει μηχανισμούς όπου τα στοιχεία μετάδοσης εκλείπουν και προτιμώνται μηχανισμοί απευθείας οδήγησης, [35]. Όμως προκειμένου να γίνει αυτό με επιτυχία, χρειάζονται κινητήρες που έχουν μεγάλη σχέση ροπής – μάζας (ειδική ροπή). Μία κατηγορία αυτών είναι οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες που ο δρομέας περιστρέφεται εξωτερικά **(outrunners motors).** Η θεωρία πάνω στην κατασκευή και τη λειτουργία των κινητήρων χωρίς ψήκτρες είναι πολύ μεγάλη και υπάρχουν βιβλία που ειδικεύονται πάνω σε αυτή, [25], [31]. Η παρούσα εργασία σκοπεύει στη βασική ανάλυση των κινητήρων αυτών χωρίζοντάς τους σε δύο μεγάλες κατηγορίες, **κινητήρες σταθερού ρεύματος χωρίς ψήκτρες, brushless direct current motors και σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες, permanent magnets synchronous motor (BLDC motors & PMS motors)**. Ακολούθως αναλύει τους τρόπους οδήγησης καθώς και τις διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιούνται προκειμένου να γίνει ταυτοποίηση των ηλεκτρικών, μηχανικών και θερμικών παραμέτρων αυτών.

Τέλος η συγκεκριμένη μέθοδος επενέργησης – απευθείας οδήγησης - δεν βασίζεται όπως αναφέραμε σε κάποιο μηχανισμό μείωσης για αύξηση της ροπής, αλλά στηρίζεται στις δυνατότητες των κινητήρων και μόνο. Παρόλο λοιπόν που η ροπή τους είναι μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικών κινητήρων όπου ο δρομέας περιστρέφεται εσωτερικά, είναι εύλογο ότι πρέπει να εξετάσουμε μέσω προσομοίωσης, αφού πρώτα έχει μοντελοποιηθεί η δυναμική και έχουν βρεθεί οι παράμετροι του κινητήρα, τα σχετικά μεγέθη ενός ρομποτικού ποδιού και τα οποία αφορούν το βάρος που θα μπορεί να σηκώνει και τα μήκη των συνδέσμων.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση – Ιστορική αναδρομή

Τα τελευταία χρόνια μεγάλο μέρος της επιστημονικής κοινότητα έχει εστιάσει στις δυνατότητες που προσφέρονται από την κατασκευή ρομπότ με πόδια. Αρχικά περίπου το 50% της επιφάνειας της γης είναι αδύνατο να προσεγγιστεί από τροχοφόρα μηχανήματα ή μηχανήματα με ερπύστριες. Οι άνθρωποι και τα ζώα εμφανίζουν αυτή τη δυνατότητα καθώς τα πόδια προσφέρουν την ευκολία για αναρριχήσεις να υπερπήδηση εμποδίων και όντας αρχικά ακίνητα αλλά και εν κινήσει. Έτσι είναι επιθυμητό και για τα ρομπότ να εμφανίσουν αυτή την δυνατότητα. Ρομπότ εμπνευσμένα από την φύση (bioinspired) όπως τα τετράποδα ρομπότ, προσφέρουν αυξημένη δυνατότητα ευκινησίας και ως εκ τούτου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές όπως για παράδειγμα στις διασώσεις σε πυρκαγιά ή σε εξερευνήσεις σε μονοπάτια, εφαρμογές που μπορούν να χαρακτηριστούν ως υψηλού κινδύνου για τον άνθρωπο.

Ένα από τα πρώτα τετράποδα ρομπότ που κατασκευάστηκε ήταν από τον M. Raibert που κατασκεύασε το ρομπότ Quadruped το 1990, το οποίο μπορούσε αποδοτικά να κάνει διάφορες μετακινήσεις και βαδίσματα ανάλογα των τετράποδων ζώων, [62]. Το συγκεκριμένο ρομπότ είχε ως επενεργητές υδραυλικούς κινητήρες οι οποίοι παρόλο που έχουν το πλεονέκτημα της μεγάλης ροπής χωρίς την χρήση μειωτήρα έχουν το μειονέκτημα του μεγαλύτερου βάρους λόγω του υδραυλικού τροφοδοτικού κ.λ.π. Παρακάτω θα δούμε πως και σήμερα υπάρχουν ρομπότ με υδραυλικούς επενεργητές, [68].



Σχήμα 1-1. Raibert Robot, [62].

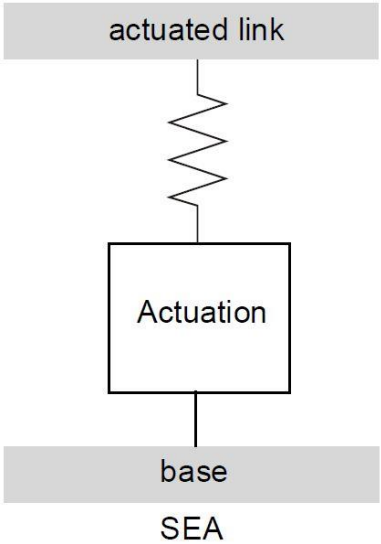
Στην συνέχεια ήρθαν στο προσκήνιο κι άλλα τετράποδα ρομπότ ηλεκτρομηχανικά επενεργούμενα. Αυτού του είδους οι κινητήρες, επειδή είναι κατά βάση πολύστροφοι και προσφέρουν ταχύτητα σε αντίθεση με ροπή, έπρεπε να συνοδευτούν με στοιχεία μείωσης της ταχύτητας και αύξησης της ροπής, όπως μειωτήρες, ιμάντες κίνησης, ή harmonics drives. Ενώ όμως η ροπή αυξήθηκε κατά πολύ, με τους μηχανισμούς αυτούς εισήχθησαν μη γραμμικά φαινόμενα τριβής καθώς και φαινόμενα όπως η χάρη οδοντών (backlash) τα οποία είχαν ως αποτέλεσμα να αυξηθεί πολύ η μηχανική αντίσταση [81] και να μειωθεί δραστικά το back drivebility του μηχανισμού. Έτσι είχαμε και το πρώτο σχεδιαστικό trade-off μεταξύ της παραγόμενης ροπής και του back drivebility. Άλλο ένα πρόβλημα που παρουσίασε η χρήση των μειωτήρων είναι το γεγονός πως υποφέρουν από κρουστικά φαινόμενα.

Έτσι ο παραπάνω μηχανισμός επενέργησης εμφάνιζε σημαντικά μειονεκτήματα, αφού τα τετράποδα ρομπότ θα πρέπει όταν αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον να εμφανίζουν κάποια ενδοτικότητα. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί είτε με παθητικά στοιχεία είτε με ενεργητικά στοιχεία [36], [87]. Ενώ όμως τα παθητικά στοιχεία [21], [67] είναι καλά προκειμένου να προστατεύσουν τα στοιχεία μετάδοσης, εμφανίζουν μειονεκτήματα όπως.

1. Χαμηλό εύρος ζώνης στους επενεργητές
2. Κατάλληλο για μία συγκεκριμένη μόνο εφαρμογή χωρίς μεγάλη προσαρμοστικότητα [32]
3. Απαιτούν πολύπλοκους μηχανισμούς για μεταβλητή μετάδοση κίνησης [32]
4. Παρουσιάζουν προβλήματα στον έλεγχο επειδή υπάρχουν φαινόμενα μη γραμμικά [22], [64]

Έτσι η επιστημονική κοινότητα έπρεπε να χρησιμοποιήσει ιδέες από άλλα επιστημονικά πεδία όπως τα haptics – PHANTOM [38], ελέγχοντας ενεργά τις ροπές στις αρθρώσεις με τέτοιο τρόπο ώστε να επηρεάζεται ενδοτικότητα του ρομπότ ως σύνολο από την αλληλεπίδραση του τελικού σημείου δράσης με το έδαφος, [38]. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι για να ελεγχθεί ενεργά η ενδοτικότητα του τελικού σημείου δράσης (Impedance control [27]), όπως για παράδειγμα μέσω του operational space control ή μέσω του ελέγχου εικονικού μοντέλου (Virtual Model Control), [58]. Το Virtual Model Control είναι βασισμένο στον έλεγχο δύναμης μέσω του οποίου μέσω των επενεργητών μιμούμαστε την συμπεριφορά του ελατηρίου και του αποσβεστήρα, [58].

Ένα αξιόπιστο όμως Virtual model control που αντιδρά γρήγορα σε διαταραχές (ms) απαιτεί σίγουρα υψηλό εύρος ζώνης από το σύστημα επενέργησης, μεγάλη ακρίβεια, αίσθηση της δύναμης κατά την επαφή και έλεγχο. Μία πρώτη προσέγγιση για να πετύχει κάποιος αυτού του είδους έλεγχο δύναμης είναι να τοποθετήσει αισθητήρα δύναμης στο τελικό σημείο δράσης του ποδιού. Η χρησιμοποίηση όμως ενός αισθητήρα δύναμης στο τελικό σημείο δράσης παρόλο που φέρνει μεγάλη ακρίβεια στην μέτρηση, παρουσιάζει μειονεκτήματα επειδή αυξάνει η ροπή αδράνειας του ποδιού, καθώς προστίθενται μάζα και επίσης υπάρχει το ενδεχόμενο να φθαρεί έντονα αφού υπόκεινται σε μεγάλες κρούσεις κατά την επαφή με το έδαφος. Ένας άλλος τρόπος που εξελίχθηκε αργότερα είναι μέσω του ιδίου μηχανισμού επενέργησης στον οποίο όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-2, ο επενεργητής είναι σε σειρά με το σύστημα μείωσης και το ελατήριο, [24], [30], [33].



Σχήμα 1-2. Series – Elastic Actuation

Την ιδέα αυτή της μεθόδου επενέργησης παρουσίασε πρώτος ο Pratt, [57]. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μεγάλη αποδοτικότητα για την ακριβή μέτρηση της παραγόμενης δύναμης αλλά παρουσιάζονται τα προβλήματα του παθητικού στοιχείου ελαστικότητας που αναφέραμε προηγουμένως. Γενικά είναι ιδανικό να χρησιμοποιηθεί αισθητήρας ο οποίος πρώτον να είναι κοντά στο σώμα, δεύτερον να μην βρίσκεται σε άμεση επαφή με το περιβάλλον για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του και τρίτον να προσφέρει υψηλής συχνότητας αίσθηση της δύναμης **(high bandwidth sensing)**, που είναι το κύριο μειονέκτημα του SEA.

Μία λύση που φάνηκε να ικανοποιεί και τα τρία κριτήρια, είναι η μέτρηση της ροπής των αρθρώσεων μέσω ρεύματος, και άρα μέσω της Ιακωβιανής του μηχανισμού, να προκύψει το μέτρο και η διεύθυνση της δύναμης που ασκείται στο τελικό σημείο δράσης, [34], [69], [87]. Αυτή η μέθοδος, όπως και η SEA, δεν απαιτεί αισθητήρες δύναμης απευθείας συνδεδεμένους στο τελικό σημείο δράσης όντας σε επαφή με το έδαφος. Επιπλέον πειράματα έχουν δείξει πως είναι μέθοδος ικανή για αίσθηση δύναμης σε πολύ υψηλές ταχύτητες (real time sensing – high bandwidth sensing), [34], [35], [87]. Παρ' όλα αυτά προκειμένου το ρεύμα των κινητήρων να γίνεται μέσο για την αίσθηση της δύναμης, απαιτείται όλος ο μηχανισμός του ποδιού να έχει πολύ συγκεκριμένο σχεδιασμό. Κύρια απαίτηση είναι η δύναμη που ασκείται στο τελικό σημείο δράσης να «ταξιδεύει» με πολύ μεγάλη ευκολία στις αρθρώσεις **(high force transparency)** και η αίσθηση της δύναμης να γίνεται σε πολύ υψηλές**.** Αυτό συνεπάγεται ο μηχανισμός ολόκληρου του ποδιού να είναι τέτοιος που να ελαχιστοποιεί τις τριβές, την αδράνεια και την χάρη οδοντών. Η ιδανική περίπτωση είναι με την επενέργηση να γίνεται με απευθείας οδήγηση όπου δεν υπάρχει μείωση και γι' αυτό το πανεπιστήμιο UPENN κατασκεύασε μία οικογένεια από ρομπότ που επενεργούνται με αυτόν τον τρόπο, [35]. Επειδή όμως οι απαιτήσεις ροπής είναι πολύ μεγάλες σε ρομποτικά συστήματα με πόδια, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν κινητήρες όπου παράγουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ροπή. Οι κινητήρες αυτοί είναι συγκεκριμένου τύπου και όπως αναφέραμε προηγουμένως είναι συνήθως κινητήρες χωρίς ψήκτρες που ο δρομέας περιστρέφεται εξωτερικά.

Αυτή βέβαια η μέθοδος επενέργησης περιόρισε τις δυνατότητες ροπής, παρόλο που οι συγκεκριμένοι από τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά παράγουν μεγαλύτερη τελικά ροπή σε σχέση με τους συμβατικούς κινητήρες. Επίσης είχαν προβλήματα λόγω της ενεργειακής αποδοτικότητας αφού οι κινητήρες αναγκάζονται να δουλεύουν σε περιοχή λειτουργίας μεγάλης ροπής όπου ο βαθμός απόδοσης είναι μικρός και έχουμε μεγάλη κατανάλωση θερμικής ισχύος. Έτσι η τελευταία λύση που προέκυψε είναι μέσω της χρήσης πολύ μικρής μείωσης, συνήθως πλανητικού συστήματος όπως στο MIT Cheetah (βαθμίδα μείωσης 1 - 5.8) [87] ή το G.O.A.T [34] στα οποία προκύπτει ότι η συγκεκριμένη μικρή μείωση δεν επηρεάζει πολύ τα μεγέθη όπως **force transparency** και **εύρος ζώνης**· πειράματα έδειξαν πως η μέτρηση της ροπής μέσω ρεύματος, γίνεται με μικρό σφάλμα 18.2% και 24.35% για την δύναμη στον z και στον x άξονα αντίστοιχα. Έχουν όμως επιπλέον το μεγάλο πλεονέκτημα πως η ροπή αυξάνεται σε ικανοποιητικά επίπεδα προσφέροντας την δυνατότητα να δημιουργηθεί ένα ρομπότ μεγαλύτερου βάρους και μεγέθους, συν το γεγονός πως πλέον οι κινητήρες εργάζονται σε πιο αποδοτικά σημεία λειτουργίας.

Τέλος η επιστημονική κοινότητα όπως είπαμε εστίασε περισσότερο στους κινητήρες χωρίς ψήκτρες όπου η τεχνολογία τους έχει ανέβει σε πολύ υψηλά επίπεδα χρησιμοποιώντας **συγκεκριμένους τρόπους λειτουργίας που εφαρμόζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις (ροπή,**

ταχύτητα). Η πιο κοινή μέθοδος είναι το **Field Oriented Control** με την οποία ο χρήστης επιτυγχάνει τη μέγιστη ροπή που μπορεί να δώσει ο κινητήρας εκμεταλλευόμενος στο έπακρο τις δυνατότητές του. Η τεχνολογία αυτή πρωτοεμφανίστηκε στην οδήγηση επαγωγικών τριφασικών κινητήρων και τα τελευταία χρόνια έχει υιοθετηθεί στους κινητήρες χωρίς ψήκτρες. Μία άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται όταν στόχος είναι η υψηλή ταχύτητα είναι το **field weakening** επιτυγχάνοντας ταχύτητες πέρα της ονομαστικής. Αυτό γίνεται ελέγχοντας κατάλληλα το μαγνητικό πεδίο των πηνίων του στάτη, επιτρέποντας έτσι ακόμα μεγαλύτερες τιμές εφαρμοζόμενης τάσης.

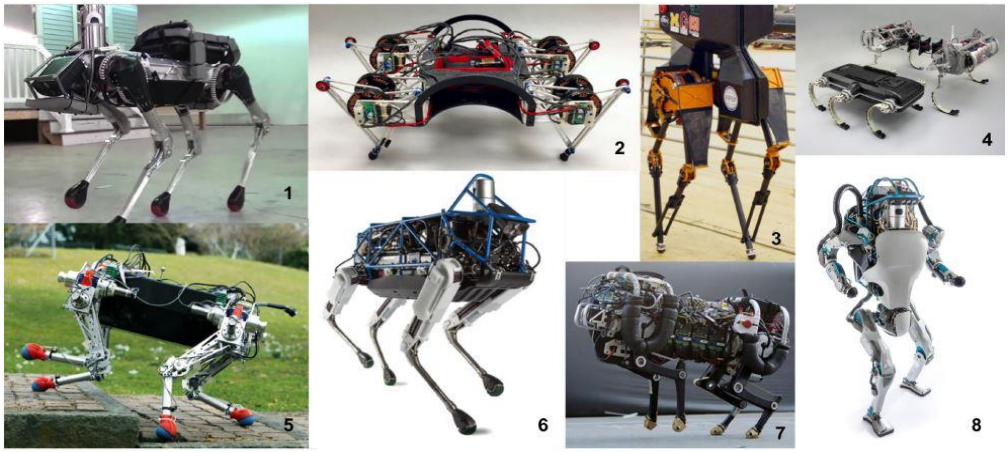
1.3 State of the Art σε ρομπότ με πόδια

Κάτι που δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα στα σύγχρονα ρομπότ είναι η ικανότητά τους να κάνουν πολύπλοκες κινήσεις και λειτουργίες σε διάφορα περιβάλλοντα. Μερικά από τα πιο αναπτυγμένα τετράποδα ρομπότ που είναι ικανά για πολύπλοκες κινήσεις διαφόρου τύπου είναι το RHex [21], Sand Flea [65] και το MIT Cheetah, [69].

Το RHex έχει επιδείξει ικανότητες μετακίνησης σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο και μεγάλες κλίσεις **(rugged terrain)**, χρησιμοποιώντας πόδια με παθητική συμπεριφορά και άρα παθητική προσαρμογή σε αυτά τα εδάφη με μειονεκτήματα όμως ότι περιορίζεται ως προς τον τρόπο ελέγχου. Το RHex έχει ήδη επιδείξει άλματα και ελιγμούς παρόλο που τα ενός βαθμού ελευθερίας πόδια, περιορίζουν τις δυνατότητές του σε κινήσεις εκτός επιπέδου, [15]. Επίσης το SandFlea της Boston Dynamics παρόλο που αποτελείται από τροχούς και όχι πόδια έχει επιδείξει πολύ καλή κινητικότητα και ελιγμούς κινούμενο σε επίπεδες επιφάνειες και χρησιμοποιώντας συμπιεσμένο αέρα, εκτοξεύεται μέχρι και 9 μέτρα προκειμένου να υπερπηδά εμπόδια. Το MIT Cheetah χρησιμοποιεί κινητήρες με πολύ χαμηλή μηχανική εμπέδηση, έχοντας πόδια πολύ υψηλής ταχύτητας και δύναμης με άριστη ιδιοδεκτική αίσθηση της αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον (αίσθηση δύναμης) χωρίς τη χρήση αισθητήρα, με περιορισμένη όμως κινητικότητα αφού αυτή περιορίζεται στο sagittal επίπεδο, [43], [70]. Το MIT Cheetah επιτρέπει εντυπωσιακές κινήσεις προς τα εμπρός αλλά περιορίζεται έντονα σε κινήσεις όπως στροφές, αλλαγές κατεύθυνσης, τρέξιμο πλαγίως και προς τα πίσω. Επιπλέον και άλλα ρομπότ έχουν κατασκευαστεί και είναι ικανά για πολύπλοκες κινήσεις περιλαμβανομένου του άλματος, του γλιστρήματος, του περπατήματος, και της κίνησης εν πλω (boating), [36], [55], [75], [90], [91].

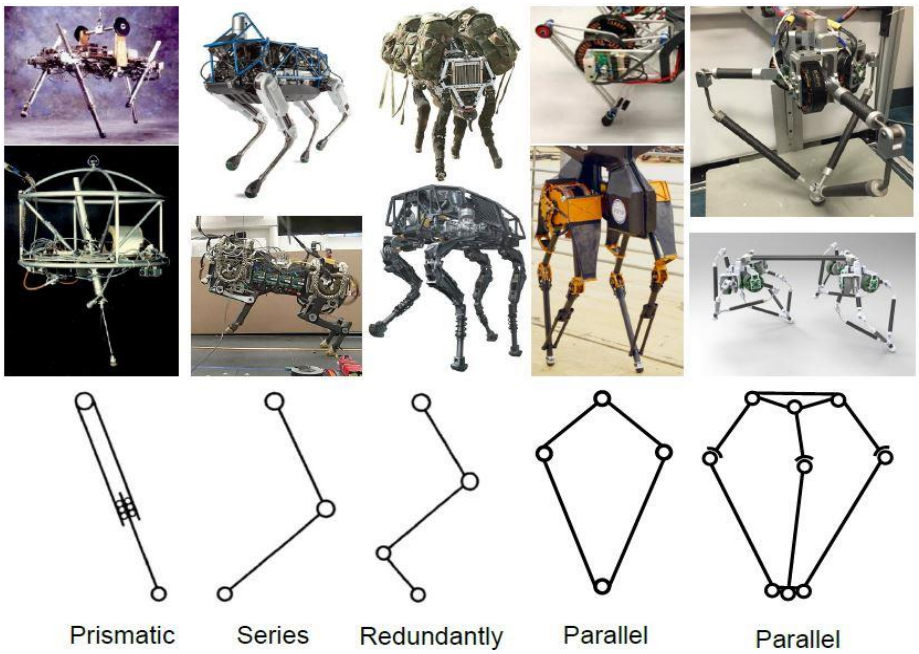
Έτσι ένας σημαντικός παράγοντας κατά το σχεδιασμό ρομπότ με πόδια είναι η επιλογή της τοπολογίας των ποδιών και η επιλογής της μεθόδου επενέργησής τους προκειμένου να έχουμε επιθυμητές κινήσεις. Τα τελευταίας τεχνολογίας τετράποδα ρομπότ φαίνονται στο Σχήμα 1-3, όπου περιλαμβάνονται αυτά της Boston Dynamics το Spot Mini, το Spot, το BigDog, το LS3 και το Atlas [5], [6], [60], το HyQ [68], το Hoppers [61], το MIT Cheetah [69], το ATRIAS [30], το StarlETH [33], το Penn Minitaur [35] και το RHEx, [21].

Αυτά τα ρομπότ μοιράζονται πολλές κοινές αρχές σχεδιασμού και απαιτήσεων όπως: αποδοτικότητα, υψηλή ταχύτητα και δύναμη, ενδοτικότητα ποδιού (μηχανική ή εικονική), εύρωστη μηχανική δομή και μετάδοση κίνησης, γρήγορο έλεγχο - υψηλής συχνότητας και εύρους ζώνης (high control bandwidth), ιδιοδεκτική αίσθηση της δύναμης, χαμηλή μηχανική εμπέδηση και τέλος μικρή αδράνεια.



Σχήμα 1-3. Ρομπότ με πόδια τελευταίας τεχνολογίας, [34]. (1) Boston Dynamics(BDI) SpotMini. (2) Penn/Ghost Robotics Minitaur. (3) ATRIAS. (4) RHex and Canid. (5) StarlETH. (6) BDI Spot. (7) MIT Cheetah. (8) BDI Atlas

Όλα τα προαναφερθέντα ρομπότ διαφέρουν ελαφρώς ως προς το τις προτεραιότητες που θέτουν ως στόχο να καλύψουν και έχουν αναπτυχθεί διάφοροι συνδυασμοί μεθόδων επενέργησης και τοπολογίας των ποδιών. Παραδοσιακές τοπολογίες ποδιών όπως φαίνονται στο Σχήμα 1-4, [34] αποτελούν **το πρισματικό** (Raibert Hoppers, SCHART 2016 [23]), **τα series articulated** (MIT Cheetah, StarlETH, HyQ, SpotMini, Spot), **τα redundant series articulated** (BigDog), **του ενός βαθμού ελευθερίας** (1-Dof) Canid [26], των δύο βαθμών ελευθερίας παράλληλα (ATRIAS, Penn Minitaur, MIT Super Mini Cheetah, [7].

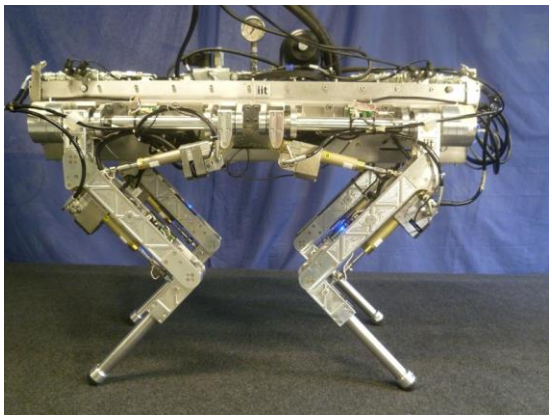


Σχήμα 1-4. Διάφορες τοπολογίες ποδιών, [34].

Τα πρισματικά πόδια είναι απλά και έχουν το πλεονέκτημα της αποδέσμευσης του ελέγχου της γωνίας του ποδιού, με το μήκος του. Τα ανοιχτής αλυσίδας series-articulated πόδια έχουν επίσης το πλεονέκτημα ότι μπορεί να αποσυνδέουν τον έλεγχο της γωνίας από τον έλεγχο του μήκους, έχοντας επιπλέον μεγάλο χώρο εργασίας για το τελικό σημείο δράσης, καλή απόδοση και υψηλές ταχύτητες. Τα

redundant series articulated έχουν επίσης μεγάλο χώρο εργασίας ίσως και μεγαλύτερο, αλλά το γεγονός πως οι κινητήρες είναι απομακρυσμένοι ο ένας από τον άλλο αυξάνει την αδράνεια του ποδιού και γι' αυτό οι αρθρώσεις σε αυτό τον σχεδιασμό είναι συνήθως μικρότερες. Πόδια ενός βαθμού ελευθερίας προσφέρουν πολύ απλό έλεγχο και πολύ μικρή αδράνεια αλλά με τίμημα το γεγονός πως είναι μικρότερος ο χώρος εργασίας, [15]. Παράλληλοι μηχανισμοί τέλος είναι πλεονεκτικοί όσον αφορά το γεγονός ότι οι δυνάμεις στο έδαφος μπορούν να διανεμηθούν σε αρκετούς κινητήρες και μπορούν να έχουν πολύ μικρή αδράνεια και ταχύτητα καθώς σχεδιαστικά μπορούν να τοποθετηθούν οι κινητήρες στο σώμα του ρομπότ. Παρόλα αυτά υποφέρουν από το γεγονός ότι έχουν μικρό χώρο εργασίας όσον αφορά τον όγκο του μηχανισμού, και εμφανίζουν μη αποδοτικά στοιχεία λόγω του αρνητικού έργου που προκαλείται στα ανταγωνιστικά μέρη του παράλληλου μηχανισμού, [30].

Όσο αφορά τις μεθόδους επενέργησης στα ρομπότ με πόδια έχουμε δύο βασικές κατηγορίες, τους ηλεκτρο-υδραυλικούς και τους ηλεκτρο-μαγνητικούς κινητήρες. Οι υδραυλικοί επενεργητές όπως το ρομπότ HyQ, βλ. Σχήμα 1-5, έχουν το πλεονέκτημα ότι χρησιμοποιούν ως μέσο πιεσμένο ασυμπίεστο ρευστό και αυτό τους καθιστά πολύ ισχυρούς κινητήρες σε σχέση με την μάζα τους. Αυτοί οι κινητήρες προσφέρουν καλό εύρος ζώνης ελέγχου **(control bandwidth)** περίπου 35Hz και επίσης εύρωστη συμπεριφορά καθώς η μεγάλη ροπή εξόδου που έχουν, δεν απαιτεί την χρήση μηχανισμών μετάδοσης. Έχουν όμως μειονεκτήματα που σχετίζονται με το χαμηλό back drivebility, χαμηλή απόδοσης λόγω κυρίως των ογκομετρικών απωλειών λαδιού και του συστήματος της ισχύος, βαριά συνοδευτικά εξαρτήματα όπως δεξαμενές, αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας και φίλτρα, [33], [68].



Σχήμα 1-5. HyQ τετράποδο ρομπότ με υδραυλική επενέργηση.

Αντιθέτως οι ηλεκτρομαγνητικοί κινητήρες, είναι κινητήρες που βασίζονται στην ταχύτητα περισσότερο είναι πιο αποδοτικοί, απαιτούν πολύ πιο ελαφριά συνοδευτικά εξαρτήματα (μπαταρίες και τα ηλεκτρονικά οδήγησης) και επίσης έχουν μεγαλύτερο εύρος κίνησης. Οι κινητήρες αυτοί μπορούν να παρέχουν μεγαλύτερη ροπή σε σχέση με την μάζα τους (ειδική ροπή) προσθέτοντας μηχανισμούς μετάδοσης και μείωσης της κίνησης, αλλά με τίμημα το ότι αυξάνει η ανακλώμενη ροπή αδράνεια (η αδράνεια του μηχανισμού από το περιβάλλον) με το τετράγωνο του λόγου μείωσης, ότι μειώνεται το εύρος ζώνης ελέγχου και αυξάνει η μηχανική εμπέδηση, επηρεάζοντας εν τέλει τις δυνατότητες για έλεγχο δύναμης. Επίσης οι μειωτήρες υπόκεινται σε έντονα διατμητικά φορτία κυρίως σε περιπτώσεις έντονων κρουστικών φορτίων. Ρομπότ που χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικούς κινητήρες είναι το MIT Cheetah [69] και το Minitaur [35] που φαίνονται στο Σχήμα 1-6. **Οι ηλεκτρομαγνητικοί επενεργητές** υπάρχουν σε διάφορους μηχανισμούς όπως **απευθείας οδήγησης (direct-drive)** όπου εφαρμόζεται

στο ρομπότ **Minitaur του UPENN**, **ψευδό – απευθείας οδήγησης (quasi direct-drive)** όπως αναφέρεται στην διπλωματική [34] και εφαρμόζεται στο **MIT Cheetah**, **series elastic επενέργηση** που αναφέραμε και προηγουμένως **(ATRIAS [30] και StarlETH [33])**, **με μειωτήρα (SpotMini)**, **parallel elastic και μεταβλητής δυσκαμψίας (BiMASK [32] και X-RHex [21])**. Επίσης οι **επενεργητές με πίεση ρευστού μέσου** υπάρχουν στα ρομπότ WildCat, BigDog [4] ως υδραυλικοί, στα HyQ, Spot ως ηλεκτρουδραυλικοί κινητήρες, στο Raibert Hoppers [61] ως πνευματικοί κινητήρες και τέλος ως υδροστατικοί κινητήρες. Πρόσφατες εξελίξεις στην υδροστατική μετάδοση, συνδυάζουν ψευδό-απευθείας οδήγησης επενεργητές με υδραυλικές μεταδόσεις κίνησης, [89].

Σχήμα 1-6. MIT Cheetah [69] και UPenn/Goast Minitaur, [35].

1.4 Δομή Εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει δομηθεί σε 4 βασικά μέρη.

Στο 2ο Κεφάλαιο παρουσιάζουμε σε ικανοποιητικό βαθμό τις βασικές αρχές που πρέπει να τηρεί ο σχεδιαστής των ρομπότ με πόδια καθώς και του τρόπου επενέργησης προκειμένου να πληρούνται συγκεκριμένες προδιαγραφές ταχύτητας, δύναμης, αντοχής και ενεργειακής αποδοτικότητας. Τέλος παρουσιάζουμε τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των σύγχρονων μεθόδων επενέργησης.

Στο 3ο Κεφάλαιο εστιάζουμε ολοκληρωτικά στην θεωρία των κινητήρων χωρίς ψήκτρες αναλύοντας τα κύρια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και τον τρόπο που αυτά συνδέονται με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους και την απόδοσή τους ως κινητήρες. Επίσης σχολιάζουμε τις μεθόδους που μπορεί κανείς να λειτουργήσει αυτούς τους κινητήρες.

Στο 4ο Κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των μεθόδων ταυτοποίησης των ηλεκτρικών και μηχανικών παραμέτρων ενός κινητήρα χωρίς ψήκτρες καθώς και τα αποτελέσματα αυτών των μεθόδων στους κινητήρες της εταιρείας T-motor U8KV100 και U8KV135. Τέλος γίνεται θερμική ανάλυση του κινητήρα χρησιμοποιώντας θερμική κάμερα ώστε να προκύψει το μέγιστο από άποψη ρεύματος και ροπής σημείο λειτουργίας.

Τέλος στο 5ο Κεφάλαιο γίνεται προσομοίωση ενός ποδιού με δύο συνδέσμους που σκοπό έχει να εξετάσουμε, με βάση τις δυνατότητες του κινητήρα και μέθοδο επενέργησης απευθείας οδήγησης, τα μεγέθη που μπορεί να έχει όσον αφορά το βάρος και το μήκος.

Στο τελευταίο και 6ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και η μελλοντική εργασία που μπορεί να βασιστεί πάνω στην παρούσα εργασία.

2 Σχεδιαστικές αρχές ρομπότ με πόδια

2.1 Σχεδιαστικές αρχές για τα πόδια του ρομπότ

Τα περισσότερα τετράποδα ρομπότ που ανήκουν στο απόγειο της σύγχρονης τεχνολογίας «state of the art» εφαρμόζουν διάφορες παραλλαγές ως προς τον σχεδιασμό των ρομπότ με πόδια. Σε αυτά ανήκουν διάφορα τετράποδα ρομπότ όπως αναφέραμε προηγουμένως και είναι τα MIT Cheetah, ATRIAS, Penn Minitaur, Laelaps. Σε όλα αυτά τα ρομπότ ο σχεδιασμός των ποδιών προκύπτει έχοντας συγκεκριμένες απαιτήσεις και κοινά στοιχεία τα οποία είναι τα παρακάτω.

1. Μεγάλης ταχύτητας πόδια που ταυτόχρονα είναι και μεγάλης αντοχής και δύναμης
2. Συνδυασμός παθητικής και ενεργητικής ενδοτικότητας
3. Στιβαρός σχεδιασμός των ποδιών και της μετάδοσης.
4. Ενεργειακή αποτελεσματικότητα

Κατά τον σχεδιασμό αυτές οι κοινές αρχές οδηγούν σε πολλά trade-offs και αντιθέσεις που ανάλογα με την εφαρμογή καθοδηγούν στην κατάλληλη επιλογή. Για παράδειγμα, η επιλογή γρήγορων ποδιών με μικρή μάζα και αδράνεια αντιτίθεται στο γεγονός ότι θέλουμε στιβαρά πόδια αφού οι πρώτες προδιαγραφές απαιτούν μείωση του υλικού και άρα και της διατομής, που όμως αυξάνουν τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Επίσης η ικανότητα του ποδιού για ιδιοδεκτική αίσθηση της αλληλεπίδρασης του ρομπότ με το περιβάλλον έρχεται σε αντίθεση με το γεγονός πως θέλουμε πόδια μεγάλης ροπής και άρα μεγάλης ειδικής ροπής (ροπή ως προς μάζα) που απαιτεί μειωτήρες οι παρόμοιες διατάξεις. Τέλος η χρήση παθητικών στοιχείων για μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και αύξηση της προστασίας του μηχανισμού μειώνει την δυνατότητα ελέγχου σε μεγάλη συχνότητα αφού το εύρος ζώνης στην περίπτωση παθητικών στοιχείων ελαστικότητας μειώνεται. Άρα τα κύρια trade-offs είναι τα παρακάτω:

1. Υψηλή ειδική ροπή σε αντίθεση με μηχανική εμπέδηση και ιδιοδεκτική αίσθηση δύναμης
2. Ενεργειακή αποδοτικότητα σε αντίθεση με δυνατότητες ελέγχου
3. Ευκολία κίνησης – μείωση αδράνειας σε αντίθεση με αντοχή ποδιού

Ως εκ τούτου οι σημερινοί σχεδιασμοί ρομπότ στηρίζονται σε αυτά τα σχεδιαστικά trade-offs.

2.1.1 Ρομπότ με πόδια για υψηλή δύναμη και υψηλή ταχύτητα

Όσον αφορά τα ρομπότ με πόδια κατά την υπερπήδηση εμποδίων ή κατά το τρέξιμο **οι δυνάμεις που εμφανίζονται είναι της τάξης του 2 με 3 φορές το βάρος του σώματος του ρομπότ**. Αυτό ταιριάζει απόλυτα με το γεγονός πως η δύναμη που δέχεται το πόδι ενός ανθρώπου είναι 3 φορές το σώμα του, [84]. Ως εκ τούτου αν θεωρήσουμε ένα ρομπότ περίπου 20Kg τότε οι δυνάμεις που απαιτούνται είναι της τάξης των 600N. Στην βιβλιογραφία επίσης αναφέρεται για τα τετράποδα ρομπότ, η ροπή που χρειάζεται κάθε άρθρωση του ποδιού προκειμένου να ισορροπεί είναι περίπου 2 N-m ανά κιλό σώματος. Έτσι είναι εύλογο να πούμε ότι τα ρομπότ με πόδια έχουν μεγάλες απαιτήσεις ροπής. Επίσης όμως απαραίτητη είναι σε διάφορες εφαρμογές και η υψηλή ταχύτητα του ρομπότ και των αρθρώσεων που πρέπει να είναι το λιγότερο 120 - 180 rpm, [34]. Αυτό όμως είναι ένας συμβιβασμός αφού οι μεταδόσεις κίνησης προσφέρουν υψηλή ειδική ροπή σε βάρος της ταχύτητας**. Γι' αυτό το λόγο εκτός από την υψηλή ειδική ροπή (ροπή ανά μάζα) ζητούμενο είναι και η υψηλή ειδική ισχύς (ισχύς ανά μάζα)**. Παρόλα αυτά, σε εφαρμογές απευθείας οδήγησης, η ταχύτητα δεν περιορίζεται από κάποια

σχέση μετάδοσης και αυτό που επηρεάζεται είναι η ροπή που παράγεται από τον κινητήρα. Άρα ζητούμενο για την επιλογή κινητήρων είναι η μέγιστη ειδική ροπή ή και τελευταία η μέγιστη θερμικά ειδική ροπή (ειδική ροπή που περιλαμβάνει και την ικανότητα απαγωγής θερμότητας) του κινητήρα που λαμβάνει υπόψιν και την θερμική αντοχή, [35].

Επίσης εκτός από την μέγιστη ροπή σημαντικό για επίτευξη επιτάχυνσης σύμφωνα με τον 2ο νόμο το Νεύτωνα, απαιτείται **μικρή μάζα και αδράνεια** του ποδιού. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορους σχεδιαστικού τρόπους, όπως για παράδειγμα η τοποθέτηση των κινητήρων όσο πιο κοντά στο σώμα του ρομπότ, όπως π.χ. πόδι του MIT Cheetah με δύο κινητήρες τοποθετημένους ομοαξονικά, ώστε το κέντρο βάρος του ποδιού να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σώμα, [87]. Επίσης μείωση της μάζας και της αδράνειας του ποδιού μπορεί να προκύψει και με την χρήση υλικών όπως carbon, αλουμίνιο [34] π.χ. τα πόδια του Laelaps ή τα πόδια του MIT Cheetah. Η μείωση της αδράνειας είναι ωφέλιμη αφού για την ίδια ροπή, η επιτάχυνση και η γρήγορα εναλλαγή κατεύθυνσης διευκολύνεται. Τέλος το ενδεχόμενο να τοποθετηθούν οι κινητήρες και γενικά η περισσότερη μάζα στο ισχίο του ποδιού και γενικότερα στο σώμα διευκολύνει όσον αφορά την δομή του controller αφού η αντίστροφη κινηματική και τα δυναμικά μοντέλα για σχεδιασμό τροχιάς είναι απλούστερα, [34].

2.1.2 Παθητική και ενεργή ενδοτικότητα

Γενικά η **ενδοτικότητα (compliance)** πρέπει να υπάρχει στα τετράποδα ρομπότ κατά την αλληλοεπίδραση αυτών με το έδαφος, προκειμένου να μπορεί να απορροφηθεί ποσό ενέργειας από τις κρούσεις κατά το τρέξιμο ή την υπερπήδηση εμποδίων και να διαχυθεί κατάλληλα στο σώμα και τα πόδια του ρομπότ. Παρόλα αυτά υπάρχουν, όπως αναφέραμε και στο 1ο Κεφάλαιο υπάρχουν δύο κύριες σχολές όσον αφορά την ενδοτικότητα που πρέπει να υπάρχει στα τετράποδα ρομπότ και αυτές είναι η παθητική και η ενεργή ενδοτικότητα **(passive and active compliance)**. Η παθητική χρησιμοποιεί όπως λέει και η λέξη παθητικά μηχανικά στοιχεία ελαστικότητας και απόσβεσης όπως το ελατήριο και ο αποσβεστήρας που έχουν τη φυσική τάση να ανακυκλώνουν την ενέργεια και να αποσβένουν κρουστικά φαινόμενα. Τα παθητικά στοιχεία έχουν το πλεονέκτημα πως προστατεύουν τα υπόλοιπα μηχανικά μέρη του μηχανισμού. Όμως ο έλεγχος του τετράποδου ρομπότ μπορεί να γίνει πιο πολύπλοκος λόγω του ότι το πόδι δεν είναι πλήρως ελέγξιμο. Επίσης παρουσιάζουν το μειονέκτημα πως δεν εμφανίζουν μεγάλη προσαρμοστικότητα σε διάφορες εφαρμογές με αποτέλεσμα αυτός ο τρόπος ρύθμισης της ενδοτικότητας να παρουσιάζεται όταν το τετράποδο ρομπότ σχεδιάζεται για ένα συγκεκριμένο σκοπό και γνωρίζουμε ακριβώς από πριν το περιβάλλον στο οποίο θα βρεθεί πράγμα που το κάνει μη ευέλικτο. Έχουν υπάρξει διάφορες τεχνικές προκειμένου να ρυθμίζεται η στιβαρότητα και η απόσβεση της ενδοτικότητας μηχανικών στοιχείων με το τίμημα όμως ενός πολύπλοκου μηχανικού σχεδιασμού που επιπροσθέτως προσφέρει μάζα στο σύστημα, [22], [32].

Η ενεργή ενδοτικότητα μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους και αλγόριθμους. Ένας από αυτούς είναι ο έλεγχος των ροπών των κινητήρων έτσι να δημιουργείται μία **εικονική ενεργή ενδοτικότητα (Virtual Active Compliance) με σκοπό να επιτευχθούν οι επιθυμητές δυνάμεις.** Σε αυτή την περίπτωση δεν έχουμε μηχανικά στοιχεία που προσφέρουν ενδοτικότητα αλλά μέσω του λογισμικού μπορεί το ρομπότ να αποκτά την κατάλληλη ενδοτικότητα ανάλογα με την εφαρμογή και το έδαφος. Έτσι η προσαρμοστικότητά του μπορεί να ανέβει σε υψηλά επίπεδα. Με τον τρόπο αυτό λοιπόν το ρομπότ γίνεται πιο ευέλικτο για διάφορες εφαρμογές, όμως έχουμε το μειονέκτημα πως δεν υπάρχει

η δυνατότητα να αποθηκευτεί ενέργεια από την συμπεριφορά ως ένα εικονικό ελατήριο αφού δεν υφίσταται ουσιαστική ανακύκλωση ενέργειας με αποτέλεσμα η ενεργειακή απόδοση να πέφτει. Μία λύση σε αυτό όμως είναι η δυνατότητα εκμετάλλευσης των ηλεκτρονικών ισχύος, προκειμένου να εκμεταλλευόμαστε τα χρονικά διαστήματα που οι κινητήρες «φρενάρουν» πχ για να αποσβέσουν ένα φαινόμενο, παράγοντας ρεύμα που θα φορτίσει τις μπαταρίες με τις οποίες θα τροφοδοτηθούν στην συνέχεια. Υπάρχουν και προσπάθειες συνδυασμού παθητικών και ενεργών στοιχείων. Για παράδειγμα ο άνθρωπος και τα ζώα ελέγχουν τις ροπές των αρθρώσεων τους ανταγωνιστικά. Ο συνδυασμός των μυών με τους τένοντες προσφέρουν την δυνατότητα ελέγχου και της παθητικής και της ενεργής ενδοτικότητας [11], όπως για παράδειγμα η χρήση μεθόδων επενέργησης όπου ελατήριο είναι παράλληλα ή σε σειρά με τον επενεργητή **(Parallel Elastic Actuation και Series Elastic Actuation)**. Όμως απαιτείται υψηλού επιπέδου και πολύπλοκος έλεγχος για να συνδυαστεί η παθητική με την εικονική ενδοτικότητα.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ενεργή ενδοτικότητα υπάρχουν ορισμένες προϋποθέσεις. Μία από αυτές είναι πως για να πραγματοποιηθεί αποτελεσματικά η ενεργή ενδοτικότητα πρέπει αυτή να μπορεί να λειτουργεί στην περιοχή των kHz το οποίο απαιτεί **υψηλής συχνότητας και ακριβή έλεγχο, υψηλό εύρος ζώνης των κινητήρων και αίσθηση της δύναμης (κυρίως σε κινητήρες με γρανάζια)**. Η τελευταία είναι πολύ βασική και υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί αίσθησης της δύναμης. Αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί, μέσω ειδικών αισθητήρων δύναμης που τοποθετούνται στο πέλμα του ρομποτικού ποδιού αλλά και μέσω σχημάτων επενέργησης, τα οποία πραγματοποιούν αίσθηση της δύναμης ιδιοδεκτικά **(proprioceptive)**. Παραδείγματος χάριν στην SE επενέργηση (Series Elastic Actuation) που αναφέραμε προηγουμένως μέσω της μεταβολής της θέσης του ελατηρίου πραγματοποιείται έλεγχος της δύναμης. Στην επενέργηση απευθείας οδήγησης η ιδιοδεκτική αίσθηση της δύναμης γίνεται μέσω της παρακολούθησης της μεταβολής του ρεύματος. Όλες οι δυνάμεις που ασκούνται στο πέλμα ενός ποδιού για να μετρηθούν ιδιοδεκτικά, χωρίς την χρήση αισθητήρα στο πέλμα, πρέπει πρώτα «περάσουν» μέσα από τον μηχανισμό και την δομή του ποδιού και ως εκ τούτου υπόκεινται στην μηχανική εμπέδηση.

Ουσιαστικά μηχανική εμπέδηση είναι το ανάλογο της ηλεκτρικής εμπέδησης (σύνθετη αντίσταση Z). Ουσιαστικά μπορεί να θεωρηθεί οτιδήποτε αντιστέκεται στην αντίσταση της μετάδοσης της δύναμης που παράγεται από μία άρθρωση προς το τελικό σημείο δράσης και αντίστροφα. Γενικά η μηχανική εμπέδηση είναι ο δυναμικός συντελεστής που καθορίζει την δύναμη εξόδου σε ένα σύστημα όταν σε αυτό έχουμε ως είσοδο μία συγκεκριμένη ταχύτητα. Δίνεται δηλαδή από την παρακάτω εξίσωση.

$$Z = \frac{F_{ext}}{U_{inp}} \tag{2-1}$$

Παράγοντες που συμβάλουν στην αντίσταση είναι η υψηλή αδράνεια, η μάζα και ροπή αδράνειας, η στιβαρότητα, η απόσβεση, και η τριβή. Ελαχιστοποίηση της αντίστασης είναι γενικά πολύ κρίσιμη για την απομόνωση και προστασία του υπόλοιπου σώματος του ρομπότ αφού αν έχουμε κρουστικά φορτία και η μηχανική εμπέδηση του μηχανισμού είναι υψηλή τότε διάφορα μέρη του ρομπότ καταπονούνται ισχυρά. Παράδειγμα σε αυτό είναι όταν χρησιμοποιούμε μεγάλη μείωση για την αύξηση της ροπής τότε η ροπής αδράνειας όπως φαίνεται από το εξωτερικό περιβάλλον **(reflected inertia)** είναι πολύ μεγάλη αφού πολλαπλασιάζεται με το τετράγωνο του λόγου μείωσης.

$$I_{reflected} = I_{leg} + I_{motor} n^2 \quad (2\text{-}2)$$

Η αίσθηση της δύναμης που ασκείται στο πόδι μέσω του ρεύματος του κινητήρα είναι προτιμότερη σε σχέση με την τοποθέτηση ενός αισθητήρα στο άκρο του ποδιού (πέλμα). Από άποψη μηχανολογικής σχεδίασης, η απομακρυσμένη τοποθέτηση σημειακών μαζών στο πόδι αυξάνει την ροπή αδράνειας του ποδιού ως προς την άρθρωση του ποδιού καθώς και γιατί όπως είπαμε οι δυνάμεις που ασκούνται στα πέλματα των τετράποδων ρομπότ είναι της τάξης 2-3 του βάρους και αυτό συνεπάγεται ότι σε κυκλική κίνηση οι αισθητήρες δύναμης πρέπει να εμφανίζουν πολύ μεγάλη αντοχή για να μην φθαρούν σε εναλλασσόμενη ισχυρή φόρτιση. Βέβαια σε μηχανισμούς που έχουμε μεγάλες μειώσεις, η μηχανική αντίσταση είναι αυξημένη και η μη χρήση αισθητήρα δύναμης για **virtual leg compliance** είναι αναπόφευκτη. Για την μείωση της μηχανικής εμπέδησης, το MIT Cheetah χρησιμοποιεί την λεγόμενη Ψευδό Απευθείας Οδήγηση (Quasi Direct-Drive) [69], [87], όπου συνδυάζει υψηλή ροπή με κατάλληλους κινητήρες αλλά χρησιμοποιώντας πολύ χαμηλή σχέση μετάδοσης για την ακρίβεια 5.8:1 μέσω πλανητικού συστήματος και διατηρώντας το force transparency σε υψηλά επίπεδα. Στην ιδανική περίπτωση της απευθείας οδήγησης έχουμε το Minitaur ρομπότ και όλη την οικογένεια απευθείας οδήγησης από το UPENN.

2.1.3 Στιβαρό και ανθεκτικό μηχανισμό και δομή.

Γενικά η σχεδιασμός ενός ποδιού για ένα τετράποδο ρομπότ που θα μπορεί να αντέξει περίπου 3 φορές το βάρος του ρομπότ αποτελεί από μόνο του μία πρόκληση. Γενικά πάντως με όσα είπαμε και παραπάνω ο σχεδιαστής στην επιλογή εξαρτημάτων που αποτελούν μηχανισμό που δέχεται μεγάλα κυκλικά φορτία πρέπει να επιλέξει υλικά που έχουν υψηλή ειδική αντοχή, αντοχή ως προς την μάζα αφού μας ενδιαφέρει και η αδρανειακή συμπεριφορά. Μερικά από αυτά είναι κράματα αλουμινίου, το τιτάνιο, σύνθετα υλικά πλαστικού, σύνθετα υλικά με ανθρακόνημα και φύλα πολυεστέρα με γυαλί ινών **(fiberglass)**. Γενικά η χρησιμοποίηση σύνθετων υλικών αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή όσον αφορά την αντοχή ως προς την μάζα αλλά έρχεται σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα και το κόστος κατασκευής.

Μία άλλη επιλογή για τη αύξηση της στιβαρότητας σε υψηλές κρούσεις είναι η χρησιμοποίηση του tensegrity [69] ή «bio-tensegrity» όπως φαίνεται από τους σχεδιαστές του MIT – Cheetah. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί συμπιεσμένα στοιχεία που βρίσκονται μέσα σε ένα πλέγμα από προ ενταμένα στοιχεία. Το πόδι στο MIT Cheetah κατά ένα μέρος κατασκευάζεται από σύνθετο υλικό με αφρό πυρήνα και κατά ένα άλλο μέρος χυτεύεται με ενσωματωμένο τένοντα ιστού που παρέχει παθητική ενδοτικότητα και εξομαλύνει τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Καμπτικές τάσεις εξομαλύνονται στο πόδι διανέμοντας εφελκυστικές τάσεις στο Kevlar. Αυτός ο σχεδιασμός μειώνει την μάζα και την αδράνεια των ποδιών χωρίς να μειώνει την δύναμη.

2.1.4 Ενεργειακή αποδοτικότητα

Όπως σε πολλές μηχανολογικές εφαρμογές, έτσι και στα τετράποδα ρομπότ εξίσου σημαντικό παράγοντα παίζει η ενεργειακή αποδοτικότητα του ρομπότ. Αρχικά αυτή μπορεί να αυξηθεί με μεθόδους όπως η **αναγεννητική πέδηση (regenerative braking)**, όπου όπως στα υβριδικά αυτοκίνητα κατά την πέδηση μεταφέρεται στις μπαταρίες ρεύμα προκειμένου να φορτιστούν.

Ουσιαστικά ο επενεργητής δεν θα εργάζεται ως κινητήρας (1° και 3° τεταρτημόριο) αλλά ως γεννήτρια όπου κατά την πραγματοποίηση της ενεργητικής (active compliance) και της εικονικής ενδοτικότητας (virtual compliance), η μηχανή εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια η οποία πλέον δεν χάνεται ως θερμότητα αλλά αποθηκεύεται στις μπαταρίες τροφοδοσίας (συνήθως LiPo). Ουσιαστικά η ιδέα είναι αντιστροφή της ροής ενέργειας όχι από την μπαταρία στο πέλμα του ρομπότ και την παραγωγή δύναμης αλλά το αντίθετο. Το MIT Cheetah έχει custom σχεδιασμένα ηλεκτρονικά που επιτρέπουν κάτι τέτοιο [70], φθάνοντας μέχρι και την ανάκτηση του 63% της μηχανικής ενέργειας και πετυχαίνοντας άνευ προηγουμένου επίπεδα απόδοσης (για ρομπότ που χρησιμοποιούνε ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας μόνο) και το οποίο έρχεται σε ανταγωνιστικά επίπεδα με πραγματικά ζώα ίδιου μεγέθους και μάζας.

Επίσης η ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να αυξηθεί και με την χρήση παθητικών στοιχείων ελαστικότητας παρότι έχουν το μειονέκτημα ότι δεν είναι εύκολη η προσαρμογή του μηχανισμού και της ενδοτικότητας σε άγνωστα εδάφη και εμπόδια. Μπορούν όμως εκτός από απλό έλεγχο να προσφέρουν και ανακυκλώμενη ενέργεια από βηματισμό σε βηματισμό. Αυτή η ανακυκλώμενη ενέργεια μπορεί να μειώσει την απαίτηση των επενεργητών από άποψη ισχύος, μάζας και ενεργειακής κατανάλωσης. Ουσιαστικά η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ελαστική δυναμική και αντίστροφα. Τα Bow Leg Hopper και ATRIAS ρομπότ που έχουν πόδια με ελατήρια, μετά από πειραματικές μετρήσεις εμφανίζουν 75 και 68% αποδοτικότητα στον βηματισμό [8], [30], [93] αντίστοιχα, η οποία είναι μεγαλύτερη από το 63% του MIT Cheetah που προκύπτει από αναγεννητική πέδηση. Το ATRIAS χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό αναγεννητικής πέδησης και παθητικών στοιχείων.

Τέλος χρήσιμο είναι να περιοριστούν οι απώλειες που αφορούν τα ηλεκτρονικά ισχύος ή τους ηλεκτρικούς κινητήρες ή και την μετάδοση κίνησης. Οι κύριες αιτίες σε αυτά είναι οι απώλειες Joule και οι απώλειες τριβής. Οι πρώτες συνδέονται με το τετράγωνο του ρεύματος και την αντίσταση των τυλιγμάτων. Στο ρομπότ MIT Cheetah ισχύει πως οι απώλειες Joule οφείλονται κατά ποσοστό 76% στα ρευματοφόρα καλώδια και γι' αυτό μείωση το ρεύματος θα είχε σημαντικά αποτελέσματα στην απώλεια ενέργειας. Επίσης η τριβή στις εδράσεις, στις αρθρώσεις και στα στοιχεία μετάδοσης δεν είναι μόνο στοιχεία που προκαλούν χαμηλή μηχανική εμπέδηση αλλά αποτελούν και καταβόθρες ενέργειας. Ως εκ τούτου η χρησιμοποίηση στοιχείων μηχανών υψηλής τεχνολογίας είναι κύριας σημασίας για την υψηλή ενεργειακή απόδοση του μηχανισμού.

2.2 Αρχές επενέργησης στα ρομπότ με πόδια

Γενικά όπως είδαμε υπάρχουν διάφορες αρχές που πρέπει να ακολουθούν τα ρομπότ με πόδια και πολλές από αυτές σχετίζονται με τον τρόπο που πραγματοποιείται η επενέργηση. Παρακάτω θα εστιάσουμε κυρίως στις μεθόδους επενέργησης των ρομπότ με πόδια και τις κύριες παραμέτρους που τα χαρακτηρίζουν για τους μεθόδους επενέργησης όπως η απευθείας οδήγηση.

2.2.1 Θερμική ειδική σταθερά ροπής

Όπως είδαμε προηγουμένως στα τετράποδα ρομπότ είναι σημαντικό να έχουμε υψηλή δύναμη και υψηλή ταχύτητα και είδαμε πως σημαντικό μέγεθος είναι η ειδική ισχύς. Σε μηχανισμούς που η σχέση μετάδοσης της κίνησης είναι 1:1 όπως η απευθείας επενέργηση και η ταχύτητα δεν περιορίζεται όσο

εάν είχαμε κάποια υψηλή σχέση μετάδοσης, τότε σημαντικό ρόλο παίζει η αύξηση της ειδικής ροπής κατά την επιλογή κινητήρων και ως εκ τούτου της ειδικής σταθερά ροπής (**σταθερά ροπής ως προς μάζα**). Ένα πιο ικανοποιητικό μέγεθος όμως που περιλαμβάνει και την θερμική αντοχή του κινητήρα είναι η θερμική ειδική σταθερά ροπής. Πρέπει να επισημάνουμε αναφερόμαστε σε ειδικά μεγέθη γιατί οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι ανάλογες της μάζας και του βάρους του ρομπότ και δεν έχει επομένως νόημα να μιλάμε για αύξηση της ροπής ενός κινητήρα αν αυξάνει και η μάζα.

Σύμφωνα με το [35], για την οικογένεια των ρομπότ απευθείας οδήγησης, οι κινητήρες επιλέχθηκαν λαμβάνοντας υπόψιν δύο παραμέτρους: Τη μέγιστη ειδική ροπή δηλαδή την ικανότητα του κινητήρα, ως προς την μάζα του, να παράγει μέγιστη ροπή πάνω από την ονομαστική και την θερμική ειδική σταθερά ροπής δηλαδή την ικανότητα του κινητήρα, ως προς την μάζα του, παραγωγής ροπής σε μόνιμη κατάσταση λαμβάνοντας υπόψιν και την θερμική αντοχή. Οι δύο παράμετροι δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις αντιστοίχως:

$$k_{t_{peak_torque}} = \frac{\tau_{peak}}{m} = \frac{K_t I_{peak}}{m} \qquad \left(\frac{Nm}{kg}\right) \tag{2-3}$$

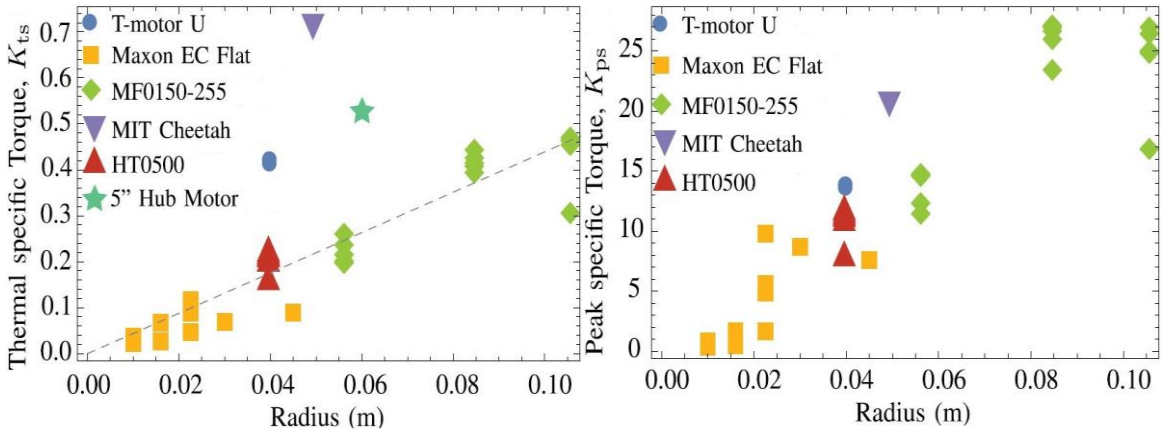
όπου I_{peak} είναι το ρεύμα πριν το κορεσμό της μαγνητικής ροής και K_t η σταθερά ροπής, και

$$k_{thermal-specific} = \frac{K_t}{m}\sqrt{\frac{1}{R_{th}R}} \qquad \left(\frac{Nm}{kg\sqrt{^oC}}\right) \tag{2-4}$$

Όπου R_{th} είναι η θερμική αντίσταση του κινητήρα σε μονάδες ($^oC/W$), R είναι η ηλεκτρική αντίσταση των τυλιγμάτων του κινητήρα και η οποία ευθύνεται για την παραγωγή θερμικής ισχύος. Η σταθερά αυτή ουσιαστικά δείχνει την δυνατότητα του κινητήρα να παράγει ροπή σε κατάσταση ακινησίας (stall) λαμβάνοντας υπόψιν όμως και την ικανότητα διάχυσης αυτής της θερμικής ενέργειας που παράγεται. Παράμετροι που επηρεάζουν αυτή τη σταθερά είναι η γεωμετρία του κινητήρα, η διαμόρφωση των πηνίων στον στάτη, η διαμόρφωση των πόλων στον δρομέα και το υλικό των μαγνητικών υλικών [34] και ο τρόπος οδήγησης. Γενικά η σταθερά αυτή σχετίζεται με την σταθερά του κινητήρα K_M [25], η οποία όπως γνωρίζουμε από την θεωρία των κινητήρων, δίνεται από την εξίσωση:

$$K_M = \frac{T}{\sqrt{I^2 R}} = \frac{K_T}{\sqrt{R}} \qquad \left(\frac{Nm}{\sqrt{W}}\right) \tag{2-5}$$

η οποία λαμβάνει υπόψιν την παραγωγή ροπής T χωρίς όμως να λαμβάνει την μάζα του κινητήρα που είναι σημαντικό για εφαρμογές τετράποδων ρομπότ και χωρίς να λαμβάνει υπόψιν την θερμική διάχυση της θερμότητας που παράγεται από την αντίσταση των τυλιγμάτων R. Γενικά η θερμική ειδική σταθερά συνδέεται άμεσα με την απόσταση του διακένου από τον άξονα περιστροφής (ακτίνα διακένου) των κινητήρων αφού όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα διακένου τόσο μεγαλύτερο είναι και αυτό το μέγεθος, [69]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση των κινητήρων στους οποίος ο δρομέας περιστρέφεται εξωτερικά (outrunners) σε σχέση με τους κινητήρες που περιστρέφεται εσωτερικά (inrunners) και γενικότερα των κινητήρων όπου σχεδιαστικά έχουν μικρό λόγο ακτίνας διακένου προς το μήκος του κινητήρα, [2]. Στο [35] παρουσιάζονται διαγράμματα που αφορούν τα μεγέθη των Εξ. (2-3) και (2-4) συγκρίνοντας διάφορους κινητήρες.



(α) (β)

Σχήμα 2-1. (α) Διάγραμμα της μέγιστης ειδικής ροπής. (β) Διάγραμμα της θερμικής ειδικής σταθεράς ροπής σε συνάρτηση με την ακτίνα διακένου.

Οι κινητήρες που παρουσιάζονται στο παραπάνω Σχήμα 2-1, απαρτίζουν τα πλέον σύγχρονης τεχνολογίας τετράποδα ρομπότ, Ο Πίνακας 2-1 περιέχει για αυτά αναλυτικά στοιχεία, όπως τον τύπο κινητήρα, τον αριθμό ποδιών, τους βαθμούς ελευθερίας σε κάθε πόδι και το μήκος τους, το βάρος και το ποσοστό του συνολικού βάρους που καταλαμβάνουν οι κινητήρες και τέλος αν χρησιμοποιείται μειωτήρας ή όχι. Από τα διαγράμματα βλέπουμε πως υπάρχει μία γραμμική σχέση μεταξύ της ακτίνας διακένου και των μεγεθών αυτών από την οποία όμως αποκλίνουν μερικοί κινητήρες όπως ο T-motor U8, και ο κινητήρας που χρησιμοποιείται στο MIT Cheetah. Οι αποκλίσεις αυτών των κινητήρων οφείλονται κυρίως στη σχεδίαση του κινητήρα, όπως στην επιλογή μαγνητών, τη μαγνητική αντίσταση των μαγνητικών κυκλωμάτων, κ.λπ. Επίσης οι αποκλίσεις αυτές αποτέλεσαν κίνητρο για περαιτέρω μελέτη των κινητήρων T-motor αφού σε αντίθεση με τους custom κινητήρες του MIT Cheetah, ανήκουν στην κατηγορία off the shelf και υπάρχουν στην αγορά. Έτσι όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 4 θα εστιάσουμε στους κινητήρες T-motor U8.

Πίνακας 2-1. Σύγκριση διαφόρων ρομπότ με πόδια

Robot	Motor	Legs	DOFs	L(m)	M(kg)	Motor Mass (%)	Gear
Minitaur	T-motor U8	4	8	0.2	5	40	No
Delta Hopper	T-motor U8	1	3	0.2	2	38	No
Jerboa	T-motor U8	2	4	0.105	2.5	40	No
MIT Cheetah	Custom	4	12	0.275	33	24	5.8
XRL	Maxon EC45	6	6	0.2	8	11	23
ATRIAS	MF0150010	2	6	0.42	60	11	50
StarlETH	Maxon EC4-pole	4	12	0.2	23	16	100

2.2.2 Ιδιοδεκτική επενέργηση και αίσθηση του περιβάλλοντος

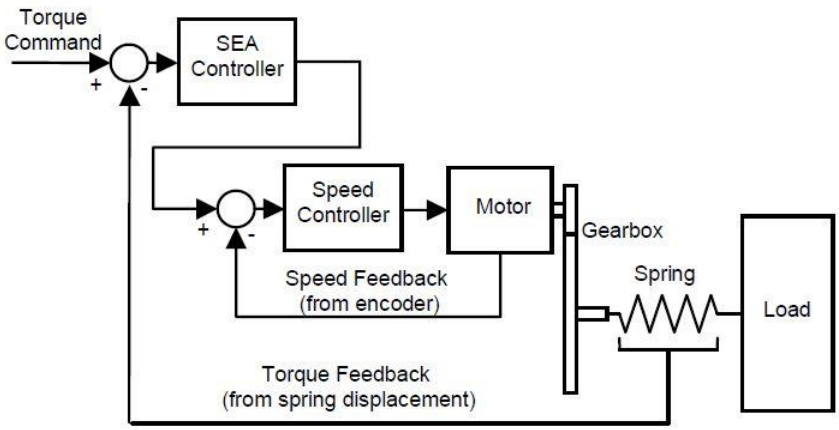
Στις εφαρμογές των τετράποδων ρομπότ είναι σημαντική η γνώση της αλληλεπίδρασης του ρομπότ με το περιβάλλον που εκφράζεται μέσω των δυνάμεων που αναπτύσσονται. Άρα είναι απαραίτητη η αίσθηση της δύναμης όπου για λόγους αδράνειας και αντοχής είναι καλό να μην γίνεται με την χρήση αισθητήρων δύναμης, εκτός και εάν η επενέργηση γίνεται με κινητήρα και κιβώτιο υψηλής μείωσης, και η αίσθηση αυτής να γίνει μέσω ιδιοδεκτικών παραμέτρων του σχήματος επενέργησης (π.χ. ρεύμα) του ρομπότ.

Μία από τις μεθόδους που διατηρείται η παρουσία του κιβωτίου αλλά πραγματοποιείται ιδιοδεκτική αίσθηση, είναι αυτής της ελαστικής επενέργησης σειράς (**Series Elastic επενέργησης SEA)** όπως εφαρμόζεται στα ρομπότ StarlETH [33] και ATRIAS [30]. Εκεί το κιβώτιο είναι σε σειρά με το στροφικό ελατήριο και έτσι απομονώνεται το κιβώτιο από το περιβάλλον κατά κάποιο τρόπο. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι προστατεύεται το κιβώτιο από έντονες κρούσεις του ποδιού με το περιβάλλον καθώς και την προσωρινή αποθήκευση ενέργειας. **Μέσω της μεταβολής της θέσης του στροφικού ελατηρίου είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί αίσθηση της δύναμης** που έχει προκληθεί στο πέλμα του ποδιού, [51]. Η μέθοδος προσφέρει μεγάλη ακρίβεια στην αίσθηση της δύναμης, όμως έχει το μειονέκτημα πως επειδή η εφαρμογή του αλγορίθμου για virtual leg compliance και για ιδιοδεκτική αίσθηση της δύναμης απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης, αυτό δεν επιτυγχάνεται τόσο καλά αφού η παρουσία του ελατηρίου λειτουργεί ως ένα χαμηλοπερατό μηχανικό φίλτρο. Όσο το ελατήριο γίνεται πιο στιβαρό ο έλεγχος του κινητήρα και το εύρος ζώνης αυξάνονται με το μειονέκτημα όμως να μειώνεται η ανάλυση της δύναμης αφού η μηχανική ενδοτικότητα μειώνεται και η εμπέδηση αυξάνεται. Αντίθετα, όταν η στιβαρότητα του ελατηρίου μειώνεται το ελατήριο λειτουργεί ως ένα μηχανικό φίλτρο στο εύρος ζώνης της λειτουργίας του κινητήρα το οποίο οδηγεί τελικά σε μείωση της ταχύτητας και του εύρους ζώνης για τον έλεγχο δύναμης.

Μία άλλη μέθοδος για την αίσθηση και τον έλεγχο της ροπής μέσω αυτού του τρόπου επενέργησης είναι αν λάβουμε τον κινητήρα ως πηγή ταχύτητας και όχι ως πηγή ροπής, [92]. Αυτό έχει το πλεονέκτημα πως ο εσωτερικός κλειστός βρόχος ταχύτητας του κινητήρα ω_{mech}, βλ. Σχήμα 2-2, αντισταθμίζει τις τριβές και την χάρη οδοντών, των οδοντωτών τροχών κατά την μετάδοση της κίνησης χωρίς περαιτέρω ρύθμιση των κερδών του εξωτερικού κλειστού βρόχου ροπής, αποκτώντας την επιθυμητή ταχύτητα και όπως θα δούμε παρακάτω και ροπή, [92]. Αν ληφθεί η ταχύτητα ως παράμετρος αναφοράς σε ένα σύστημα ελέγχου, η επιθυμητή ροπή του φορτίου προκύπτει σύμφωνα με την παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου, [92].

$$\omega_{mech} = \tau_{load}\left(\frac{1}{J_{load}s} + \frac{s}{k_{series}}\right) \tag{2-6}$$

όπου J_{load} είναι η ροπή αδράνειας του φορτίου, k_{series} είναι η στιβαρότητα του ελατηρίου που χρησιμοποιείται, τ_{load} είναι η ροπή του φορτίου και s είναι η μεταβλητή Laplace.



Σχήμα 2-2. Ο εσωτερικός κλειστός βρόχος ταχύτητας για τον έλεγχο της ροπής εξόδου στη SEA βοηθάει να ξεπεραστούν μη γραμμικά φαινόμενα και η τριβή, [92].

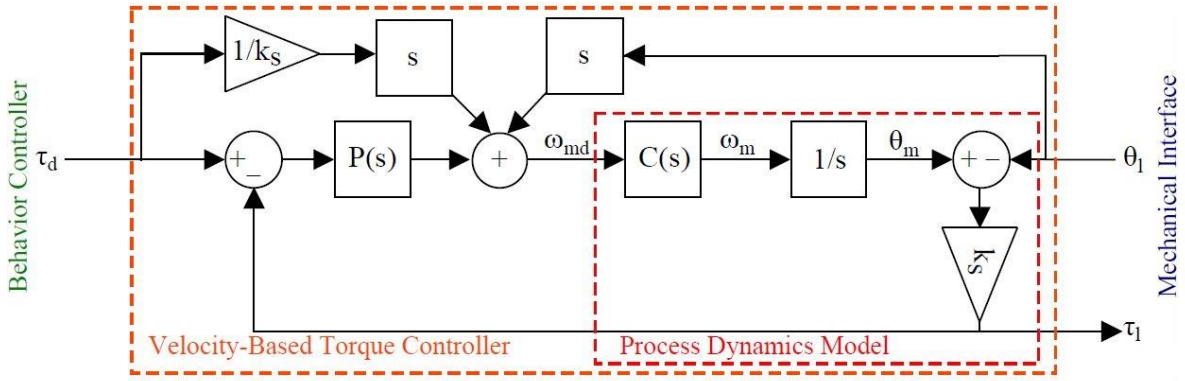
Παρόλα αυτά αυτή η μέθοδος είναι δύσκολο να εφαρμοστεί στα ρομπότ με πόδια, αφού η ροπή αδράνειας του φορτίου δεν είναι εύκολα υπολογίσιμη καθώς το φορτίο αλλάζει ανάλογα με τη φάση του βαδίσματος και την θέση του πέλματος σε σχέση με το έδαφος, [66]. Οι Schepelmann και Geyer πρότειναν λύση σε αυτό, ισχυριζόμενοι πως στην υλοποίηση της παραπάνω μεθόδου δεν είναι απαραίτητη η γνώση της ροπής αδράνειας του φορτίου. Ουσιαστικά ισχυρίστηκαν ότι η ροπή του φορτίου προκαλείται από την παραμόρφωση του ελατηρίου και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\tau_{load} = -k_{series}(\theta_{load} - \theta_{mech}) \tag{2-7}$$

Όπου θ_{load} είναι η θέση του φορτίου και μπορεί να υπολογιστεί με έναν αισθητήρα θέσης και θ_{mech} είναι η μεταβολή της θέσης του κινητήρα. Γράφοντας την θέση του κινητήρα συναρτήσει της ταχύτητάς του, με βάση την σχέση $\theta_{mech}=\omega_{mech}/s$, τότε η Εξ. (2-7) γίνεται, [92].

$$\omega_{mech} = \frac{\tau_{load}}{k_{series}} + \theta_{load} s \tag{2-8}$$

Παρατηρούμε ότι η ροπή αδράνειας του φορτίου δεν υπάρχει σε αυτή την εξίσωση. Στο Σχήμα 2-3, βλέπουμε την σχηματική υλοποίηση της μεθόδου από τους Schepelmann και Geyer, όπου η Εξ. (2-8) έχει υλοποιηθεί ως feed-forward αντιστάθμιση στην ταχύτητα αναφοράς, P(s) είναι ένας P-D ελεγκτής για αβεβαιότητες του μοντέλου και C(s) είναι το μοντέλο του ελεγκτή του κινητήρα.



Σχήμα 2-3. Σύστημα ελέγχου με SEA βασιζόμενο σε ταχύτητα, [66].

2.2.3 Μηχανική στιβαρότητα

Οι μεταδόσεις κίνησης γενικότερα προσθέτουν ένα επιπλέον βαθμό πολυπλοκότητας κατά τον σχεδιασμό της μεθόδου επενέργησης. Λόγω της ευάλωτης συμπεριφοράς στην παρουσία έντονων κρουστικών φορτίων είναι σημαντικό οι μειωτήρες να είναι πιο παχιοί με μεγαλύτερα δόντια, μεγαλύτερη τριβή και μεγαλύτερη χάρη οδοντών το οποίο προσθέτει βάρος και πολυπλοκότητα στον έλεγχο, [34], [81].

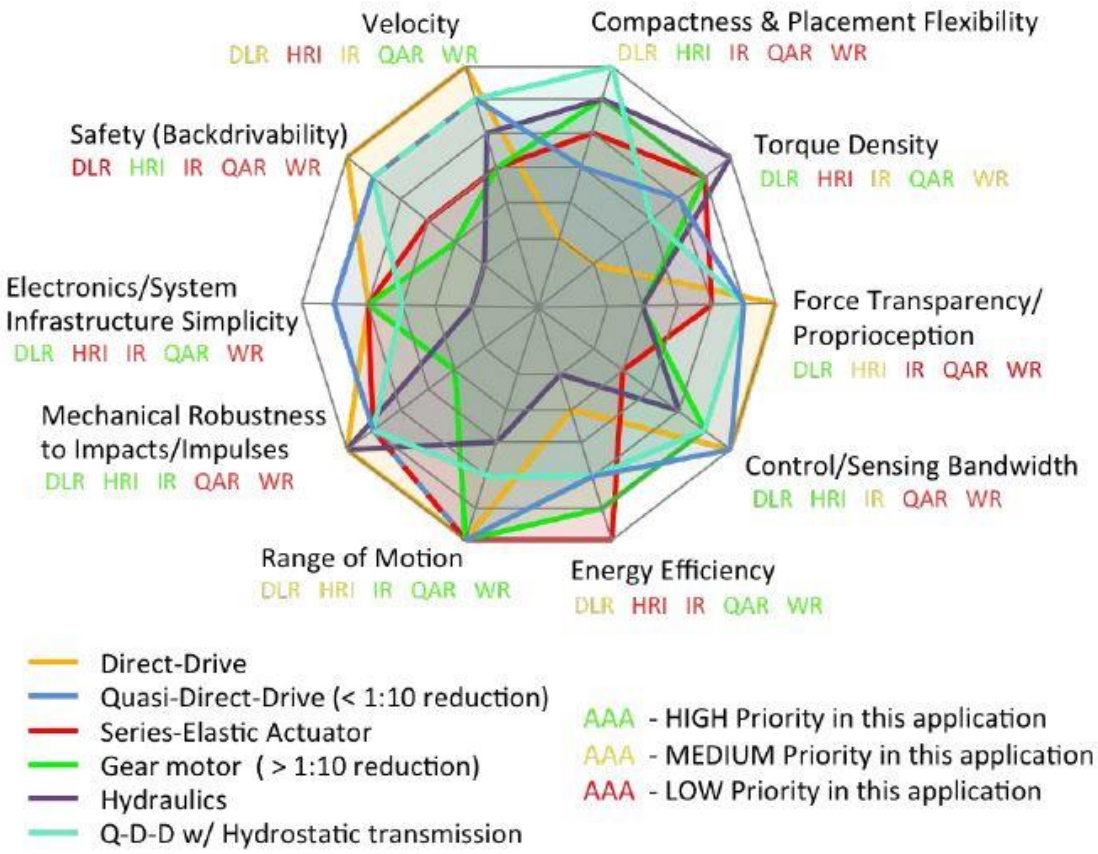
Για την αποφυγή αυτών λύση είναι η χρησιμοποίηση επενέργησης απευθείας οδήγησης όπου δεν υπάρχει μετάδοση κίνησης και η άρθρωση του ποδιού του ρομπότ συνδέεται άμεσα με το δρομέα του κινητήρα. Βέβαια δεν είναι πάντα εφικτή η εξάλειψη της μετάδοσης κίνησης και γι' αυτό λύση σε αυτό θα ήταν η χρησιμοποίηση **ιμάντων κίνησης v-belt,** τα οποία μπορούν να δεχτούν με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα κρουστικά φορτία όπως στην περίπτωση του **Laelaps**. Παρουσιάζουν όμως το μειονέκτημα πως μπορεί να ολισθήσουν και να παρουσιαστεί σφάλμα στον έλεγχο που για την απόρριψή του πρέπει να μοντελοποιηθεί. Άλλες προσπάθειες που μετριάζουν την επιρροή των κρούσεων είναι μέσω της εφαρμογής του Series Elastic η οποία όπως είπαμε απομονώνει την σχέση μετάδοσης από τα κρουστικά φορτία και αποθηκεύει ενέργεια.

2.2.4 Ενεργειακή αποδοτικότητα

Ενώ οι μεταδόσεις κίνησης υπόκεινται σε κρουστικά φορτία που επηρεάζουν την λειτουργία τους, οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν απευθείας οδήγηση είναι ευάλωτες στην παραγωγή θερμικής ενέργειας, επειδή εργάζονται σε σημεία λειτουργίας υψηλής ροπής που δεν είναι το πιο αποδοτικό σημείο λειτουργίας των κινητήρων. Άρα αυτά υποφέρουν από θερμική υπερθέρμανση. Γι' αυτό η χρήση μικρής βαθμίδας μείωσης θα μείωνε κατά πολύ το ρεύμα για την ίδια ροπή χωρίς να έχει τις επιπτώσεις της μεγάλης μείωσης. Ουσιαστικά μείωση της απώλειας ενέργειας σε ποσοστό μI^2R όπου μ είναι το ποσοστό μείωσης του ρεύματος που απαιτείται για την παραγωγή ροπής θα ήταν αξιόλογο να επιτευχθεί, παρά το 3-5% των παραπάνω απωλειών στην σχέση μετάδοσης και την αμελητέα αύξηση της πολυπλοκότητας του συστήματος. Το MIT Cheetah χρησιμοποιεί την μέθοδο αυτή με μικρή μείωση 5.8:1 μέσω μίας βαθμίδας πλανητικού συστήματος με τη ιδιοδεκτική αίσθηση της δύναμης να έχει σφάλμα μικρότερο από το 5%, [70].

2.3 Διάφορες γενικές μέθοδοι επενέργησης

Κάθε μία από τις γενικές μεθόδους επενέργησης που έχουμε αναφέρει, είδαμε ότι εμφανίζει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα. Στη συγκεκριμένη ενότητα για κάθε ένα σχήμα επενέργησης αναφερόμαστε σε αυτά πιο συγκεντρωτικά πιο συγκεντρωτικά. Με όσα έχουμε δει μέχρις στιγμής, στόχος είναι η μεγάλη **πυκνότητα ροπής (torque density),** η ευκολία να αισθάνονται οι αρθρώσεις τις δυνάμεις στα πόδια **(force transparency),** η **μηχανική αντοχή (mechanical robustness)** και η **ενεργειακή απόδοση (energy efficiency).** Στο Σχήμα 2-4, αξιολογούνται οι μέθοδοι επενέργησης, ως προς τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους και ως προς τις δυνατότητες ανάλογα με την εφαρμογή που προορίζονται όπως για παράδειγμα ρομπότ με πόδια **(Dynamic Legged Robots),** Ανθρωποειδή ρομπότ **(Human interaction robots)**, Βιομηχανικά ρομπότ (**Industrial or Manufacturing Robots)**, ιπτάμενα ρομπότ**(Quadrotors/Aerial robots -drones)** και ρομπότ με τροχούς **(wheeled robots)**.



Σχήμα 2-4. Σύγκριση των μεθόδων επενέργησης ως γνώμονα τις απαιτήσεις της εφαρμογής στην οποία συμμετέχουν. Dynamic Legged Robots (DLR), Human interaction robots (HRI), Industrial or Manufacturing Robots(IR), Quadrotors/Aerial robots(QAR) και wheeled robots(WR). Η ιδανική μέθοδος είναι αυτή που περικλείει το μεγαλύτερο εμβαδόν μέσα στο πολύγωνο.

2.3.1 Κινητήρες με μεγάλο βαθμό μείωσης (GM)

Παρόλο που η τοποθέτηση ενός μειωτήρα σε σειρά με έναν κινητήρα μπορεί να αυξήσει την ειδική ροπή, αντιθέτως όμως αυξάνει την πολυπλοκότητα του ελέγχου και την ανακλώμενη αδράνεια (αδράνεια από την μεριά του ποδιού), ενώ η αποδοτικότητα μειώνεται και μικραίνει η στιβαρότητα της κατασκευής.

Η πολυπλοκότητα του ελέγχου προκύπτει από το γεγονός ότι υπάρχει δυσκολία στην μοντελοποίηση των μη γραμμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στους μειωτήρες και που συνδέονται με τη χάρη οδοντών, τις τριβές που αναπτύσσονται μεταξύ των οδοντών και περιλαμβάνουν τριβές Coulomb και ιξώδης τριβή. Οι τριβές, η χάρη οδοντών, η αύξηση της ανακλώμενης ροπής αδράνειας είναι λόγοι για τους οποίους το back-drivebility είναι πολύ μειωμένο και ως εκ τούτου οι δυνάμεις που αναπτύσσονται από το έδαφος «κρύβονται» από το κιβώτιο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην «φαίνονται» και να μην μπορεί να τις αισθανθεί ο κινητήρας, προκαλώντας την μέτρηση δύναμης μέσω του ρεύματος μη καλή μέθοδο για την μέτρηση της δύναμης στο πέλμα του ποδιού του ρομπότ. Μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου το φορτίο και ο ρυθμός με τον οποίο αλλάζει το φορτίο είναι στην ίδια κατεύθυνση και η εξωτερική ταχύτητα είναι πάνω από ένα όριο και δεν αλλάζει πρόσημο, η παρακολούθηση του ρεύματος μπορεί να αποδειχθεί καλός δείκτης για την αίσθηση της ροπή της μεθόδου επενέργησης, [20].

Η χρησιμοποίηση κιβωτίων υψηλής τεχνολογίας, όπου η χάρη οδοντών είναι αρκετά μειωμένη σχεδόν μηδενική και ο αριθμός των βαθμίδων μικρός, είναι απαραίτητη. Οι αρμονικές μεταδόσεις (**harmonic drives**) αποτελούν μία τέτοια περίπτωση με μηδενική χάρη οδοντών και γενικά μικρό βάρος αλλά ο μεγάλος λόγος μείωσης προκαλεί πολύ μεγάλη αύξηση της ροπής αδράνειας. Επίσης υπάρχει και η χρήση των cycloid drives αλλά επίσης έχουν μεγάλη μείωση και άρα μεγάλη ανακλώμενη ροπή αδράνειας και ως εκ τούτου το back-drivebility είναι μικρό. Επίσης έχουν χαμηλό βαθμό απόδοσης αφού βασίζονται στην ολίσθηση.

Όλα αυτά τα φαινόμενα και κυρίως της χάρης οδοντών, προκαλούν και τη μείωση του εύρους ζώνης του συστήματος. Ουσιαστικά όταν έχουμε ένα σύστημα, αυτό χαρακτηρίζεται από μία συνάρτηση μεταφοράς και από αυτή προκύπτει το εύρος ζώνης του συστήματος που δείχνει πόσο γρήγορα και ποιοτικά αποκρίνεται το σύστημα σε περιοδική είσοδο. Για περισσότερες πληροφορίες αναφερόμαστε στο Παράρτημα εκτενέστερα, για το εύρος ζώνης ενός συστήματος

Τέλος η στους κινητήρες με μειωτήρες η ανακλώμενη ροπή αδράνειας αυξάνει και αυτό γιατί ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις.

$$\tau_{in}\omega_{in} = \tau_{out}\omega_{out} \tag{2-9}$$

Που αν θεωρήσουμε ότι έχουμε βαθμό μείωσης n τότε ισχύει:

$$\begin{aligned} \omega_{out} &= \frac{1}{n}\omega_{in} \\ \tau_{out} &= n\tau_{in} \end{aligned} \tag{2-10}$$

Και ως εκ τούτου προκύπτει από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα ότι:

$$\tau_{out} = J_{\pi o\delta\iota o\acute{\upsilon}}\dot{\omega}_{out} \tag{2-11}$$

Και λόγω των προηγούμενων σχέσεων ισχύει ότι

$$\tau_{in} = \frac{1}{n^2} J_{\pi o\delta\iota o\acute{\upsilon}}\dot{\omega}_{in} \tag{2-12}$$

Έτσι όπως φαίνεται από τον κινητήρα το φορτίο επιταχύνεται σαν το κιβώτιο και το φορτίο να έχουν αντικατασταθεί από ένα φορτίο χωρίς την χρήση κιβωτίου με ροπή αδράνειας $J_{\delta\rho o\mu\acute{\varepsilon}\alpha}/n^2$. Αν όμως στον μηχανισμό ασκήσουμε ροπή από εξωτερικά (από το περιβάλλον) η ανακλώμενη ροπή αδράνειας είναι $J_{\delta\rho o\mu\acute{\varepsilon}\alpha}n^2$ και ως εκ τούτου έχει αυξηθεί πολύ και επηρεάζει το back-drivebility.

Τέλος τα δόντια των οδοντωτών τροχών κατά κρούσεις, δέχονται δυνάμεις κυρίως διατμητικές αναγκάζοντας αυτά σε μεγάλες καταπονήσεις. Σε αντίθεση με τα πλανητικά που οι δυνάμεις αυτές κατανέμονται σε όλα τα δόντια, στα απλά κιβώτια (spur gears), τις καταπονήσεις τις δέχονται 1-2 δόντια. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις δίνονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\tau_{\delta\iota\alpha\tau\mu.} = \frac{F_{\kappa\rho o\acute{\upsilon}\sigma\eta\varsigma}}{A_{\delta o\nu\tau\iota o\acute{\upsilon}}} \tag{2-13}$$

Επειδή η επιφάνεια είναι μικρή ακόμα και για μικρές κρούσεις οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι αρκετά μεγάλες με συνέπεια, να χρησιμοποιούνται πολύ ισχυρά υλικά για εφαρμογές μεγάλων ροπών.

2.3.2 Series Elastic Actuation

Ο λόγος που αναπτύχθηκε αυτή η μέθοδος επενέργησης ήταν προκειμένου να μετριάσει τα αρνητικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τους μηχανισμούς μετάδοσης και προκειμένου να γίνεται η αίσθηση της ροπής με μεγαλύτερη ακρίβεια. Επίσης μέσω των μεθόδων SEAs προσφέρεται μηχανική ευρωστία αφού η ύπαρξη του ελατηρίου αποσβένει τα κρουστικά φαινόμενα χρησιμοποιώντας την ελαστική ενέργεια καθώς επίσης ανακυκλώνεται και η ενέργεια από βηματισμό σε βηματισμό. Για την ακρίβεια μία μεγάλη εφαρμογή της μεθόδου αυτής όπως αναφέραμε προηγουμένως είναι για τον έλεγχο δύναμης και χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπου πρέπει να υπάρχει ακριβή αλληλεπίδραση του ρομπότ με το περιβάλλον του. Η ακρίβεια στην αίσθηση ροπής είναι αρκετά καλύτερη από ότι μέσω του ρεύματος, [34]. Αυτός ο έλεγχος βασίζεται στον νόμο του Hooke και την Εξ. (2-14), και το μόνο που χρειάζεται είναι καλή γνώση της θέσης μέσω ενός αισθητήρα θέσης (encoder) και γνώση της σταθεράς του ελατηρίου.

$$\tau = k_s \theta \tag{2-14}$$

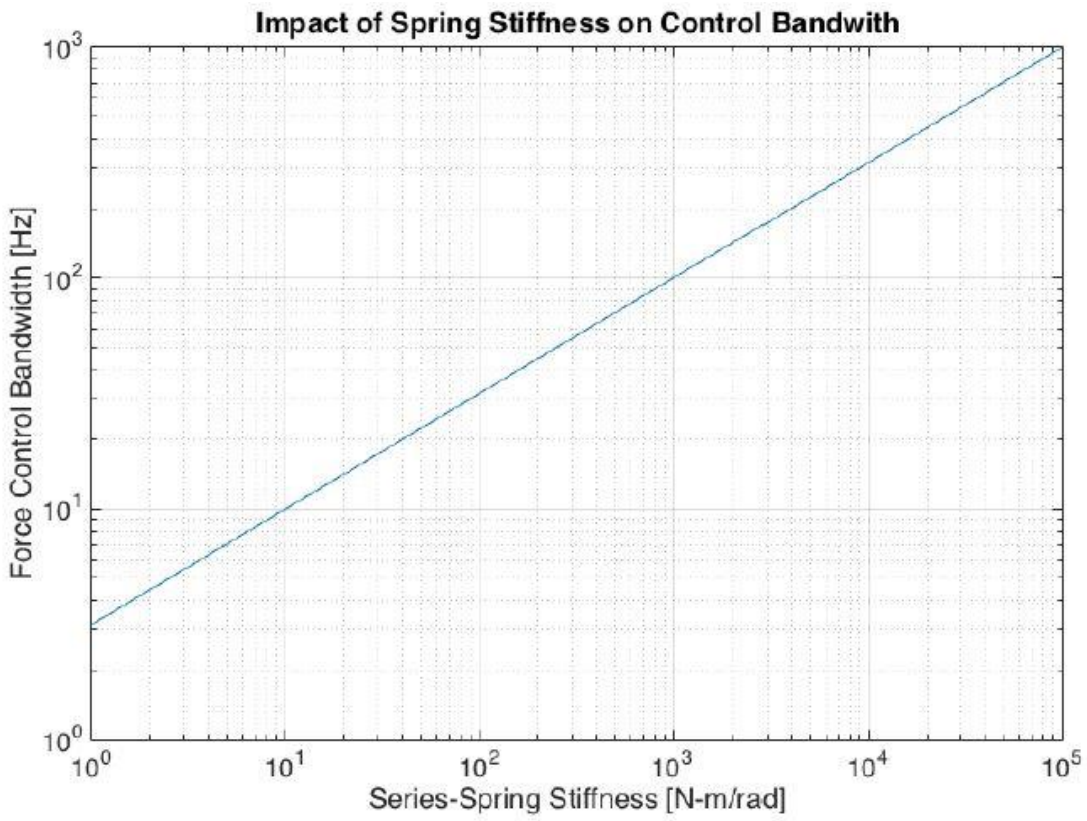
Επίσης η ανακύκλωση ενέργειας είναι πολύ πιο σημαντική όταν πρόκειται για εφαρμογές όπως όταν τα ρομπότ που αναπηδούν (hopping robots) αφού υπάρχει μία κυκλική διαδικασία. Κυκλικά ανακυκλώνουν ενέργεια και από τις κρούσεις με το έδαφος και μεταφέρει αυτή την ενέργεια για την επόμενη απογείωση. Έτσι μικρότερο ποσό ενέργειας απαιτείται από τους επενεργητές και για παράδειγμα το ρομπότ ATRIAS ανακυκλώνει περίπου 40J από κάθε στροφικό ελατήριο που έχει 3500Nm/rad κατά την επαφή με το έδαφος (stance) και για βηματισμό τρεξίματος, [30].

Ενώ αυτή η μέθοδος επενέργησης παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα που αναφέραμε, έχει το μειονέκτημα της αυξημένης πολυπλοκότητας του συστήματος ελέγχου αφού χρειάζεται καλή μοντελοποίηση της ενδοτικότητας στην αντίστροφη κινηματική και στο έλεγχο ροπής.

Τέλος ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το γεγονός πως το ελατήριο σε σειρά αποτελεί ένα μηχανικό χαμηλοπερατό φίλτρο δεύτερης τάξης. Το ελατήριο ουσιαστικά αποσβένει τις κρούσεις που είναι θετικό για τα υπόλοιπα μηχανικά μέρη αλλά μειώνει το εύρος ζώνης που όπως είπαμε είναι μείζονος σημασίας για μηχανικά συστήματα όπου κρίνεται απαραίτητη η γρήγορη ενεργοποίηση και παραγωγή δύναμης. Η κύρια παράμετρος που καθορίζει τις μέγιστες συχνότητες κατά τις οποίες ο κινητήρας μπορεί να επιβάλει κάποια ροπή και να ακολουθήσει τροχιές καθορίζεται από την ακαμψία του μηχανικού ελατηρίου. Χρησιμοποιώντας ένα απλό μοντέλο SEA όπως αυτό στο Σχήμα 2-4α, το θεωρητικό εύρος ζώνης μπορεί να προκύψει βρίσκοντας τη φυσική συχνότητα του συστήματος. Το εύρος ζώνης του κινητήρα είναι συνάρτηση του λόγου μείωσης, της ακαμψίας και της ροπής αδράνειας του κινητήρα, [81].

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_s}{n^2 I_m}} \tag{2-15}$$

Στην διπλωματική [34] βρίσκεται πειραματικά το πως επηρεάζεται το εύρος ζώνης της μεθόδου επενέργησης ανάλογα με την ακαμψία του ελατηρίου. Ως κινητήρας χρησιμοποιήθηκε ο U10 της T-motor, βλ. Σχήμα 2-5.



Σχήμα 2-5. Η μεταβολή του εύρους ζώνης της μεθόδου επενέργησης σε συνάρτηση με την ακαμψία του ελατηρίου. Ως είσοδο δίνεται μεταβαλλόμενη ημιτονοειδής ροπή και μετριέται η έξοδος με αισθητήρα ροπής, [34].

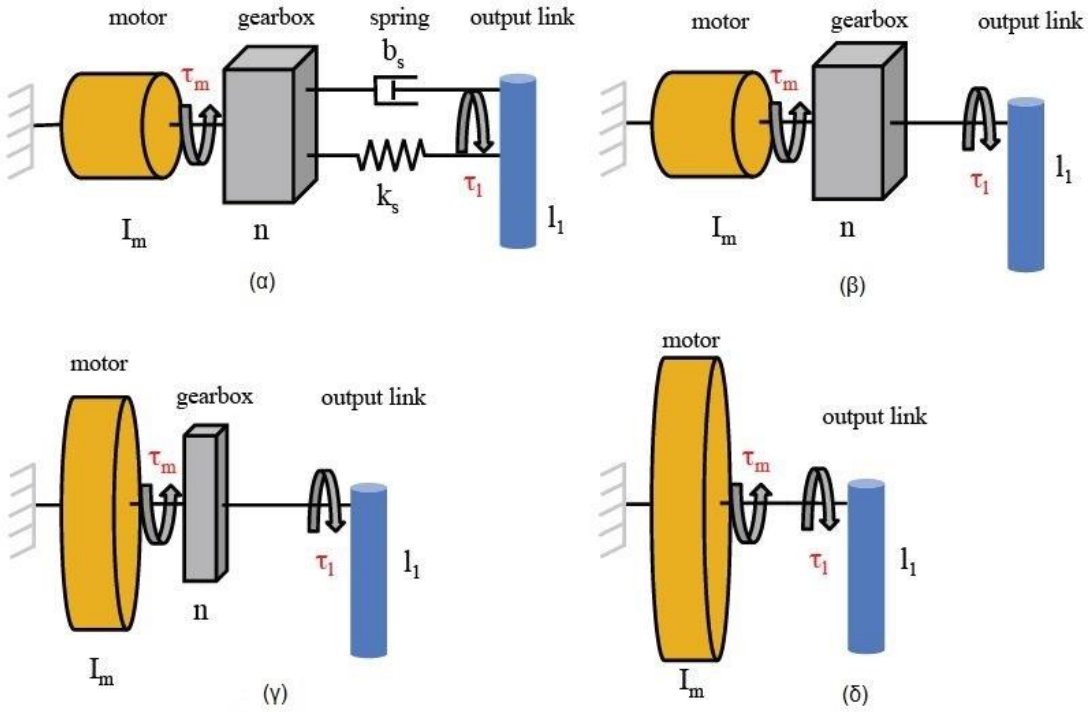
2.3.3 Direct-Drive και Quasi Direct-Drive

Όπως είδαμε η χρησιμοποίηση μεγαλύτερων κινητήρων, μεγαλύτερης ακτίνας διακένου, για την παραγωγή μεγαλύτερης ροπής ώστε να μην υπάρχει πλέον η ανάγκη για χρήση μειωτήρων μπορεί να αυξάνει την μάζα και τον όγκο, αλλά η δύναμη από το πόδι στους κινητήρες περνάει με ευκολία αφού δεν υπάρχουν στοιχεία έντονης τριβής και αδράνειας όπως στην περίπτωση των μειωτήρων (**high force transparency**). Οι δυνάμεις **στο πόδι** μεταφέρονται **στις αρθρώσεις του ποδιού** και από εκεί **στο διάκενο στάτη δρομέα του κινητήρα**. Επίσης υπάρχει πολύ υψηλό εύρος ζώνης για ιδιοδεκτικό έλεγχο δύναμης και εικονική ενεργητική ενδοτικότητα αφού το μόνο που επηρεάζει το εύρος ζώνης του συστήματος επενέργησης είναι το εύρος ζώνης του ίδιου του κινητήρα. Επίσης δεν υπάρχουν μηχανικά στοιχεία που πρέπει να προστατευτούν από κρουστικά φορτία κατά το τρέξιμο και την αναπήδηση εμποδίων [2], [35] και ως εκ τούτου σχεδιασμοί με απευθείας οδήγηση, επιφέρουν μεγαλύτερους χρόνους ζωής του ρομπότ.

Τυπικά αυτός ο σχεδιασμός πλεονεκτεί σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες από τις προηγούμενες μεθόδους με το μειονέκτημα να βρίσκεται στην παραγωγή ροπής και στην κατανάλωση ενέργειας. Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, είδαμε πως στον συγκεκριμένο σχεδιασμό επειδή πρέπει να παράγουν οι κινητήρες την μέγιστη ροπή δεν εργάζονται στο πιο αποδοτικό σημείο λειτουργίας αφού διαρρέεται από μεγάλο ρεύμα και η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνεται από την αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη και διαχέεται ως θερμική, είναι μεγάλη. Μία λύση όπως στο μηχανισμό επενέργησης του MIT Cheetah είναι η χρήση μικρής μείωσης με μέγιστο 1:10, μέσω πλανητικού

συστήματος που αυξάνει την ειδική ροπή, βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση του κινητήρα και δεν φέρνει τα αρνητικά αποτελέσματα της μεγάλης μείωσης διατηρώντας τα θετικά της απευθείας οδήγησης. Επίσης στα πλανητικά συστήματα βρίσκονται σε επαφή ταυτόχρονα περισσότερα δόντια σε σχέση με την απλή μείωση και εμφανίζουν μεγαλύτερη ευρωστία στις κρούσεις και διάρκεια ζωής. Αυτή η μικρή μείωση δεν αυξάνει στον ίδιο βαθμό την μηχανική εμπέδηση με αποτέλεσμα να διατηρείται η ιδιοδεκτική αίσθηση της δύναμης. Τέλος τα πλανητικά συστήματα είναι συμπαγή, χαμηλού βάρους και κόστους, έχουν πολύ μικρή χάρη οδοντών (μικρότερο από 0.21ο), υψηλή απόδοση ανά βαθμίδα (97%).

Στο Σχήμα 2-6, που ακολουθεί απεικονίζονται όλες οι μέθοδοι επενέργησης που αναλύσαμε.



Σχήμα 2-6. (α) SEA, (β) Geared Motors, (γ) Quasi Direct-Drive και (δ) Direct-Drive.

Τέλος μία τυπική σύγκριση του εύρους ζώνης των μεθόδων επενέργησης με χρήση των κινητήρων U10 της εταιρείας T-motor, ιδίας εταιρείας με τους κινητήρες T-motor U8 που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα διπλωματική, σε είσοδο ημιτονοειδής ροπής εξετάσθηκε στην διπλωματική, [34]. Ο τύπος της εισόδου ροπής ήταν της μορφής που φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$T = 0.75 + 0.25\sin(2\pi ft) \qquad (Nm) \tag{2-16}$$

Ο Πίνακας 2-2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για κάθε μέθοδο επενέργησης.

Πίνακας 2-2. Εύρος ζώνης μεθόδων επενέργησης στον κινητήρα T-motor U10, [34].

Μέτρηση	DD	QDD	GM	SEA
Εύρος Ζώνης(Hz)	250	90	40	60

Η παρούσα διπλωματική εστιάζει στην μέθοδο απευθείας οδήγησης DD χρησιμοποιώντας κινητήρες χωρίς ψήκτρες.

3 Μοντελοποίηση και Θεωρία κινητήρων χωρίς ψήκτρες

3.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια σε διαφόρου τύπου εφαρμογές, η χρησιμοποίηση κινητήρων σταθερού ρεύματος χωρίς ψήκτρες (brushless motors BLDC) σε αντίθεση με τους κινητήρες σταθερού ρεύματος με ψήκτρες (brushed motors BDC), γίνεται ολοένα και πιο κυριαρχική, παρά το γεγονός ότι εμφανίζουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην κατασκευή και το κόστος είναι σχετικά υψηλότερο καθώς συνοδεύονται από ειδικές οδηγήσεις μεγαλύτερων απαιτήσεων. Η αποδοτικότητα όμως των κινητήρων αυτών είναι αυξημένη και γενικά παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους BDC. Οι τριβές είναι μικρότερες και περιορίζονται κυρίως στις εδράσεις με συνέπεια επιπλέον να έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής από τους BDC. Στους τελευταίους η φθορά των ψηκτρών είναι ένα πολύ σύνηθες φαινόμενο οφειλόμενο κυρίως σε μηχανική φθορά από τη συνεχή τριβή αλλά και σε ηλεκτρική λόγω της παρουσίας ηλεκτρικών τόξων (sparks) που μπορεί να προκύψουν με αποτέλεσμα να χρειάζονται τακτικές επιδιορθώσεις. Έτσι η ανάγκη ενός κινητήρα που θα είχε ηλεκτρική οδήγηση (electrical commutation) και όχι μηχανική οδήγηση (mechanical commutation) και άρα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής έφερε ως συνέπεια την κατασκευή των κινητήρων χωρίς ψήκτρες. Γενικά έχει καταγραφεί ότι η έλλειψη συλλέκτη μπορεί να αποφέρει περισσότερες και από 10.000 ώρες λειτουργίας, [53].

Οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες εμφανίζουν πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών, π.χ. χρησιμοποιούνται σε σκληρούς δίσκους αλλά και σε CD/DVD players. Επίσης πολύ διαδεδομένη είναι η χρήση τους σε ανεμιστήρες ηλεκτρικών κυκλωμάτων προκειμένου να υπάρχει ψύξη αλλά και σε συστήματα κίνησης πλυντηρίων. Επίσης χρησιμοποιούνται σε ασύρματα ηλεκτρικά εργαλεία αφού η μεγαλύτερη αποδοτικότητα που εμφανίζουν, καθυστερεί την επαναφόρτιση της μπαταρίας. Τέλος η χρήση τους τα τελευταία χρόνια έχει επεκταθεί σημαντικά και στα ρομποτικά συστήματα αφού το γεγονός πως είναι κινητήρες χωρίς ψήκτρες τους επιτρέπουν κατασκευαστούν με διάφορες παραλλαγές που θα αναλυθούν παρακάτω και οι οποίες επιτρέπουν μεγαλύτερη ροπή σε σχέση με την μάζα τους και την ισχύ τους.

Επίσης οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερη ροπή στο ονομαστικό φορτίο, αφού ειδικές κατασκευές με τον δρομέα να στρέφεται εξωτερικά αυξάνουν την διάμετρό του με ταυτόχρονη μείωση του μήκους του κινητήρα. Γενικά παράγονται σε ένα μεγάλο εύρος ισχύος που είναι από μερικά W μέχρι και KW. Ένα βασικό μειονέκτημα που αντιμετώπιζαν ωστόσο μέχρι πρότινος οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες είναι ότι για την ηλεκτρονική οδήγησή τους, μόνο δηλαδή για να περιστραφούν ήταν απαραίτητη η χρήση κάποιου αισθητήρα θέσης, όπως για παράδειγμα hall sensor, ή οπτικού κωδικοποιητή (optical encoder) ή και resolver, που πάντως σε εφαρμογή κλειστού ελέγχου θα χρειάζονται ούτως ή άλλως. Οι σημερινές τεχνολογίες έχουν άρει αυτό το μειονέκτημα πραγματοποιώντας μάλιστα speed control με μεθόδους που θα αναλυθούν παρακάτω όπως την zero crossing method πετυχαίνοντας οδήγηση χωρίς την χρήση αισθητήρων (sensorless commutation).

Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά θα μιλήσουμε για τα βασικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των κινητήρων χωρίς ψήκτρες (όπως για παράδειγμα η διαμόρφωση των πηνίων στον στάτη) αναλύοντας ταυτόχρονα και διάφορα μεγέθη που παίζουν σημαντικό ρόλο στην λειτουργία του όπως π.χ. ο αριθμός

των πόλων του κινητήρα και η μορφή της αντί-ηλεκτρικής δύναμης (ΑΗΕΔ) η οποία διακρίνεται ανάλογα με το αν ο κινητήρας είναι σταθερού ρεύματος χωρίς ψήκτρες (BLDC) ή κινητήρας σύγχρονος με μόνιμους μαγνήτες (**permanent magnet synchronous motor PMSM**). Ιδιαίτερα θα μελετηθούν οι δύο βασικές κατηγορίες κινητήρων που αναφέραμε, θα εστιάσουμε όμως στους σύγχρονους κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες (PMSM), οι οποίοι στην βιβλιογραφία μπορεί να αναφερθούν και ως κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς ψήκτρες (BLAC) ή/και κινητήρες μόνιμου μαγνήτη εναλλασσόμενου ρεύματος (PMAC). Θα διαπιστώσουμε και στο επόμενο κεφάλαιο ότι ο κινητήρας μας ανήκει σε αυτή την κατηγορία. Θα μελετήσουμε τους κινητήρες αυτούς από άποψη μοντελοποίησης και θα εξετάσουμε τα βασικά μαθηματικά που κρύβονται πίσω από ένα τέτοιο κινητήρα χωρίς όμως η ανάλυση να φτάσει πολύ βαθιά. Πιο συγκεκριμένα θα αναπτύξουμε τα μαθηματικά μοντέλα που διέπουν τους κινητήρες αυτούς αναλύοντας τις εξισώσεις τους σε κάθε φάση του κινητήρα, χρησιμοποιώντας ειδικά μοντέλα μετασχηματισμού, σε περιστρεφόμενα συστήματα συντεταγμένων ώστε η μελέτη να γίνει πιο εύκολα κατανοητή. Θα δούμε πως συνδέονται όλες αυτές μαζί ώστε να παράξουν κάτι τελικό και να μελετάται ουσιαστικά ο **κινητήρας ως μία μονάδα**. Μέσα από αυτήν την ανάλυση επίσης θα αναπτύξουμε μοντέλα που καθορίζουν τη σταθερά ροπής του κινητήρα, τη σταθερά δηλαδή που συνδέει την ροπή του κινητήρα με το ρεύμα που τροφοδοτείται σε αυτόν.

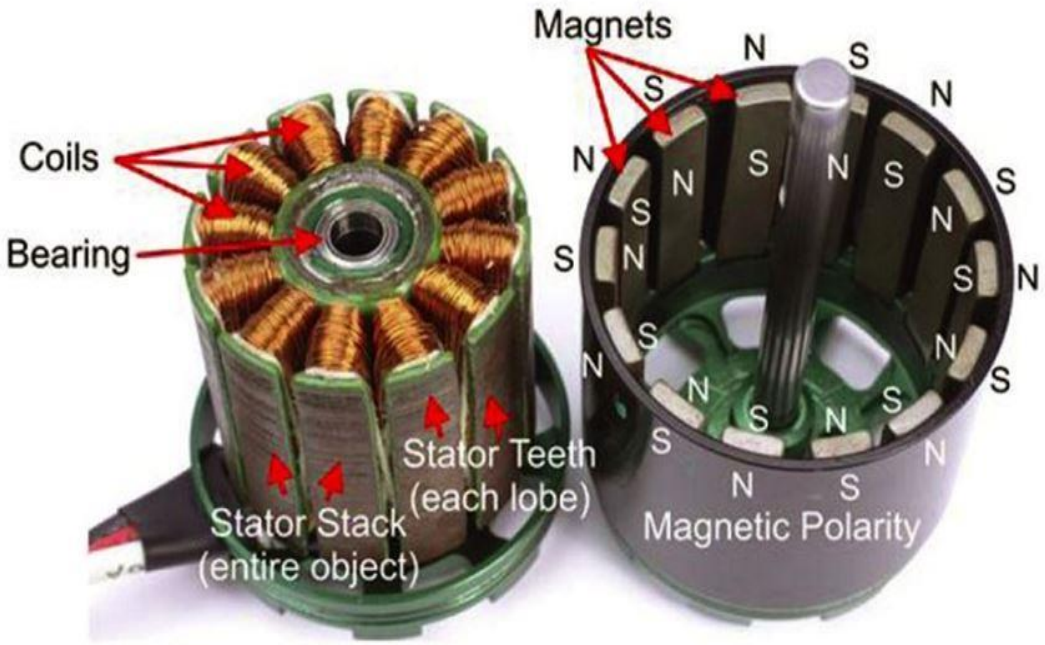
Τέλος θα μιλήσουμε για τις διάφορες μεθόδους που υπάρχουν σήμερα προκειμένου να οδηγούνται τέτοιου είδους κινητήρες αναλύοντας την τραπεζοειδή και την ημιτονοειδή οδήγηση με τις παραλλαγές τους, καθώς και θα αναφερθούμε σε πιο εσωτερικά θέματα της οδήγησης. Κλείνοντας το παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιάσουμε τις βασικές μεθόδους με τις οποίες οδηγήσαμε τον κινητήρα μας χρησιμοποιώντας διαφορετικούς μικροελεγκτές – οδηγητές.

3.2 Κατασκευή

Τα βασικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ενός κινητήρα χωρίς ψήκτρες είναι ο δρομέας κατασκευασμένος συνήθως από φερομαγνητικό υλικό που φέρει τους μόνιμους μαγνήτες ενσωματωμένους-εμφυτευμένους πάνω του έτσι ώστε να προκαλούν μία σταθερή διέγερση πεδίου (**field excitation**) και ο στάτης που φέρει τα πηνία του κινητήρα είτε σε **σύνδεση αστέρα** είτε σε **σύνδεση τριγώνου**. Ανάλογα με την εφαρμογή ο δρομέας του κινητήρα περιστρέφεται εξωτερικά δημιουργώντας έναν **κινητήρα outrunner** που παράγει μεγαλύτερη ροπή αλλά μικρότερη γωνιακή ταχύτητα από έναν κινητήρα που ο δρομέας περιστρέφεται εσωτερικά του στάτη (ονομαζόμενοι **inrunner κινητήρες**). Οι τελευταίοι χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπως τα RC (Remote control) cars, αφού το ζητούμενο σε αυτές τις εφαρμογές είναι η υψηλότερη ταχύτητα ενώ οι outrunners χρησιμοποιούνται κυρίως στην βιομηχανία των drones και σε ρομποτικές εφαρμογές. Στο Σχήμα 3-1, μπορούμε να δούμε όλα τα βασικά χαρακτηριστικά που αναφέραμε σε έναν τυπικό 3φασικό outrunner κινητήρα χωρίς ψήκτρες.

Οι κλασικοί κινητήρες προκειμένου να περιστραφούν χρησιμοποιούν τις ψήκτρες με την βοήθεια των οποίων αλλάζει η φορά του ρεύματος στα πηνία και άρα η φορά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ αυτών και των μόνιμων μαγνητών να συνεχίσουν να έχουν την ίδια κατεύθυνση και η ροπή να είναι πάντα θετική, παρότι ο δρομέας περιστρέφεται. Ίδια είναι η λογική η οποία πρέπει και κυριαρχήσει πίσω από την κατασκευή ενός

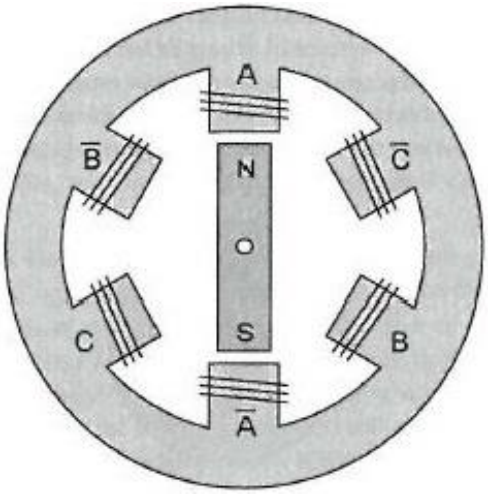
κινητήρα χωρίς ψήκτρες με τη διαφορά ότι η εντολή για αλλαγή στην πολικότητα δεν γίνεται μηχανικά αλλά ηλεκτρονικά και συγκεκριμένα από έναν κατάλληλο μικροελεγκτή. Προκειμένου να γίνει αυτό θα πρέπει να υπάρχει κάποιος αισθητήρας που να πληροφορεί τον μικροελεγκτή για την θέση του δρομέα και άρα έτσι να αλλάζει η πολικότητα και η φορά του ρεύματος. Αυτό θα μπορούσε να γίνει έχοντας και μία φάση μόνο όπως οι κινητήρες ΣΡ με μόνιμους μαγνήτες απλά η εμπειρία, η συστηματική μελέτη και η θεωρητική μελέτη έδειξε ότι ο καλύτερος αριθμός φάσεων για την λειτουργία ενός κινητήρα είναι με δύο ή τρεις φάσεις ώστε η ροπή που τελικά παράγει να είναι πιο ομοιόμορφη. Γενικά έχουν κατασκευαστεί κινητήρες και με περισσότερες από τρεις φάσεις που όμως η πολικότητα και οι απαιτήσεις σε άποψη υπολογιστικής ισχύος για την κατασκευή και την οδήγηση ενός τέτοιου κινητήρα είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με τα πλεονεκτήματα που φέρνει η προσθήκη επιπλέον φάσεων από μηχανικής απόψεως. Θα απαιτούσε μικροελεγκτές με πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες χωρίς τελικά αυτό να αποφέρει και πολύ μεγαλύτερες βελτιώσεις από άποψη απόδοσης και ροπής.



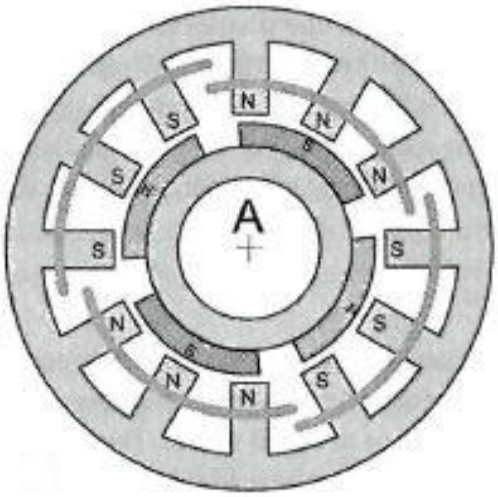
Σχήμα 3-1. Τυπικός τρι-φασικός κινητήρας χωρίς ψήκτρες. Ο κινητήρας αυτός είναι outrunner και μπορούμε να διακρίνουμε πολύ εύκολα τους μαγνήτες που είναι προσκολλημένοι πάνω στον δρομέα. Επίσης βλέπουμε τα πηνία στον στάτη που είναι σε συγκεντρωτική διάταξη με τις αντίστοιχες συνέπειες όπως θα δούμε παρακάτω. Τέλος ο αριθμός των μαγνητικών πόλων είναι 14 ενώ των πηνίων είναι 12 που είναι ένας από τους πιο κοινούς – σύνηθες συνδυασμούς, [9].

Ένας σημαντικός αριθμός στην κατασκευή ενός κινητήρα χωρίς ψήκτρες είναι ο **αριθμός των πόλων (Nm)**, δηλαδή ο αριθμός των μόνιμων μαγνητών που βρίσκεται στον δρομέα και γενικά ποικίλει. Ο γενικός κανόνας που ισχύει είναι ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων τόσο μεγαλώνει και η ροπή για το ίδιο ρεύμα αλλά μέχρι ενός σημείου γιατί μικραίνει αυτομάτως και ο χώρος που μοιράζεται μέσα στον δρομέα. Τελικά ο βέλτιστος συνδυασμός μαγνητικών πόλων είναι μία σύνθετη συνάρτηση που συσχετίζει τις ιδιότητες του υλικού που επιλέγεται και τη γεωμετρία, [25].

Επίσης όσον αφορά **τα τυλίγματα του στάτη** υπάρχουν συγκεκριμένες δομές και τροποποιήσεις με τις οποίες κατανέμονται τα τυλίγματα. Για παράδειγμα τα τυλίγματα μπορεί να είναι όπως φαίνονται στο Σχήμα 3-2, όπου κάθε πηνίο καταλαμβάνει συγκεκριμένο δόντι – πόλο του στάτη, διαμόρφωση που ονομάζεται συγκεντρωτική. Μπορεί όμως να έχουμε και διαμόρφωση όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-33, και στην οποία η διάταξη είναι κατανεμημένη και τα πηνία καλύπτουν παραπάνω από ένα δόντια του στάτη. Ουσιαστικά κάθε τύλιγμα ξεκινά από ένα δόντι και καταλήγει σε άλλο, σχηματίζοντας κατανεμημένο τύλιγμα. Η κατανομή των πηνίων (συγκεντρωτική ή κατανεμημένη) καθορίζει ως ένα βαθμό και την μορφή της ΑΗΕΔ που παράγει ο κινητήρας κάτι το οποίο είναι αναγκαίο αλλά όχι ικανό από μόνο του κριτήριο για να καθορίσουμε αν ένας κινητήρας είναι κινητήρας χωρίς ψήκτρες σταθερού ρεύματος (BLDC) ή κινητήρας σύγχρονος με μόνιμους μαγνήτες (PMSM - BLAC - PMAC).



Σχήμα 3-2. Τομή κινητήρα με τον δρομέα να περιστρέφεται εσωτερικά του στάτη με συγκεντρωτική κατανομή πηνίων. Κάθε πηνίο αρχίζει και τελειώνει στο ίδιο δόντι του στάτη.



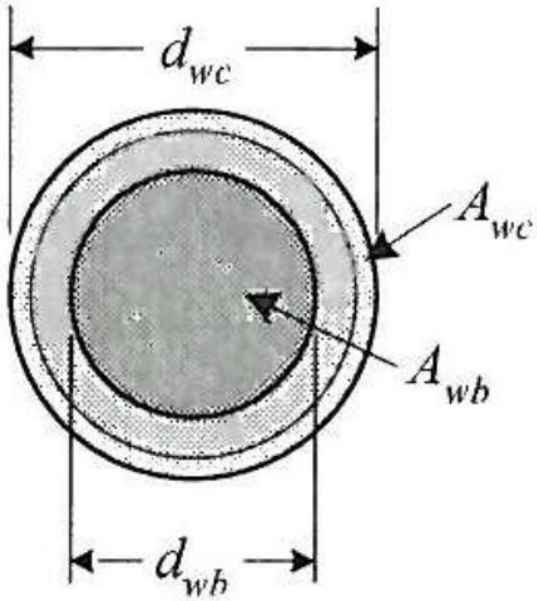
Σχήμα 3-3. Τομή κινητήρα με το δρομέα να περιστρέφεται εσωτερικά του στάτη με διανεμημένη κατανομή των πηνίων. Κάθε πηνίο αρχίζει σε ένα δόντι και τελειώνει σε άλλο δόντι, [25]. Δεξιά απεικονίζεται ο κινητήρας από το MIT Cheetah.

Τέλος τα τυλίγματα του στάτη μπορεί να είναι σε μορφή αστέρα ή σε μορφή τριγώνου με την μορφή τριγώνου θεωρητικά να εμφανίζει μικρότερη ροπή κατά τον χαρακτηριστικό αριθμό $\sqrt{3}$.

Όσον αφορά τη διάμετρο των τυλιγμάτων, αυτή καθορίζει την αντίσταση και τελικά το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να περάσει. Όσο μεγαλύτερη διάμετρος τόσο μικρότερη αντίσταση και τόσο περισσότερο ρεύμα μπορεί να περάσει. Επίσης για την αντίσταση ενός καλωδίου ισχύει η ότι εξαρτάται από την θερμοκρασία αφού η ειδική αντίσταση ρ του υλικού των τυλιγμάτων δίνεται από τον τύπο:

$$\rho(T) = \rho(T_o)[1 + a(T - T_o)] \tag{3-1}$$

όπου Το είναι η θερμοκρασία αναφοράς (συνήθως στους 20 ^oC). Γενικά τα πηνία του κινητήρα αποτελούνται από τρία βασικά μέρη όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-4, και στο οποίο φαίνεται το γυμνό καλώδιο με διάμετρο d_{WB} και επιφάνεια $A_{WB,}$ το υλικό για την μόνωση με επιφάνεια A_{WC} και ένα τελευταίο στρώμα που αποτελείται από ουσίες και βοηθάει τα στρώματα του καλωδίου να παραμένουν συνδεδεμένα αφού σχηματιστούν τα πηνία, [25].

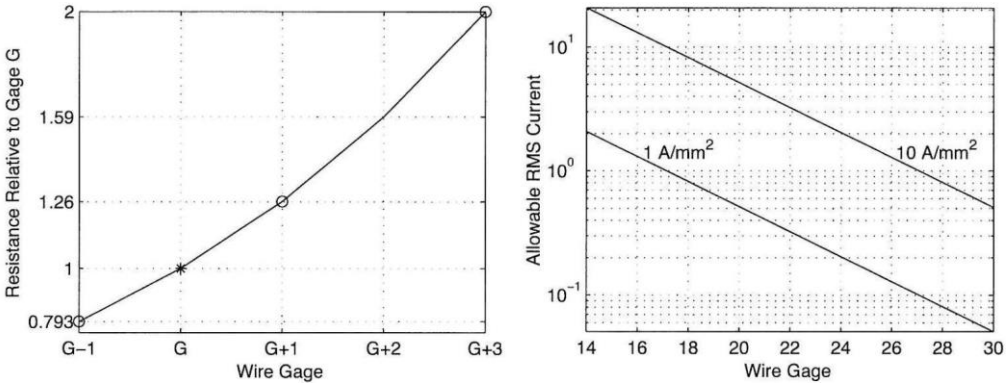


Σχήμα 3-4. Τομή καλωδίου στον κινητήρα που αποτελείται από τον χαλκό, την μόνωση και το συνδετικό στρώμα, [25].

Υπάρχουν διάφορες τυποποιήσεις για τα καλώδια και την διάμετρό τους μία εκ των οποίων είναι το American Wire Gage (AWG). Σε αυτό το πρότυπο η διάμετρος του χαλκού, δηλαδή το μέγεθος d_{wb} προκύπτει από μία γεωμετρική πρόοδο που έχει εξίσωση.

$$d_{wb} = 8.251463(0.8905257)^G \tag{3-2}$$

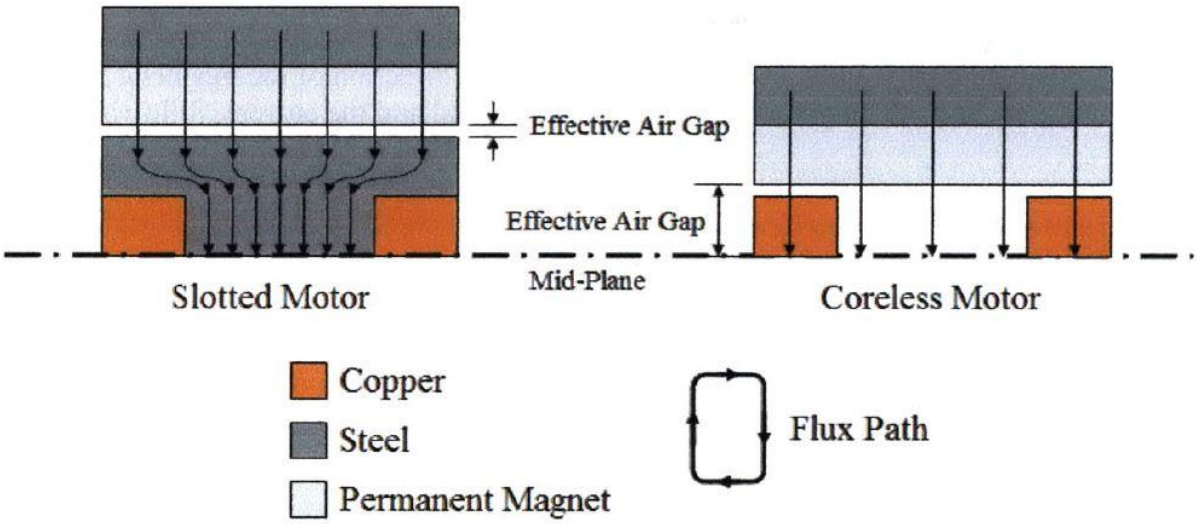
όπου G είναι χαρακτηριστικός αριθμός του προτύπου και κάθε καλώδιο χαρακτηρίζεται από αυτόν τον αριθμό. Το Σχήμα 3-5, συσχετίζει τις αντιστάσεις τυλιγμάτων και το επιτρεπόμενο ρεύμα που περνάει μέσα από αυτές καθώς αυξάνει ο αριθμός G.



(α) (β)

Σχήμα 3-5. (α) Επιτρεπόμενο ρεύμα καθώς αυξάνει ο συντελεστής G του προτύπου AWG. (β) Αντίσταση καθώς αυξάνει ο συντελεστής G του προτύπου AWG.

Επίσης ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που πρέπει να διερευνηθεί κατά την κατασκευή είναι η επιλογή πυρήνα ή όχι (coreless). Η χρήση πυρήνα στον κινητήρα αυξάνει την πυκνότητα μαγνητικής ροής B (Wb/m^2 ή H) με αποτέλεσμα η ροπή που προκύπτει να είναι πολύ μεγαλύτερη. Παρόλα αυτά όμως ο πυρήνας στον στάτη αυξάνει την μάζα του κινητήρα και τελικά η ειδική ροπή του κινητήρα δεν αλλάζει πολύ μεταξύ των δύο σχεδιασμών. Επίσης ο πυρήνας έχει υψηλή μαγνητική διαπερατότητα αναγκάζοντας το μαγνητικό πεδίο να περάσει μέσα από αυτόν και όχι από τα καλώδια των πηνίων, βλ. Σχήμα 3-6, που έχουν χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα όση και του κενού περίπου αυξάνοντας το φαινομενικό κενό (effective gap) και άρα αυξάνοντας την μαγνητική αντίσταση. Έτσι στην περίπτωση του σχεδιασμού χωρίς πυρήνα, τα καλώδια του στάτη υποβάλλονται σε διάφορα μαγνητικά πεδία και έτσι εμφανίζονται απώλειες στον χαλκό τύπου δινορρευμάτων. Στον πυρήνα όμως εμφανίζονται απώλειες σιδήρου που μπορεί να επηρεάσουν θερμικά την συμπεριφορά του κινητήρα και να επηρεάσουν την θερμική ειδική σταθερά ροπής που αναλύσαμε στο Κεφάλαιο 2.



Σχήμα 3-6. Σχεδίαση στάτη κινητήρα με πυρήνα ή χωρίς.

Επίσης πέρα από την κατανομή των πηνίων στον στάτη σημαντική είναι και η περιέλιξη αυτών αλλά και η διάμετρος την οποία έχουν. Σε ένα μαγνητικό κύκλωμα, η μαγνητεγερτική δύναμη (magnetomotive

force) είναι αυτή που ευθύνεται για την παραγωγή της μαγνητικής ροής που το διαρρέει. Γενικά ισχύει η ακόλουθη εξίσωση.

$$F_{MMF} = Ni \tag{3-3}$$

άρα το ίδιο ισχύει και για την μαγνητική ροή (φ) αφού όσο μεγαλύτερη είναι η MMF τόσο μεγαλύτερη είναι η μαγνητική ροή λόγω της εξίσωσης

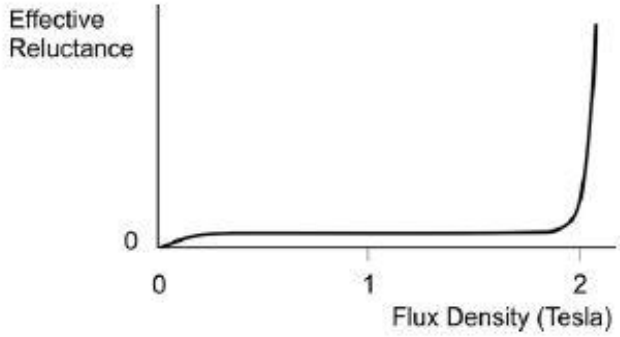
$$\varphi = \frac{F_{MMF}}{R} \tag{3-4}$$

όπου R είναι η μαγνητική αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος (**reluctance**). Έτσι από τις Εξ. (3-3) και (3-4) μπορούμε να δούμε ότι η μαγνητική ροή ρυθμίζεται από το ρεύμα και τις περιελίξεις. Όσο πιο παχιές (μεγάλης διατομής) είναι οι περιελίξεις, τόσο μεγαλύτερο ρεύμα μπορεί να περάσει μέσα από αυτές, αλλά τόσο περισσότερο χώρο καταλαμβάνουν στο slot του στάτη και άρα τόσο λιγότερες έχουμε. Αντιθέτως όσο πιο λεπτές είναι οι περιελίξεις τόσο περισσότερες μπορούν να επιτευχθούν, αλλά για μικρότερο ρεύμα αφού η αντίσταση των τυλιγμάτων αυξάνει αρκετά. Χοντρά τυλίγματα με μεγάλο ρεύμα απαιτούν ειδικές ηλεκτρονικές διατάξεις που μπορούν να δώσουν αυτό το ρεύμα με ειδικές διατάξεις ψύξης. Από την άλλη όμως μεγαλύτερες ικανότητες ροής ρεύματος συνεπάγονται και μεγαλύτερες δυνατότητες ροπής για τον κινητήρα. Σημαντικό είναι να παρατηρήσουμε ότι στους κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες η ποσότητα της μαγνητικής ροής καθορίζεται από τους μόνιμους μαγνήτες και όχι από τις περιελίξεις πεδίου όπως συμβαίνει στους κινητήρες με μη μόνιμους μαγνήτες. Η αλληλεπίδραση της μαγνητικής ροής από τους μαγνήτες και του ρεύματος στα πηνία του στάτη προκαλεί την εμφάνιση ροπής γι' αυτό είναι σημαντικό το ρεύμα να μπορεί να φτάσει σε υψηλότερα επίπεδα. Παρακάτω θα δούμε αναλυτικότερα την σχέση αυτή.

Στους Η/Μ κινητήρες η ροπή εξαρτάται από την μαγνητική επαγωγή ή την πυκνότητα μαγνητικής ροής B (flux density) που περνάει από το διάκενο του στάτη με τον δρομέα, αφού αυτή όπως προαναφέραμε αλληλεπιδρά με το ρεύμα και παράγεται δύναμη (F~ILB). Η μαγνητική επαγωγή είτε προέρχεται από πηνία διέγερσης είτε από μόνιμους μαγνήτες. Όμως τα τυλίγματα του στάτη διαρρέονται και αυτά από ρεύμα, και όπως γνωρίζουμε από την φυσική, παράγουν και αυτά ένα μαγνητικό πεδίο και μαγνητική ροή, η οποία ονομάζεται (**armature reaction)** και ουσιαστικά συνυπάρχει σε επαλληλία με τη μαγνητική ροή που προκαλείται από τους μόνιμους μαγνήτες. Παρ' όλα αυτά η μαγνητική ροή από τα τυλίγματα μπορεί να αμεληθεί αφού στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι μικρότερη από κάθε το 10% της μαγνητικής επαγωγής.

Όπως είπαμε τα δύο μαγνητικά πεδία συνυπάρχουν σε επαλληλία στην συνολική μαγνητική ροή. Παρ' όλα αυτά σε ορισμένες ακραίες περιοχές του κινητήρα, όπως στην περίπτωση του κορεσμού, τα δύο μαγνητικά πεδία δεν συνυπάρχουν σε επαλληλία. Επίσης αν το ρεύμα των πηνίων του στάτη αυξηθεί πολύ μετά τον κορεσμό, τότε η μαγνητική ροή από τα πηνία ενδέχεται να είναι πολύ υψηλή και να καταστρέψει τους μόνιμους μαγνήτες του κινητήρα και να τους οδηγήσει στην **απομαγνητοποίηση**. Γενικά κορεσμός συμβαίνει όταν από ένα σημείο και πάνω μαγνητικής επαγωγής, η μαγνητική αντίσταση του σιδηρομαγνητικού υλικού ανεβαίνει σε πολύ υψηλά επίπεδα με αποτέλεσμα η μαγνητική

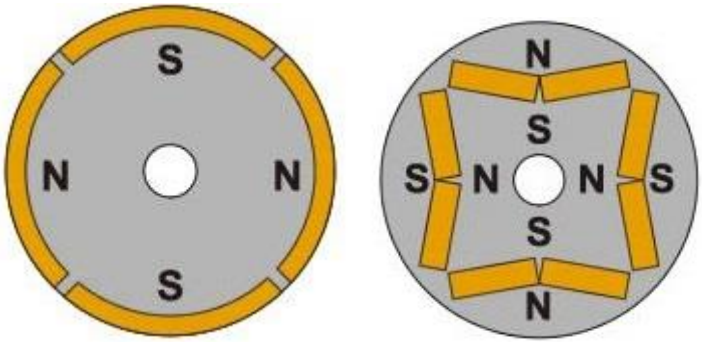
ροή να μην μπορεί να αυξηθεί άλλο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-7. Στο Σχήμα 3-7, βλέπουμε ότι για τα συνήθη υλικά των κινητήρων το σημείο κορεσμού είναι περίπου 2 Tesla και άρα οι μέγιστες συνθήκες μαγνητικής επαγωγής είναι 1.5 Tesla, κάτι που καθορίζει την επιλογή των μόνιμων μαγνητών.



Σχήμα 3-7. Διάγραμμα που δείχνει πως η μαγνητική αντίσταση του σιδήρου αυξάνει πολύ μετά τα 2 Tesla και έχουμε το όριο του μαγνητικού κορεσμού, [31].

Επίσης σημαντική είναι η **επιλογή των μαγνητών** αφού παίζουν μεγάλο ρόλο στην παραγωγή της ροπής. Γενικά οι τύποι μαγνητών που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι μαγνήτες φερίτη, Alnico, κεραμικοί και σπάνιες γαίες σαμαρίου-κοβαλτίου και νεοδυμίου -βόριου – σιδήρου (NdFeB), [31]. Από αυτά οι μαγνήτες φερίτη είναι από τους πιο διαδεδομένους για τον λόγο ότι έχουν χαμηλό κόστος. Οι σπάνιες γαίες προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη απόδοση με τους μαγνήτες NdFeB να επικρατούν επειδή είναι πολύ φθηνότερη από των άλλων ειδών.

Ένα τελευταίο κατασκευαστικό χαρακτηριστικό των κινητήρων χωρίς ψήκτρες είναι η διάταξη και η αρχιτεκτονική των μαγνητών στον δρομέα του κινητήρα, βλ. Σχήμα 3-8. Διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους κινητήρες με έκτυπους πόλους και μη ή λείους πόλους (**Salient and Non – Salient or round)**.



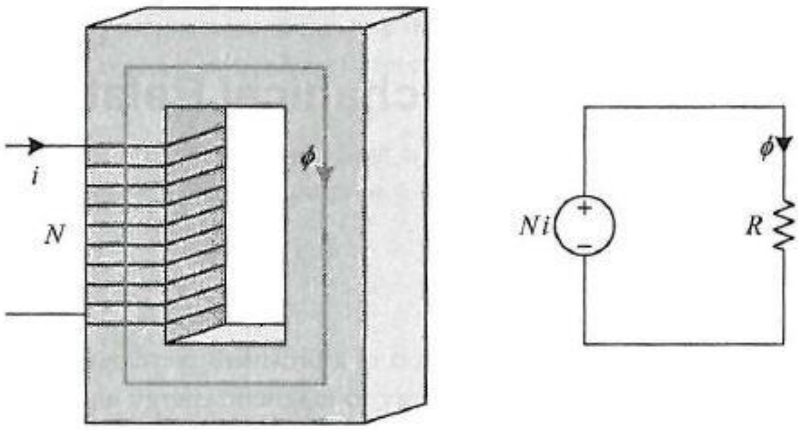
(α) (β)

Σχήμα 3-8. (α) Non – salient motor αφού οι μαγνήτες είναι στην επιφάνεια του δρομέα (Surface permanent magnet – SPM). (β) Salient motor αφού οι μαγνήτες είναι εμφυτευμένοι στον δρομέα (Interior permanent magnet – IPM), [72].

Όσον αφορά τις διαφορές αυτών των δύο κινητήρων, έχουμε πως κατασκευαστικά οι κινητήρες με έκτυπους πόλους έχουν εμφυτευμένους τους μαγνήτες στον δρομέα του κινητήρα ενώ οι κινητήρες με λείους πόλους έχουν τους μαγνήτες στην επιφάνεια του δρομέα. Η κύρια λειτουργική διαφορά είναι πως η αυτεπαγωγή των φάσεων του κινητήρα με έκτυπους πόλους αλλάζει ανάλογα με την θέση του δρομέα ενώ στους κινητήρες με μη έκτυπους πόλους είναι σταθερή και δεν μεταβάλλεται.

Γενικά η αυτεπαγωγή ενός επαγωγέα είναι συνάρτηση της γεωμετρίας του επαγωγέα και του υλικού του πυρήνα [53] και άρα στην τιμή της, παίζει ρόλο η διαπερατότητα και άρα η μαγνητική αντίσταση. Γενικά σε ένα μαγνητικό κύκλωμα, βλ. Σχήμα 3-9, η επαγωγή δίνεται από την εξίσωση:

$$L = \frac{N^2}{R} \tag{3-5}$$



Σχήμα 3-9. Απλό μαγνητικό κύκλωμα με ένα πηνίο και πυρήνα. Η επαγωγή είναι συνάρτηση της αντίστασης. Ισοδύναμα ισχύει και για το μαγνητικό κύκλωμα στον Η/Μ κινητήρα

Γενικότερα όταν δρομέας περιστρέφεται ως προς τον σταθερό στάτη, η μαγνητική διαπερατότητα και άρα η μαγνητική αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος στάτη - δρομέα μεταβάλλεται από θέση σε θέση ανάλογα με την θέση των μαγνητικών πόλων. Αυτό μπορεί να γίνει είτε σε πολύ μικρό βαθμό, έως αμελητέο, (SPM) είτε περισσότερο (IPM). Έτσι με βάση την Εξ. (3-5) μεταβάλλεται και η αυτεπαγωγή από θέση σε θέση. Στους κινητήρες SPM, σε αντίθεση με τους IPM, επειδή οι μαγνήτες είναι στην επιφάνεια του δρομέα, θεωρούμε ότι η μαγνητική διαπερατότητα είναι περίπου ίδια σε κάθε θέση είτε μεταξύ δύο μαγνητών είτε σε κάθε μαγνήτη και ισχύει η παρακάτω εξίσωση, [48].

$$\mu_{PM} \simeq \mu_{air} \tag{3-6}$$

Τέλος κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή του κινητήρα σημαντικό είναι να επιλεγούν οι **διαστάσεις** γιατί σχετίζονται άμεσα με την μάζα του και την ροπή. Όπως θα δούμε παρακάτω, η πιο σημαντική παράμετρος είναι η **ακτίνα διακένου** στους outrunner κινητήρες και η οποία σχετίζεται άμεσα με πολλά χαρακτηριστικά μεγέθη του κινητήρα όπως με την ροπή αδράνειας, την ροπή του κινητήρα καθώς και την σταθερά του κινητήρα που ισούται με την ροπή του κινητήρα προς την ρίζα των ωμικών απωλειών, βλ. Εξ. (2-5). Γενικά πάντως αν θέλουμε να κάνουμε μία γενική προσέγγιση της ροπής που μπορεί να παράγει ο κινητήρας ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τότε θα είχαμε την παρακάτω εξίσωση, [25].

$$T = kD^2L \tag{3-7}$$

όπου T είναι η ροπή του κινητήρα, k είναι σταθερά, D είναι η διάμετρος του κινητήρα και L είναι το μήκος του κινητήρα. Εξετάζοντας κάθε όρο ξεχωριστά είναι εύκολο να καταλάβουμε γιατί ισχύει η Εξ. (3-7).

Αρχικά μπορούμε να πούμε ότι αν έχουμε ένα κινητήρα με μήκος L/2 και που παράγει ροπή T/2 και ένα ίδιο κινητήρα σε σειρά με τον προηγούμενο τότε η συνολική ροπή εξόδου θα ισούται με T και

άρα το μήκος του κινητήρα όσο μεγαλύτερο είναι ισοδυναμεί με το να έχουμε κινητήρες σε σειρά και γι' αυτό τον λόγο η ροπή του κινητήρα είναι ανάλογη με το μήκος του.

Το γεγονός ότι η ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου είναι λίγο πιο πολύπλοκο. Αρχικά στην περιοχή αλληλεπίδρασης μεταξύ των μόνιμων μαγνητών και πηνίων, στην περιοχή του διακένου δηλαδή, μεταξύ του stator stuck και των μαγνητών, βλ. Σχήμα 3-1, εμφανίζεται η δύναμη που προκαλεί την ροπή ώστε περιστρέψει τον κινητήρα, βλ. Σχήμα 3-10. Άρα από αυτό το γεγονός μπορούμε να κατανοήσουμε μία πρώτη συσχέτιση μεταξύ της ροπής και της ακτίνας διακένου. Επίσης όμως όσο αυξάνει η διάμετρος αυξάνει και η περίμετρος στην περιοχή του διακένου και άρα και η επιφάνεια που εισέρχονται οι μόνιμοι μαγνήτες στον δρομέα. Έτσι τελικά είναι δυνατόν να τοποθετηθούν μεγαλύτεροι και περισσότεροι μαγνήτες και άρα η ροπή που παράγεται είναι μεγαλύτερη. Συγκεκριμένα αν η διάμετρος διπλασιαστεί τότε και περίμετρος στην περιοχή διακένου διπλασιάζεται και άρα έχουμε διπλάσια ροπή.

3.3 Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη/παράμετροι του κινητήρα

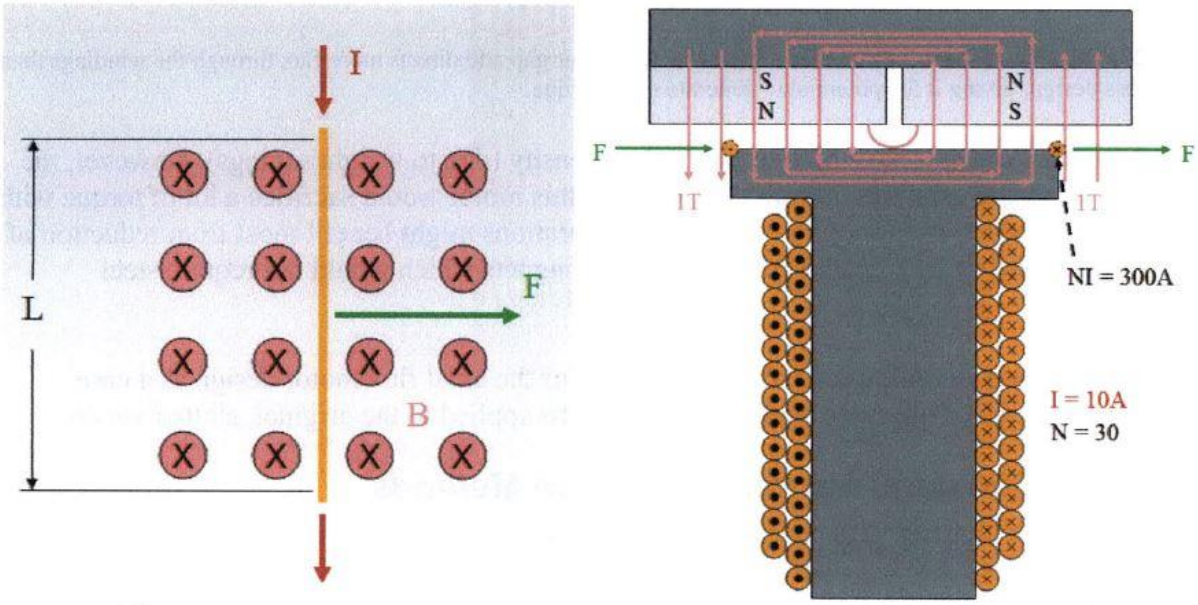
Μία από τις βασικότερες παραμέτρους που παίζουν κυρίαρχο ρόλο στους κινητήρες χωρίς ψήκτρες είναι ο αριθμός των πόλων τους. Είναι θεμελιώδες χαρακτηριστικό γενικότερα στους κινητήρες αφού είναι εκείνο το νούμερο που συσχετίζει την ηλεκτρική γωνία περιστροφής του δρομέα με την αντίστοιχη μηχανική. Η μηχανική είναι η γωνία του δρομέα που σχετίζεται με την πραγματική γωνία του κινητήρα ενώ ηλεκτρική γωνία είναι η γωνία με την οποία περιστρέφεται το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στον στάτη και σχετίζεται άμεσα με την συχνότητα εναλλαγής της πολικότητας που αναφέραμε παραπάνω προκειμένου η ροπή να είναι πάντα στην ίδια φορά. Η εξίσωση που συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη είναι η παρακάτω:

$$\theta_{\eta\lambda} = \frac{\alpha\rho\iota\theta\mu\acute{o}\varsigma\ \pi\acute{o}\lambda\omega\nu\ (N_m)}{2}\theta_{\mu\eta\chi} \tag{3-8}$$

Επειδή όμως ορισμένοι κινητήρες είναι πολύστροφοι με ταχύτητες που φτάνουν μέχρι τα 5000 rpm ή και παραπάνω, αυτό συνεπάγεται ότι αν ο αριθμός των πόλων είναι πολύ μεγάλος, π.χ. υποθέσουμε N_m 42, τότε θα πρέπει η ηλεκτρική ταχύτητα - συχνότητα των ρευμάτων στο στάτη και ακολούθως οι απαιτήσεις των διατάξεων οδήγησης να είναι πολύ μεγάλη. Ως εκ τούτου κυρίως στους πολύστροφους κινητήρες ο αριθμός των πόλων δεν είναι μεγαλύτερος από 14 αλλά σε κινητήρες όπως ο U8 Efficiency Type της Tiger Motor [73], ο αριθμός των πόλων είναι αρκετά μεγαλύτερος 42 το οποίο τους καθιστά πολύ ποιοτικούς κινητήρες. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που οι συγκεκριμένοι κινητήρες ξεχωρίζουν στα διαγράμματα που απεικονίζει το Σχήμα 2-1. Γενικά όπως προείπαμε αυξάνοντας τον αριθμό των πόλων, αυξάνει και η απόδοση του κινητήρα με όρια όμως το μέγεθος του κινητήρα και τις δυνατότητες των ελεγκτών.

Όπως προαναφέραμε η ακτίνα διακένου είναι πολύ σημαντικό αφού εκεί που εμφανίζεται η έλξη ή η απώθηση του δρομέα. Η μαγνητική ροή περνάει από τον στάτη στον δρομέα μέσα από το διάκενο βλ. Σχήμα 3-10. Είναι σημαντικό κατά τον σχεδιασμό του κινητήρα αυτό το διάκενο να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο ώστε η αντίσταση που αυτό προκαλεί να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.

Η ανάπτυξη δυνάμεων και ροπών μπορεί να αναλυθεί με πολύπλοκα μαθηματικά και διαφορικές εξισώσεις, αλλά μπορεί όμως να αναλυθεί και με απλά μαθηματικά και φυσική Γυμνασίου.



Σχήμα 3-10. Η κλασική αρχή μία ρευματοφόρου αγωγού που της ασκείται δύναμη Lorentz από το μαγνητικό πεδίο (F=BIL). Η ίδια αρχή ισχύει στους Η/Μ κινητήρες.

Από την φυσική του Γυμνασίου γνωρίζουμε ότι όταν ένας ρευματοφόρος αγωγός διαρρέεται και κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο τότε αναπτύσσεται σε αυτόν δύναμη Lorentz σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Η ίδια αρχή ισχύει και στην περίπτωση ενός κινητήρα, που όμως εδώ το φαινόμενο λαμβάνει χώρα στο διάκενο και άρα η ροπή που εμφανίζεται είναι ανάλογη της ακτίνας διακένου και της δύναμης που εμφανίζεται. **Τέλος η μέγιστη δύναμη εμφανίζεται όταν τα πηνία** του στάτη είναι εσωτερικά από τους μόνιμους μαγνήτες του δρομέα και υπάρχει μονίμως 90 ηλεκτρικές μοίρες απόκλιση, βλ. Σχήμα 3-10. Θα αναλύσουμε παρακάτω στον έλεγχο πεδίου (field oriented control) γιατί πρέπει να υπάρχει αυτή η απόκλιση μεταξύ του στάτη και του δρομέα. Ουσιαστικά μιλάμε για την γωνία ροπής και αυτή πρέπει να είναι στις δ=90°, [53].

Γνωρίζουμε από την φυσική ότι η μεταβολή της επαγωγής προκαλεί την ανάπτυξη τάσης στα άκρα ενός πηνίου, την ΑΗΕΔ και η οποία ισούται με

$$E = \frac{d\lambda_m}{dt} = \frac{d\theta_{el}}{dt}\frac{d\lambda_m}{d\theta_{el}} = \omega_{el}\frac{d\lambda_m}{d\theta_{el}} = \frac{N_m}{2}\omega_{mech}\frac{d\lambda_m}{d\theta_{el}} = \frac{N_m}{2}\omega_{mech}\frac{2N\varphi_g}{\pi} \tag{3-9}$$

όπου N_m είναι ο αριθμός των μαγνητικών πόλων, N ο αριθμός των ενεργών περιελίξεων στο πηνίο, λ_m η πεπλεγμένη ροή που είναι ουσιαστικά η φ_g, μαγνητική ροή στο κενό, πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό των περιελίξεων και η οποία ισούται με την πυκνότητα μαγνητικής επαγωγής B_g και την επιφάνεια.

$$\varphi_g = B_g A_g = B_g R_{ro}\theta_p L_{st} = B_g R_{ro}\frac{2\pi}{N}L_{st} \tag{3-10}$$

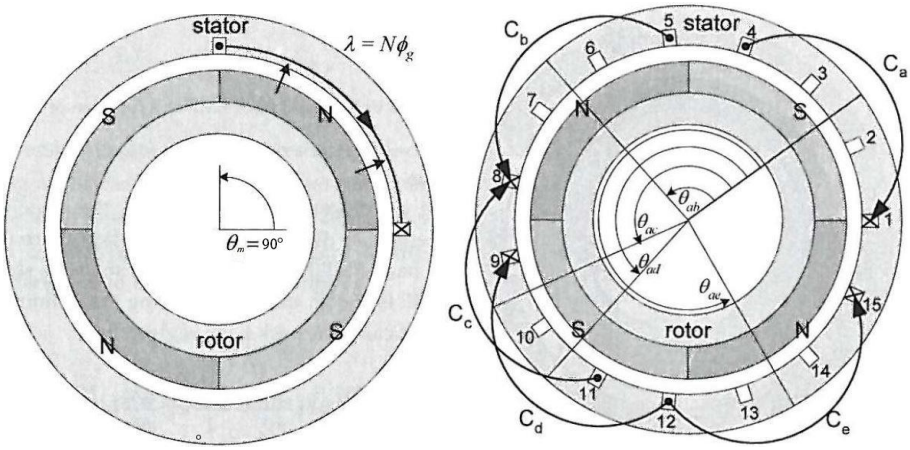
όπου θ_p είναι το γωνιακό βήμα του μαγνητικού πόλου, 90 μηχανικές μοίρες για τον κινητήρα στο Σχήμα 3-11α, L_{st} το μήκος του κινητήρα και R_{ro} είναι η ακτίνα διακένου. Επίσης ισχύει η Εξ. (3-11) από το ισοζύγιο ενέργειας ότι η ροπή είναι:

$$T = \frac{e_b i}{\omega_{\mu\eta\chi}} \tag{3-11}$$

Από συνδυασμό των τριών παραπάνω σχέσεων, ισχύει τελικά ότι:

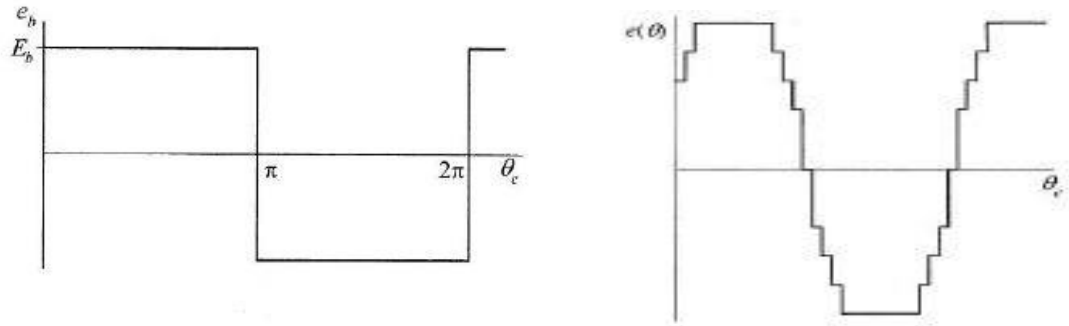
$$T = 2NIB_g L_{st} R_g \tag{3-12}$$

Η Εξ. (3-12) βρίσκει εφαρμογή σε απλό κινητήρα, βλ. Σχήμα 3-11(α).



(α) (β)

Σχήμα 3-11. (α) Απλή γεωμετρία κινητήρα. Κάθε μαγνήτης καταλαμβάνει το ¼ του δρομέα. (β) Κινητήρας μετά τα πηνία και τις φάσεις. Αν ο χαρακτηριστικός αριθμός που ισούται με τον αριθμό των πηνίων προς τον αριθμό των μόνιμων μαγνητών προς τον αριθμό των φάσεων δεν είναι ακέραιος τότε η ΑΗΕΔ δύναμη τείνει στην ημιτονοειδή.



(α) (β)

Σχήμα 3-12. (α) Η ΑΗΕΔ που αναπτύσσεται σε ένα κινητήρα με ακέραιο τον χαρακτηριστικό αριθμό που αναφέρουμε στο Σχήμα 3-11. (β) Η ΑΗΕΔ όταν είναι μη ακέραιος.

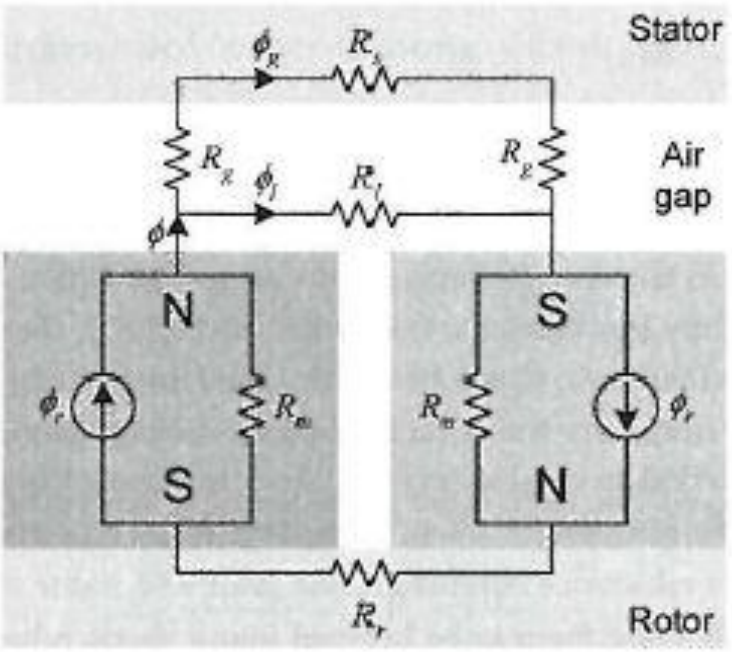
Η Εξ. (3-12) ισχύει στην περίπτωση που η διαμόρφωση των μόνιμων μαγνητών στο δρομέα και των πηνίων στον στάτη είναι όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-11α. Εν γένει όμως, έχουμε πιο πολύπλοκους σχεδιασμούς όπως στο Σχήμα 3-11β, και σημαντικό παράγοντα για την εξίσωση της ροπής και την μορφής της ΑΗΕΔ παίζει ο χαρακτηριστικός αριθμός που ορίζεται ως ο αριθμός των πηνίων προς τον αριθμό των πόλων προς τον αριθμό των φάσεων, [25]. Ο συντελεστής 2 στην Εξ. (3-12) εμφανίζεται επειδή, το τμήμα του πηνίου περιλαμβάνει δύο μισά από καλώδια, βλ. Σχήμα 3-10, με αντίθετη φορά ρεύματος αλλά και αντίθετη φορά μαγνητικού πεδίου και έτσι έχουμε την εμφάνιση δύο δυνάμεων σε κάθε πλευρά του πηνίου, βλ. Σχήμα 3-10, [12]. Ως εκ τούτου αν το πηνίο δεν βρίσκεται κάτω από δύο συνεχόμενους μαγνήτες τότε θα είχαμε ότι αυτός ο συντελεστής θα ήταν μικρότερος από 2 και άρα

διαπιστώσουμε ότι αυτή η γωνιακή απόκλιση μεταξύ στάτη και δρομέα είναι η βέλτιστη. Από την Εξ. (3-12), έχουμε ότι η ροπή ενός κινητήρα εξαρτάται άμεσα από το ρεύμα που διαρρέει τα πηνία του στάτη όπως αναφέραμε και προηγουμένως και από τα γεωμετρικά και υλικά χαρακτηριστικά που έχει κατασκευαστεί ο κινητήρας. Τέλος η μαγνητική επαγωγή B_g είναι πιο δύσκολος παράγοντας για να υπολογιστεί αλλά εξαρτάται κυρίως από την επιλογή του μαγνήτη και τον σχεδιασμό του διακένου. Αναλύοντας ένα κύκλωμα σαν αυτό στο Σχήμα 3-13, θα μπορούσε κανείς γνωρίζοντας τα υλικά σχεδιασμού και τις παραμέτρους τους να υπολογίσει την μαγνητική επαγωγή του κινητήρα.

Στο παραπάνω κύκλωμα η κύρια αντίσταση είναι αυτή του κενού αφού οι υπόλοιπες θα μπορούσαν να αμεληθούν και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R_g = \frac{g}{A_g \mu_o} \tag{3-13}$$

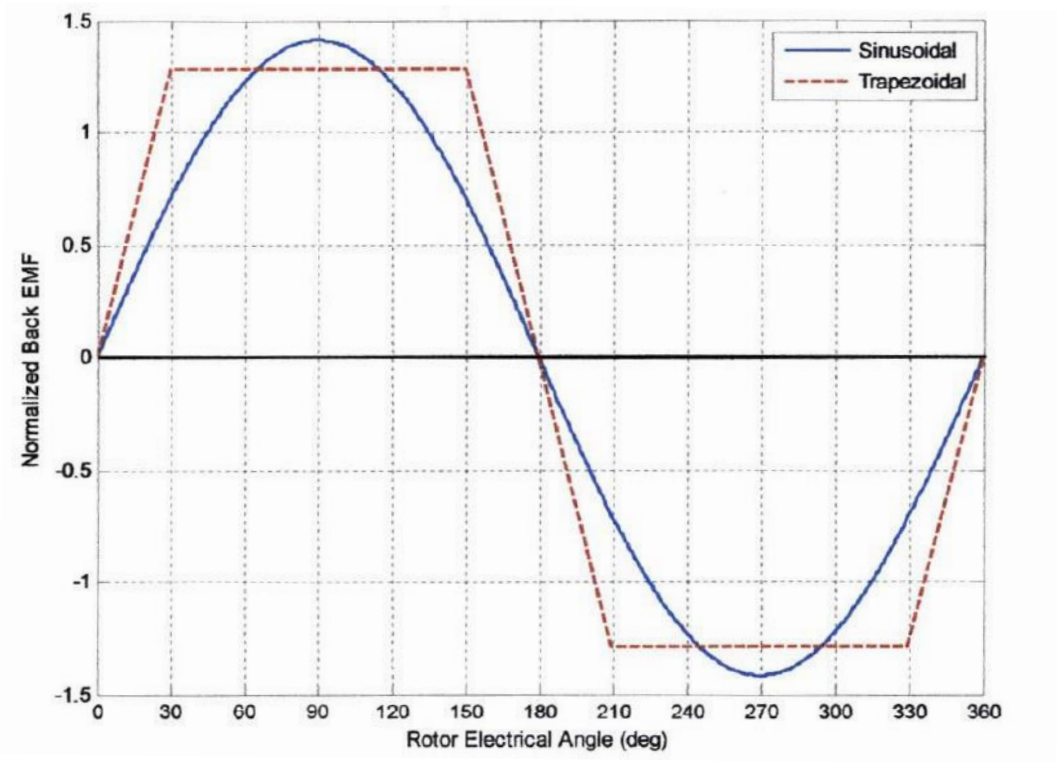
Όπου g είναι το μήκος του διακένου, A_g είναι το εμβαδόν της επιφάνειά του και μ_o είναι η μαγνητική διαπερατότητα που είναι πολύ μικρή και ίση με $\mu_o=4\pi10^{-7}$.



Σχήμα 3-13. Πλήρες μοντελοποιημένο μαγνητικό κύκλωμα μεταξύ στάτη και δρομέα.

Ουσιαστικά τα παραπάνω μας δίνουν μία γενική εικόνα για τους νόμους που επηρεάζουν την απόδοση ενός κινητήρα. Αν θέλουμε να εξετάσουμε πιο λεπτομερειακά τους 3φασικούς κινητήρες χωρίς ψήκτρες όπως θα δούμε παρακάτω, ανάλογα με την κατασκευή του κινητήρα π.χ. την διαμόρφωση των πηνίων στον στάτη σε συγκεντρωτική ή διανεμημένη, αλλά και άλλα χαρακτηριστικά όπως για παράδειγμα αν ο στάτης του κινητήρα περιλαμβάνει πυρήνα ή όχι, η μεταβολή της πεπλεγμένης ροής και άρα η ΑΗΕΔ θα μεταβάλλεται και ιδανικά θα έχει είτε τραπεζοειδή μορφή είτε ημιτονοειδή μορφή. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι και η ροπή η οποία αναπτύσσεται σε κάθε φάση θα είναι τραπεζοειδής ή ημιτονοειδής ανάλογα

με την μορφή του ρεύματος που τροφοδοτεί η οδήγηση του κινητήρα. Στο Σχήμα 3-14, μπορούμε να δούμε την χαρακτηριστική εικόνα των δύο ιδανικών μορφών ΑΗΕΔ, που εμφανίζεται σε κάθε φάση του στάτη ενός κινητήρα χωρίς ψήκτρες.



Σχήμα 3-14. Τραπεζοειδής ή ημιτονοειδής ανάπτυξη ΑΗΕΔ, [12].

Επίσης ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος που σχολιάστηκε προηγουμένως και σχετίζεται με λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα είναι η ακτίνα διακένου. Όπως είδαμε προηγουμένως η ροπή είναι ανάλογη με το τετράγωνο της διαμέτρου του κινητήρα και ανάλογη του μήκους. Από αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η ροπή που μπορεί να αποδώσει ένας κινητήρας χωρίς ψήκτρες είναι αμετάβλητη από τον όγκο του. Αυτό με την σειρά του συνάδει με το ότι ένας κινητήρας που είναι μακρύς με μικρή διάμετρο παράγει την ίδια ροπή με έναν κινητήρα που είναι κοντός σε μήκος αλλά με μεγάλη διάμετρο.

Άρα αν θεωρήσουμε ένα μέγεθος ειδικής ροπής ως προς τον όγκο αυτή είναι ανεξάρτητη ως προς την ακτίνα διακένου. Εν αντιθέσει με αυτό, η ειδική ροπή ως προς την μάζα δεν είναι ανεξάρτητη από την γεωμετρία. Εάν το ακτινικό πάχος του δρομέα και του στάτη είναι σταθερά και ανεξάρτητα από την ακτίνα διακένου, βλ. Σχήμα 3-15, τότε έχουμε ότι για την μάζα ισχύει η εξίσωση:

$$M_{motor} = 2\pi r_g l(t_s \rho_s + t_r \rho_r) \tag{3-14}$$

Όπου r_g είναι η ακτίνα διακένου, l το μήκος του κινητήρα και ρ_s, t_s και ρ_r, t_r είναι η πυκνότητα και το πάχος του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα. Από την Εξ. (3-14) βλέπουμε ότι η μάζα του κινητήρα είναι ανάλογη με το μήκος του και την ακτίνα διακένου. Άρα η ειδική ροπή είναι του κινητήρα είναι:

$$Kt = \frac{\tau}{\mathrm{M}} \propto \frac{r_g{}^2 l}{r_g} \propto r_g \tag{3-15}$$

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η ειδική ροπή ενός κινητήρα είναι ανάλογη της ακτίνας διακένου και ως εκ τούτου κατά τη μέθοδο της απευθείας οδήγησης, επειδή ζητούμενο είναι η ειδική ροπή να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, πρέπει να επιλεγεί ένας κινητήρας με μεγάλη ακτίνα διακένου.

Για την ροπή αδράνειας του κινητήρα αν θεωρήσουμε ότι όλη η μάζα του δρομέα βρίσκεται εξωτερικά - περιφερειακά ισχύει ότι:

$$J = 2\pi l t_r \rho_r r_g^{\ 3} \tag{3-16}$$

Από το οποίο βλέπουμε ότι η ροπή αδράνειας είναι ανάλογη του μήκους του κινητήρα l και εξαρτάται από την ακτίνα διακένου στον κύβο. Πράγμα το οποίο σημαίνει ότι αύξηση της ακτίνας διακένου αυξάνει πολύ την αδράνεια του κινητήρα και το οποίο συνεπάγεται ότι η μηχανική χρονική σταθερά και η ικανότητα επιτάχυνσης του κινητήρα μειώνονται. Άρα έχουμε ότι αύξηση της ακτίνας διακένου αυξάνει την ροπή ως προς την μάζα του κινητήρα που είναι επιθυμητό για ρομποτικές εφαρμογές αλλά μειώνει τις δυνατότητες επιτάχυνσης του κινητήρα. Σε εφαρμογές για drones, η αύξηση της ακτίνας διακένου έχει θετικές συνέπειες για κανονικές συνθήκες λειτουργίας, ίδια ροπή για μικρότερο βάρος, που δεν συμπεριλαμβάνουν όμως απότομες αλλαγές κατεύθυνσης, που απαιτούν μεγάλη επιτάχυνση. Ισχύει η εξίσωση:

$$a = \dot{\omega} = \frac{T}{J} \propto \frac{r_g^{\ 2}}{r_g^{\ 3}} \propto \frac{1}{r_g} \tag{3-17}$$

Ένα τελευταίο μέγεθος που αξίζει η να αναλυθεί είναι η σταθερά του κινητήρα K_M. Ισχύει ότι το τετράγωνο της σταθεράς του κινητήρα ισούται με το τετράγωνο της ροπής προς τις ωμικές απώλειες του κινητήρα, [87].

$$K_M^2 = \frac{K_t^2}{R} = \frac{\tau^2}{I^2 R} \propto \frac{k r_g^2 L_{st} N^2 A_w}{\rho l_w} \tag{3-18}$$

όπου K_t είναι η σταθερά ροπής του κινητήρα, R η αντίσταση των φάσεων του, ρ η ειδική αντίσταση των τυλιγμάτων, l_w το συνολικό μήκος αυτών και A_w η διατομή τους. Αν γίνουν περαιτέρω υποθέσεις έχουμε ότι το μήκος l_w είναι ανάλογο του αριθμού περιελίξεων και του μήκους του κινητήρα και άρα ισχύει ότι:

$$l_w \propto Nl \tag{3-19}$$

και πως ο αριθμός των περιελίξεων υποθέτοντας σταθερό AWG είναι:

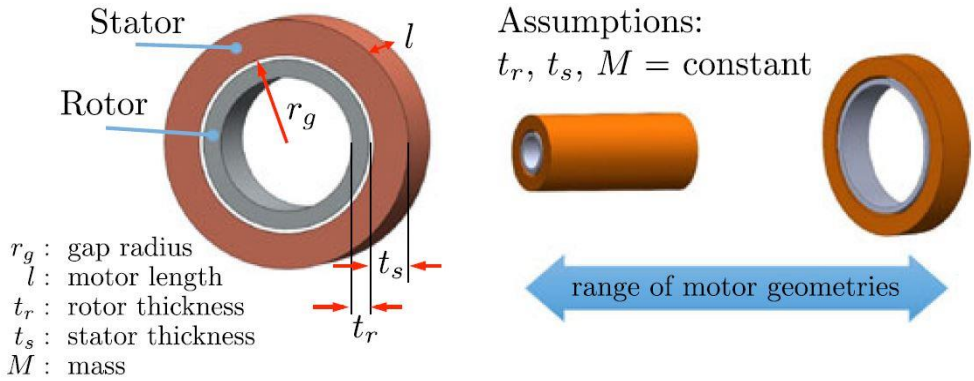
$$N \propto r_g \tag{3-20}$$

Τότε η Εξ. (3-20) γίνεται:

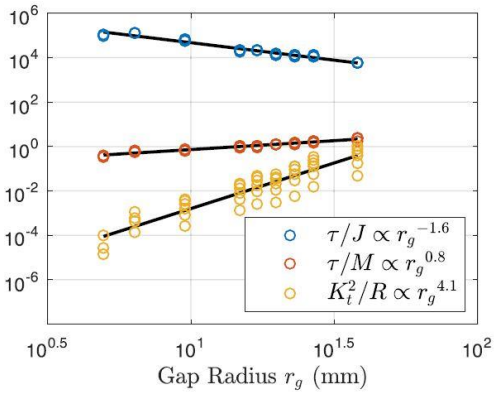
$$K_M^2 \propto r_g^3 L_{st} \tag{3-21}$$

Από έρευνα που έχει κάνει το MIT [87] πάνω σε μία σειρά κινητήρων της εταιρείας Emoteq, κατέληξε στα διαγράμματα που φαίνονται στο Σχήμα 3-16, επαληθεύοντας αυτά που είπαμε παραπάνω με κάποιες αποκλίσεις από τις παραπάνω σχέσεις, αφού υποθέσαμε ότι το πάχος του δρομέα και του

στάτη δεν μεταβάλλεται με την ακτίνα διακένου κάτι όμως που δεν ισχύει ακριβώς αφού στην πραγματικότητα επηρεάζεται από την ακτίνα διακένου.



Σχήμα 3-15. Βασική γεωμετρία κινητήρα όπου το πάχος του δρομέα και του στάτη παραμένουν σταθερά ως προς την αύξηση της ακτίνας διακένου, [87].

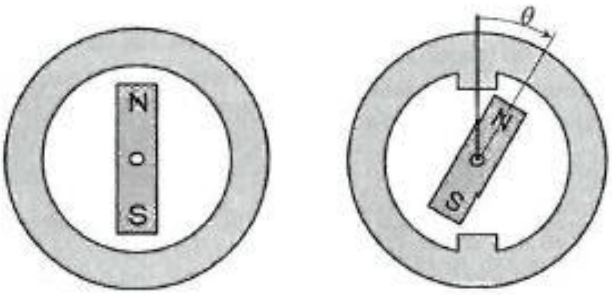


Σχήμα 3-16. Διάγραμμα για την σειρά κινητήρων της Emoteq, [87].

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι η επιλογή της **ακτίνας διακένου** αποτελεί πολύ σημαντικό κριτήριο στην επιλογή κινητήρα για εφαρμογές ρομποτικής σε τετράποδα και μη ρομπότ. Στις εφαρμογές απευθείας οδήγησης είναι κρίσιμο να επιλέγονται κινητήρες με υψηλή ροπή ανά μάζα, απώλειες και ικανότητα διάχυσης θερμότητας. Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 2 το μέγεθος της θερμικής ειδικής σταθερά ροπής εξαρτάται και αυτή από την ακτίνα διακένου. Άρα γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα διακένου τόσο καλύτερα αποτελέσματα έχουμε με δυσκολία την κατασκευή του συστήματος υποστήριξης ενός τέτοιου κινητήρα, [87].

Μία άλλη σημαντική παράμετρος στους κινητήρες χωρίς ψήκτρες είναι η λεγόμενη **cogging torque (ροπή αλληλεπίδρασης δρομέα – στάτη)**, η οποία εμφανίζεται, επειδή ο σχεδιασμός του στάτη στους κινητήρες δεν είναι ομοιόμορφη όπως στο Σχήμα 3-17α, αλλά εμφανίζονται έκτυποι πόλοι όπως στο Σχήμα 3-2, Σχήμα 3-3, και Σχήμα 3-17β, γύρω από τους οποίους τυλίγονται τα τυλίγματα. Στο Σχήμα 3-17, που ακολουθεί βλέπουμε τον δρομέα να περιστρέφεται εσωτερικά αλλά χωρίς βλάβη της γενικότητας ισχύει και για δρομέα που περιστρέφεται εξωτερικά**.** Στην πρώτη περίπτωση δεν υπάρχουν πόλοι – δόντια στον σταθερό στάτη και άρα δεν έχουμε κάποιο συγκεκριμένο σημείο ισορροπίας στο οποίο βρίσκεται και άρα μπορεί και κινείται ελεύθερα μέσα στον στάτη. Κάθε πλευρά του δρομέα δέχεται συγκεκριμένη δύναμη και αντίθετη δύναμη που δεν εξαρτάται από την θέση. Οι μαγνήτες ουσιαστικά δέχονται μηδενική καθαρή δύναμη και άρα μηδενική ροπή. Στην δεύτερη περίπτωση όταν οι μαγνήτες

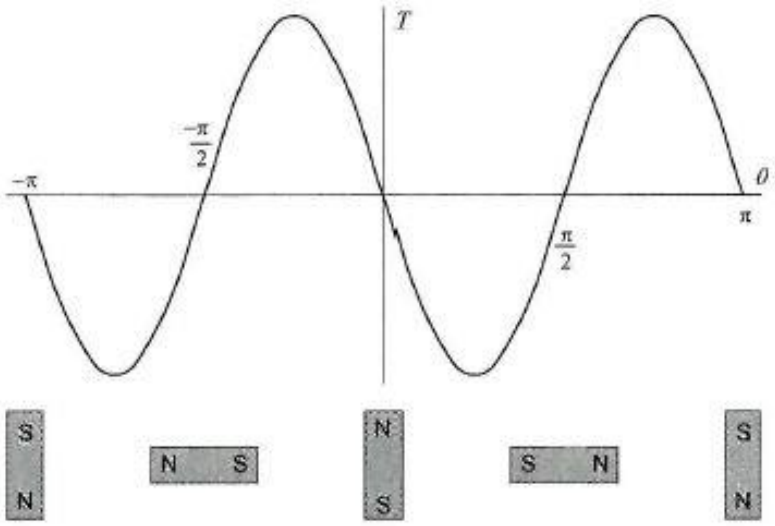
απομακρυνθούν λίγο από την κατακόρυφη θέση τότε τείνουν να επιστρέψουν στην αρχική θέση αφού όπως γνωρίζουμε από την θεωρία [53] είναι ζητούμενο η ελαχιστοποίηση της μαγνητικής γραμμής γεγονός που προκαλεί την εμφάνιση δύναμης.



(α) (β)

Σχήμα 3-17. Κατασκευή στάτη κινητήρα. (α) Χωρίς cogging torque, (β) εμφάνιση έκτυπων πόλων και άρα cogging torque.

Η εμφάνιση αυτής της δύναμης εξαρτάται από την γωνία που έχει περιστραφεί ο δρομέας του κινητήρα και η μορφή στην περίπτωση του κινητήρα στο Σχήμα 3-17, είναι ημιτονοειδής όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-18.



Σχήμα 3-18. Η μορφή της cogging torque σε έναν κινητήρα όπως του Σχήμα 3-17.

Γενικότερα όμως η ροπή αυτή μπορεί να παρουσιάζει και άλλες μορφές που εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Η Εξ. (3-22) αποτελεί την πιο απλή μορφή μοντελοποίησης της cogging torque.

$$T_{cog} = \frac{1}{2}\varphi_g^{\,2}\frac{dR}{d\theta} \tag{3-22}$$

η οποία ουσιαστικά δείχνει πως η ροπή η οποία εμφανίζεται είναι ανάλογη του τετραγώνου της μαγνητικής ροής στο διάκενο φ_g στο διάκενο και της μεταβολής στην μαγνητική αντίστασης ως προς την γωνία του δρομέα θ. Είναι λογικό να εξαρτάται από την μαγνητική αντίσταση αφού η παρουσία των

έκτυπων πόλων μειώνει το διάκενο και άρα την μαγνητική αντίσταση. Η εμφάνιση αυτής της ροπής έχει αρνητικές συνέπειες στην συμπεριφορά του κινητήρα κυρίως στις χαμηλές ταχύτητες αφού είναι υπεύθυνη για την εμφάνιση διαταραχών στη ροπή του κινητήρα. Βέβαια διαταραχές στην ροπή υπάρχουν και όταν η ΑΗΕΔ που παράγεται από τον κινητήρα δεν είναι στην ίδια φάση με το ρεύμα που διαρρέει τον κινητήρα ή είναι διαφορετικής μορφής. Η εμφάνιση της cogging torque επίσης θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί και ως αντίσταση στην κίνηση και άρα σαν στατική τριβή. Διάφοροι τρόποι υπάρχουν για την μείωση αυτής της ροπής όπως για παράδειγμα **μεγαλύτερος αριθμός μαγνητικών πόλων** στην επιφάνεια του στάτη και αυξημένος αριθμός πηνίων και έκτυπων πόλων στον στάτη. Μία άλλη ενέργεια για την μείωση του cogging torque είναι η τοποθέτηση των πόλων του δρομέα και του στάτη σε «allo-periodic» [2] διάταξη στην οποία ο αριθμός των πόλων του δρομέα δεν είναι ίδιος με τον αριθμό των πόλων του στάτη. Γενικά πάντως η ροπή αυτή υπάρχει πάντα στην κίνηση του κινητήρα και είναι ένα από τα τρία κομμάτια που συνιστούν την ροπή. Αυτό μπορούμε να το δούμε και από την Εξ. (3-23) όπου περιγράφει συνοπτικά όλες τις επιμέρους ροπές που εμφανίζονται έναν κινητήρα χωρίς ψήκτρες με μόνιμους μαγνήτες, [25].

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} - \frac{1}{2} \varphi_g{}^2 \frac{dR}{d\theta} + Ni \frac{d\varphi_g}{d\theta} \tag{3-23}$$

Στην οποία ο πρώτος και ο δεύτερος όρος είναι συνήθως ανεπιθύμητοι αλλά υπαρκτοί όροι γένεσης ροπής και αποτελούν την λεγόμενη **reluctance torque** σε έναν κινητήρα. Ο μεν πρώτος εμφανίζεται κυρίως όταν ο σχεδιασμός του κινητήρα προκαλεί μεταβολή της αυτεπαγωγής των πηνίων (**κατηγορία salient motors**) με την θέση αφού είδαμε ότι η επαγωγή εξαρτάται από την μαγνητική αντίσταση και αυτή μεταβάλλεται με την θέση του δρομέα στους κινητήρες με έκτυπους πόλους. Όταν αυτή η μεταβολή είναι θετική έχουμε γένεση ροπής και μείωση ροπής όταν αυτή είναι αρνητική. Ο δεύτερος όρος σχετίζεται με την cogging ροπή. Ο τρίτος όρος της Εξ. (3-23) είναι η λεγόμενη **mutual torque** και σχετίζεται με την κίνηση του κινητήρα αφού είναι αυτή που τείνει να ευθυγραμμίσει τους μαγνήτες με τα πηνία.

Τέλος άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη που δίνονται από τους κατασκευαστές των κινητήρων, κυρίως για την βιομηχανία των drones, είναι ο αριθμός **KV(rpm/Volt)**, που ουσιαστικά είναι η ταχύτητα του κινητήρα όταν του εφαρμόζεται μία τάση σε κατάσταση χωρίς φορτίο και ο αριθμός **xNyP** όπου x είναι ο αριθμός των πηνίων στο στάτη και y είναι ο αριθμός των μόνιμων μαγνητών στο δρομέα.

3.4 PMSM ή BLDC Κινητήρας

Μία από τις δυσκολότερες κατηγοριοποιήσεις στους ηλεκτρικούς κινητήρες χωρίς ψήκτρες είναι αυτή μεταξύ του κινητήρα χωρίς ψήκτρες μόνιμου ρεύματος (**brushless DC Motor - BLDC**) και του σύγχρονου κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες (**permanent magnet synchronous motor - PMSM**) ή κινητήρα χωρίς ψήκτρες εναλλασσόμενου ρεύματος (**brushless AC Motor – BLAC**). Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι για τον ορισμό παίζει ρόλο τόσο η μορφή της ΑΗΕΔ που παράγει ένας κινητήρας όταν περιστρέφεται και η οποία μπορεί να είναι στις ιδανικές περιπτώσεις τραπεζοειδής ή ημιτονοειδής όπως φάνηκες προηγουμένως, όσο και ο τρόπος με τον οποίο οδηγείται ο κινητήρας οποίος ομοίως όπως θα δούμε παρακάτω μπορεί να είναι είτε με τραπεζοειδές ρεύμα είτε με ημιτονοειδές ρεύμα.

Γενικά για να υπάρχει πλήρης ορισμός θα πρέπει να είναι πλήρως ορισμένα και τα δύο αλλά γενικά θα λέγαμε ότι οι κινητήρες οι οποίοι παράγουν τραπεζοειδή ΑΗΕΔ και ελέγχονται με τραπεζοειδή οδήγηση, περίπτωση που θα αναλυθεί παρακάτω θεωρείται κινητήρας χωρίς ψήκτρες με σταθερό ρεύμα (brushless DC Motor – BLDC motor). Στην περίπτωση όμως που η ΑΗΕΔ που παράγει ο κινητήρας είναι ημιτονοειδούς φύσεως και η οδήγηση είναι ημιτονοειδής, τότε ο κινητήρας ανήκει στην κατηγορία των σύγχρονων κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες. Αυτό είναι αναμενόμενο, διότι αν ανατρέξουμε στη θεωρία των 3-φασικών σύγχρονων κινητήρων, θα δούμε ότι αυτοί ελέγχονται με ρεύματα μορφής ημιτονοειδούς, συγκεκριμένα στα 50Hz, τη συχνότητα δικτύου, και η διέγερση πεδίου έρχεται όχι από μόνιμους μαγνήτες αλλά από πεδίο που τροφοδοτείται με συνεχές και σταθερό ρεύμα.

Έτσι θα λέγαμε ότι οι δύο τύποι κινητήρων χωρίς ψήκτρες προέρχονται από διαφορετικές ρίζες με τις οποίες αν και έχουν κοινά στοιχεία. Για τους μεν BLDC η ρίζα είναι οι κινητήρες DC με ψήκτρες ενώ για τους δε PMSM είναι οι 3φασικοί σύγχρονοι κινητήρες. Σε άλλη βιβλιογραφία θεωρούνται και οι δύο σύγχρονοι κινητήρες με διαφορετικής μορφής ΑΗΕΔ. Ο Πίνακας 3-1, παρουσιάζει μία σύγκριση των δύο τύπων κινητήρων.

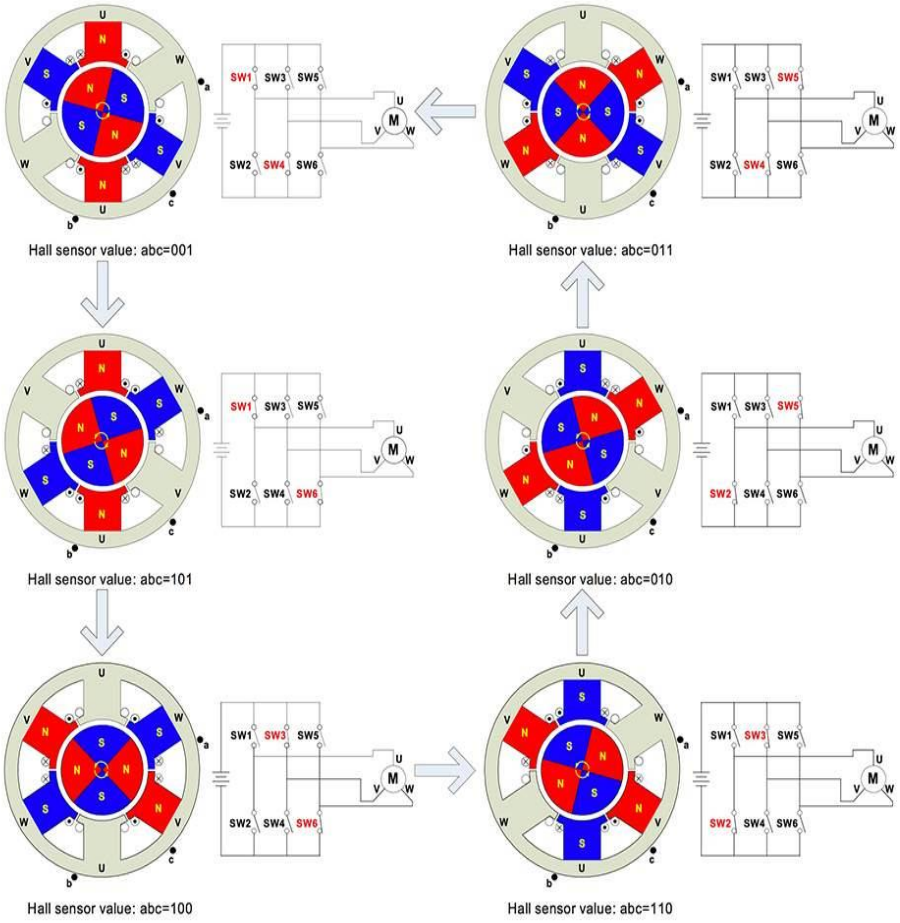
Πίνακας 3-1. Σύγκριση μεταξύ των δύο μηχανών, [80].

BLDC	PMSM
Σύγχρονη Μηχανή	Σύγχρονη Μηχανή
Τροφοδοσία με σταθερά ρεύματα	Τροφοδοσία με ημιτονοειδή ρεύματα
Τραπεζοειδής αντί - ηλεκτρική δύναμη	Ημιτονοειδής αντί - ηλεκτρική δύναμη
Δύο φάσεις επενεργούνται κάθε φορά	Επενεργούνται και οι τρεις φάσεις κάθε φορά
Ύπαρξη διαταραχής στην ροπή	Ομαλή απόκριση ροπής
Παρουσία αρμονικών ρεύματος χαμηλής τάξης στο ηχητικό εύρος	Λιγότερες αρμονικές λόγω της ημιτονοειδής επενέργησης
Περισσότερες απώλειες πυρήνα λόγω των αρμονικών	Χαμηλότερες απώλειες πυρήνα
Λιγότερες απώλειες στα transistor του Full H Bridge	Περισσότερες απώλειες στην ίδια συχνότητα
Αλγόριθμοι ελέγχου γενικά είναι απλοί	Αλγόριθμοι ελέγχου είναι μαθηματικά πιο πολύπλοκοι.

3.5 Τρόποι λειτουργίας και οδηγήσεις

Παρακάτω η ανάλυση των τρόπων λειτουργίας και οδήγησης των κινητήρων χωρίς ψήκτρες θα βασιστεί στους κινητήρες με 3 φάσεις. Η βασικότερη και πρώτη χρονικά οδήγηση κινητήρων είναι η τραπεζοειδής

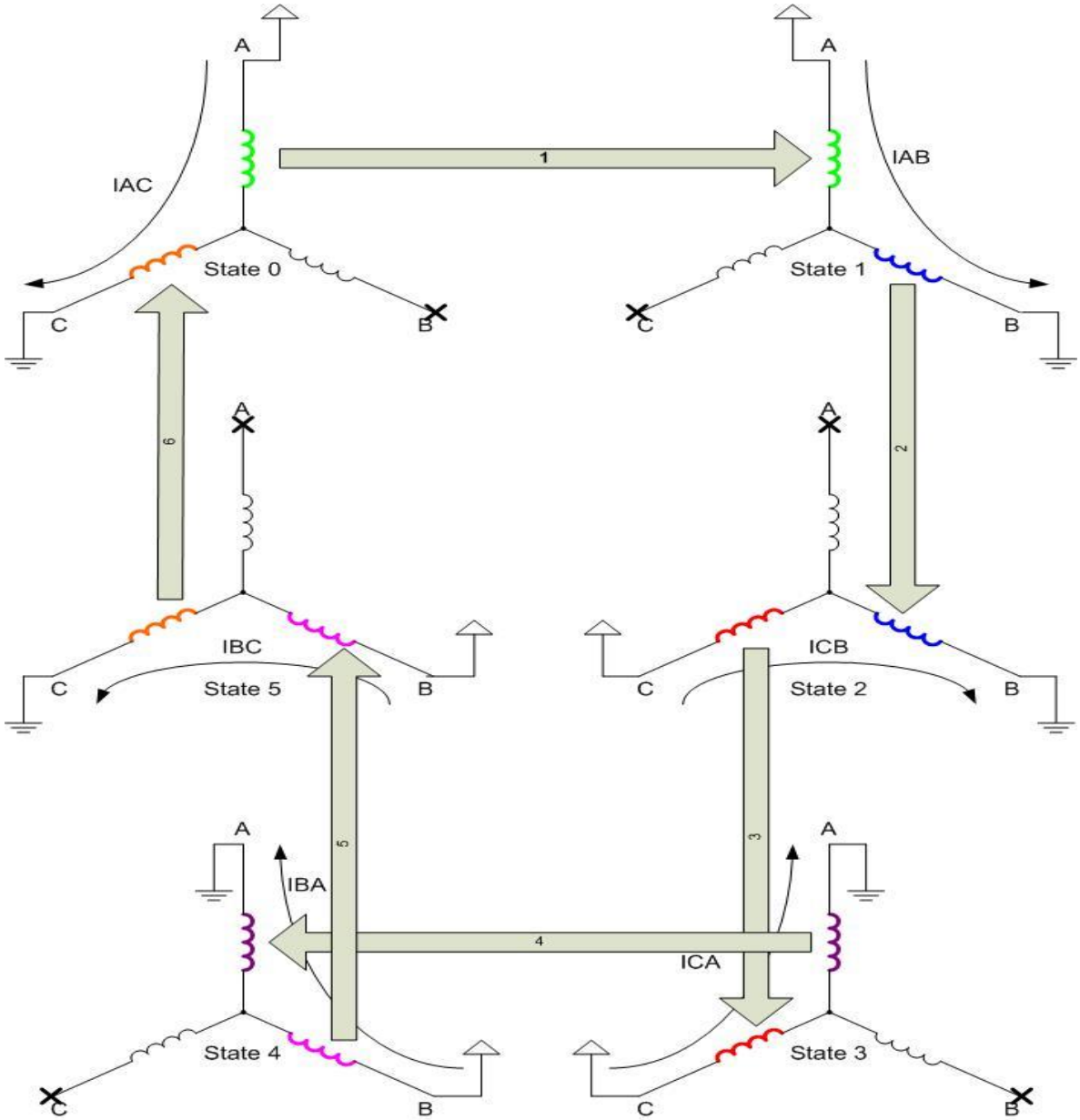
όπου συχνά στην ξένη βιβλιογραφία αναφέρεται ως **trapezoidal commutation** ή **six step commutation**. Βασική αρχή της οδήγησης αυτής είναι ότι κάθε φορά επενεργούνται δύο από τις τρεις φάσεις, με μία φάση κάθε φορά να μένει αφόρτιστη. Πιο συγκεκριμένα στην μέθοδο αυτή κάθε χρονική στιγμή μία φάση τροφοδοτείται με θετικό ρεύμα και μέσω της σύνδεση αστέρα ή τριγώνου μεταφέρεται το ρεύμα αυτό ως αρνητικό στην άλλη φάση που είναι συνδεδεμένη. Σημείωση ότι σαν θετικό θεωρείται το ρεύμα που εισέρχεται στην φάση του κινητήρα και ως αρνητικό το ρεύμα που εξέρχεται από την φάση του κινητήρα όπως στο Σχήμα 3-20. Η τρίτη φάση εκείνη την χρονική δεν διαρρέεται από ρεύμα και πολλές φορές χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ΑΗΕΔ και της οδήγησης χωρίς αισθητήρα (sensorless commutation). Αφού ο κινητήρας αποτελείται από 3 φάσεις, από την παραπάνω εξήγηση φαίνεται ότι υπάρχουν 6 πιθανοί συνδυασμοί με την εναλλαγή των φάσεων, βλ. Σχήμα 3-19 και Σχήμα 3-20. Κάθε πιθανή κατάσταση είναι ενεργή για 60 ηλεκτρικές μοίρες και οι μηχανικές μοίρες στις οποίες εν τέλει πραγματοποιείται αυτή η αλλαγή καθορίζεται από τον αριθμό των μόνιμων μαγνητών. Όσο υψηλότερος είναι ο αριθμός των πόλων και ο κινητήρας περιστρέφεται σε μία συγκεκριμένη ταχύτητα τόσο γρηγορότερα πρέπει να γίνει αυτή η αλλαγή αφού οι μηχανικές μοίρες που πρέπει να αλλάξει η κατάσταση είναι μικρότερες.



Σχήμα 3-19. Έξι χαρακτηριστικές φάσεις κινητήρα για τραπεζοειδή οδήγηση. Ο κινητήρας που απεικονίζεται είναι τετραπολικός αφού βλέπουμε να έχει 4 μαγνήτες. Αυτό σημαίνει ότι ανά μισή περιστροφή του δρομέα ολοκληρώνεται μία φορά το six step commutation, εφόσον ανά μισή περιστροφή οι μαγνήτες επαναλαμβάνονται. Αυτό το γεγονός φαίνεται και από την Εξ. (3-8). Ο κινητήρας T-motor U8 έχει 42 πόλους αρά μία ηλεκτρική περιστροφή επαναλαμβάνεται ανά 17.4 μηχανικές μοίρες.

Παρακάτω φαίνεται και πραγματικά πως διαρρέει τις φάσεις το ρεύμα σε ένα κινητήρα με σύνδεση αστέρα. Το ίδιο όμως θα ισχύει και για σύνδεση τριγώνου.

Αυτό που χρειάζεται ο ελεγκτής για να στείλει την απαραίτητη εντολή και να επενεργήσει κάθε φάση είναι σε ποια από τις 6 καταστάσεις βρίσκεται. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, το κλειδί είναι η χρήση ενός αισθητήρα θέσης όπως Hall sensor. Ο Πίνακας 3-2, περιέχει συνοπτικά τις έξι πιθανές καταστάσεις κωδικοποιημένες έτσι όπως παρέχονται από το Hall sensor. Γενικά η οδήγηση ενός κινητήρα χωρίς ψήκτρες μέσω αισθητήρα ονομάζεται **sensored commutation** σε αντίθεση με την περίπτωση όπου έχουμε **sensorless commutation.**

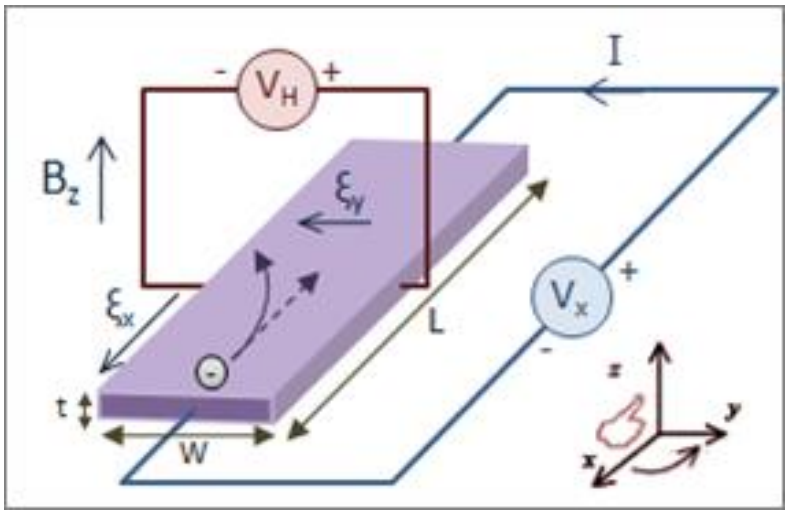


Σχήμα 3-20. Έξι χαρακτηριστικές για το πως φαίνεται η ροή του ρεύματος μέσα από δύο φάσεις και αφήνοντας μια φορά κάθε φάση ανενεργή. Χωρίς βλάβη της γενικότητας το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση της σύνδεση τριγώνου

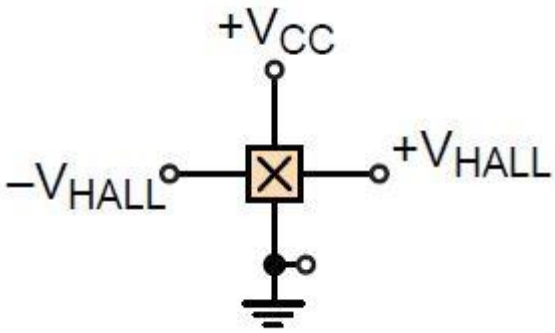
Πίνακας 3-2. Σχέσεις ιδανικών στοιχείων.

Ηλεκτρική γωνία	Κατάσταση Hall Sensor	Φάση Α	Φάση Β	Φάση Γ
$0^o - 60^o$	$\{0,0,1\}$	$+$	off	$-$
$60^o - 120^o$	$\{1,0,1\}$	$+$	$-$	off
$120^o - 180^o$	$\{1,0,0\}$	off	$-$	$+$
$180^o - 240^o$	$\{1,1,0\}$	$-$	off	$+$
$240^o - 300^o$	$\{0,1,0\}$	$-$	$+$	off
$300^o - 360^o$	$\{0,1,1\}$	off	$+$	$-$

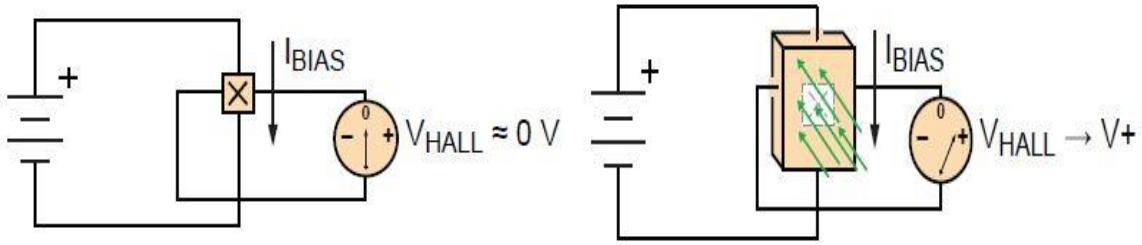
Οι αισθητήρες Hall ονομάζονται έτσι γιατί στηρίζονται στο φαινόμενο Hall κατά το οποίο όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα και υπάρχει μαγνητικό πεδίο τότε εμφανίζεται τάση στα άκρα κάθετη στην φορά του ρεύματος, βλ. Σχήμα 3-21 - Σχήμα 3-23.



Σχήμα 3-21. Ουσιαστικά το ρεύμα διαρρέει τον αγωγό και στα ηλεκτρόνια ασκείται δύναμη έχοντας μία καμπύλη τροχιά. Έτσι κάθετα στην ροή του ρεύματος εμφανίζεται τάση.



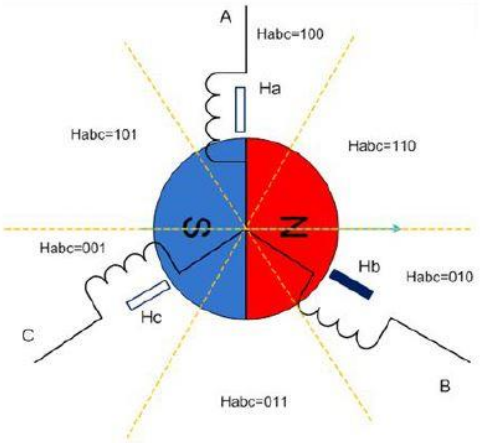
Σχήμα 3-22. Ο αισθητήρας Hall για να ενεργοποιηθεί χρειάζεται τροφοδοσία και να διαρρέεται από ρεύμα.



Σχήμα 3-23. Τυπικό κύκλωμα για την χρήση ενός αισθητήρα Hall στο οποίο φαίνεται ότι διαρρέονται από ρεύμα I_{BIAS}. (α) Εδώ δεν υπάρχει κάποιο μαγνητικό πεδίο γι' αυτό η τάση εξόδου είναι μηδέν. (β) Ύπαρξη μαγνητικού πεδίου και ως εκ τούτου εμφανίζεται τάση στα άκρα του hall αισθητήρα, [1].

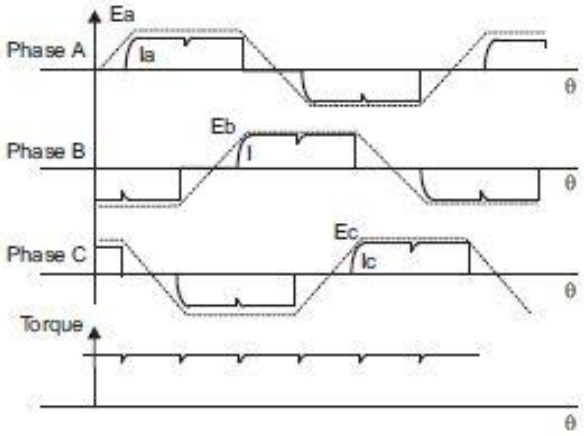
Έτσι βασισμένα σε αυτό το φαινόμενο, οι hall αισθητήρες ανάλογα με την φορά του μαγνητικού πεδίου ή αν δεν υπάρχει καθόλου μαγνητικό πεδίο εμφανίζουν τάση στα άκρα τους, η οποία μεταφράζεται σε 0 ή 1 και το δυαδικό – λογικό σήμα στέλνεται στον ελεγκτή του κινητήρα. Αν ο αισθητήρας βρεθεί σε μαγνητικό πεδίο βόρειου μαγνητικού πόλου τότε ως έξοδο περιμένουμε 1 αλλιώς 0. Οι αισθητήρες αυτοί τοποθετούνται στο στάτη του κινητήρα ανά 60 ή 120 ηλεκτρικές μοίρες και ο αριθμός τους είναι τρεις. Έτσι από τρεις αισθητήρες Hall προκύπτουν οκτώ συνδυασμοί, όπου όμως οι δύο συνδυασμοί {0,0,0} και {1,1,1} δεν είναι δυνατόν να προκύψουν λόγω κατασκευαστικών περιορισμών.

Στο Σχήμα 3-24, φαίνεται η πιο απλή περίπτωση κινητήρα με δύο πόλους όπου ηλεκτρικές μοίρες ταυτίζονται με τις μηχανικές μοίρες. Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε τους τρεις hall αισθητήρες να είναι σε διάταξη 120° ηλεκτρικών μοιρών αλλά και μηχανικών και παρατηρούμε ότι το σήμα που είναι ενεργό στην διάταξη την στιγμή που απεικονίζεται είναι το {0,1,0} αφού ο Hall αισθητήρας B βρίσκεται απέναντι από τον βόρειο μαγνητικό πόλο και οι δύο άλλοι hall αισθητήρες απέναντι από τον νότιο. Γενικά βλέπουμε ότι οι τρεις hall αισθητήρες χωρίζουν τις 360° ηλεκτρικές μοίρες σε 6 ίσα τμήματα όπου σε κάθε κομμάτι αντιστοιχίζεται μία συγκεκριμένη τριάδα. Έτσι ο ελεγκτής λαμβάνει την συγκεκριμένη τριάδα και γνωρίζει σε ποια από τις έξι περιοχές βρίσκεται ο δρομέας ώστε να στείλει ρεύμα στις αντίστοιχες φάσεις και το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στα πηνία να ακολουθείται από τον δρομέα του κινητήρα. Η θέση οδήγησης είναι το σημείο που αλλάζει σήμα η τριάδα των αισθητήρων Hall.



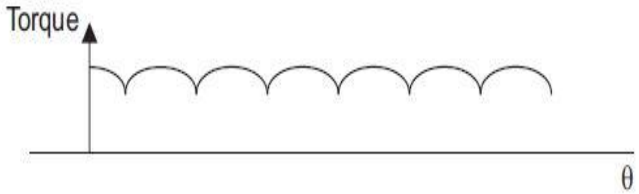
Σχήμα 3-24. Τοποθέτηση αισθητήρων Hall στον στάτη διπολικού κινητήρα χωρίς ψήκτρες για τραπεζοειδή οδήγηση. Ο κινητήρας είναι διπολικός και ως εκ τούτου οι αισθητήρες είναι και τοποθετημένοι ανά 120 ηλεκτρικές μοίρες αλλά και ανά 120 μηχανικές μοίρες, [47].

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης οδήγησης όταν συνδυάζεται με έλεγχο ρεύματος είναι πως απαιτείται κάθε φορά η μέτρηση ενός ρεύματος και πως δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί άλλος αισθητήρας. Επίσης ενεργοποιούνται οι φάσεις που παράγουν την περισσότερη ροπή. Για την βελτιστοποίηση αυτής της μεθόδου οδήγησης η ΑΗΕΔ πρέπει να είναι μορφής τραπεζοειδούς όπως και το ρεύμα, βλ. Σχήμα 3-25. Φυσικά το ρεύμα δεν είναι τραπεζοειδές σαν εντολή αλλά λόγω της επαγωγής τελικά παίρνει αυτή την μορφή. Γενικά ο συνδυασμός σταθερού ρεύματος με σταθερή ΑΗΕΔ συνεπάγεται θεωρητικά σταθερή ροπή. Παρ' όλα αυτά στην πράξη τα φαινόμενα είναι λίγο διαφορετικά. Η συγκεκριμένη μέθοδος επενέργησης παρουσιάζει το μειονέκτημα πως επειδή δεν έχουμε ιδανικές καταστάσεις σε έναν κινητήρα, λόγω της επαγωγής στις φάσεις υπάρχει μία δυναμική συμπεριφορά και ένας χρόνος απόκρισης. Έτσι σε κάθε φάση από τις έξι εμφανίζεται διαταραχή στην ροπή (**torque ripple)**, βλ. Σχήμα 3-25.



Σχήμα 3-25. Κατά την επενέργηση κάθε φάσης, το ρεύμα που διαρρέει παρουσιάζει μεταβατική απόκριση. Με διακεκομμένη φαίνεται η ανάπτυξη της ΑΗΕΔ, [80].

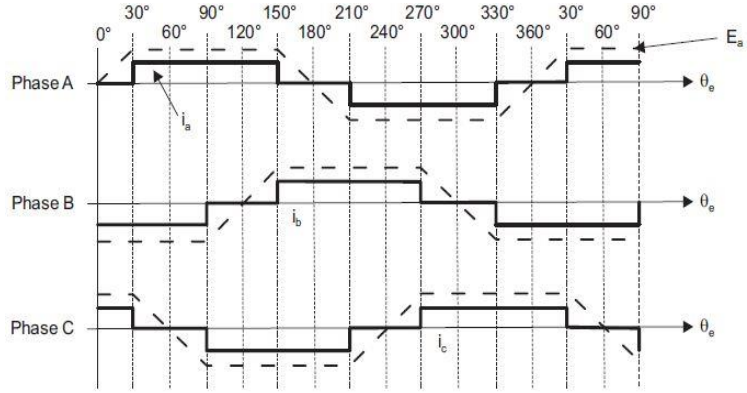
Σύμφωνα με την ιδανική ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας ισχύει η Εξ. (3-11). Ως εκ τούτου η ροπή που παράγεται είναι ανάλογη της μορφής της αντι-ηλεκτρικής δύναμης και της μορφής του ρεύματος για σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Αν στην παραπάνω περίπτωση με τραπεζοειδή ΑΗΕΔ, το ρεύμα έφτανε στη μέγιστη τιμή στιγμιαία, τότε η ροπή που θα αναπτυσσόταν θα ήτανε σταθερή. Επίσης υπάρχει η περίπτωση τραπεζοειδούς οδήγησης με ΑΗΕΔ ημιτονοειδούς μορφής. Στην περίπτωση αυτή η διαταρχή ροπής **(torque ripple)** είναι αρκετά μεγαλύτερη και η μορφή της είναι όπως παρουσιάζετα στο Σχήμα 3-26.



Σχήμα 3-26. Η μορφή της ροπής που παράγεται όταν το ρεύμα είναι ημιτονοειδούς μορφής ενώ η ΑΗΕΔ είναι τραπεζοειδούς μορφής, [80].

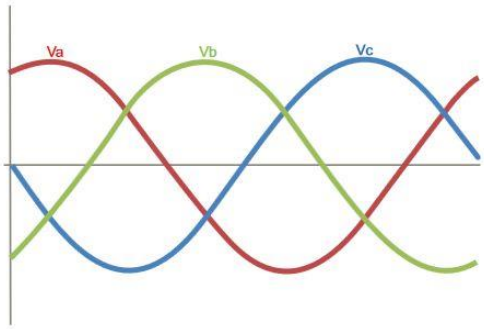
Τέλος σε πολλές εφαρμογές στις μέρες μας, κυρίως όμως στην βιομηχανία των drones, η οδήγηση αυτού του τύπου γίνεται και χωρίς την χρήση αισθητήρα (**sensorless commutation**). Οι μέθοδοι αυτές

βασίζονται στο γεγονός ότι η μία φάση του κινητήρα δεν επενεργείται σε κάθε ένα από τα έξι επιμέρους τμήματα του six – step commutation, και άρα είναι διαθέσιμη για την μέτρηση της ΑΗΕΔ. Όπως μπορούμε πολύ εύκολα να παρατηρήσουμε στο Σχήμα 3-27, κάθε φορά που η ΑΗΕΔ μηδενίζεται τότε οι άλλες δύο φάσεις διαρρέονται από ρεύμα. Υπολογίζοντας κάθε φορά τα σημεία που η τάση στα άκρα της φάσης που δεν επενεργείται μηδενίζεται, παρέχεται χρήσιμη πληροφορία για την θέση του δρομέα. Φυσικά υπάρχουν κι άλλα σημεία που πρέπει να προσέξει κανείς και που δεν θα αναλύσουμε στη συγκεκριμένη διπλωματική αφού χρειάζεται να γίνει μεγαλύτερη μελέτη ώστε να βρεθεί ακριβώς η θέση που πρέπει να αλλάξει η τροφοδοσία ρεύματος. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 3-27, τα σημεία που μηδενίζεται η ΑΗΕΔ δεν αντιστοιχούν ακριβώς στην αλλαγή κατάστασης αλλά υπάρχει ένα περιθώριο + και – 30 ηλεκτρικών μοιρών.



Σχήμα 3-27. Τυπική μορφή τραπεζοειδούς ΑΗΕΔ και τροφοδοσίας ρεύματος. Παρατηρούμε ότι τα σημεία που μηδενίζεται η ΑΗΕΔ της φάσης που δεν επενεργείται, είναι σημεία που στηρίζεται η οδήγηση χωρίς αισθητήρα αφού πριν και μετά από αυτά, υπάρχει περιθώριο + και – 30 ηλεκτρικών μοιρών για την αλλαγή σε μία από τις 6 πιθανές καταστάσεις.

Η άλλη ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος επενέργησης των κινητήρων χωρίς ψήκτρες είναι η οδήγηση με ημιτονοειδή ρεύματα. Αυτή η μέθοδος όπως εξηγήσαμε και παραπάνω είναι πιο κατάλληλη για σύγχρονους κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες (**PMSM**) όπου η ΑΗΕΔ έχει μορφή ημιτονοειδή. Πιο συγκεκριμένα σε αυτή την μέθοδο *κάθε* φάση του κινητήρα τροφοδοτείται από ημιτονοειδές ρεύμα και άρα όλες οι φάσεις είναι ενεργές. Κάθε φάση του κινητήρα έχει διαφορά φάσης με την προηγούμενη ίση με 120° ηλεκτρικές μοίρες όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-28.



Σχήμα 3-28. Τρία ημιτονοειδή κύματα για την οδήγηση ενός κινητήρα χωρίς ψήκτρες, [44].

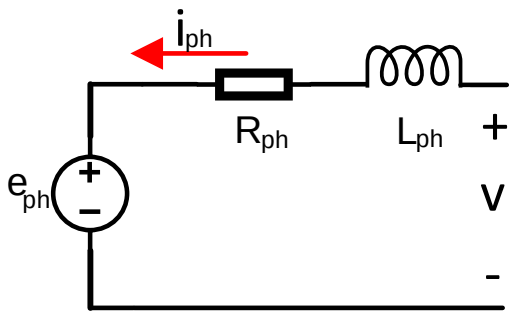
Γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι για την οδήγηση ενός κινητήρα με ημιτονοειδούς μορφής ρεύματα δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί αισθητήρας θέσης αφού απλά ρυθμίζοντας την τροφοδοσίας

της τάσης σε συγκεκριμένα Volt και συγκεκριμένη συχνότητα με τη βοήθεια κατάλληλου ελεγκτή είναι δυνατόν να επιτευχθεί έλεγχος ταχύτητας ανοικτού βρόχου. Πιο συγκεκριμένα, αν υποθέσουμε ότι η συχνότητα της τροφοδοσίας είναι f_{el}, τότε η ταχύτητα του κινητήρα καθορίζεται, όπως και ενός σύγχρονου κινητήρα, από τη σχέση που συνδέει την ταχύτητα με τον αριθμό των πόλων και την συχνότητα τροφοδοσίας. Άρα για την ταχύτητα του κινητήρα ισχύει η Εξ. (3-24), η οποία ονομάζεται και σύγχρονη ταχύτητα αφού συγχρονίζεται η ταχύτητα του κινητήρα με την συχνότητα της τροφοδοσίας.

$$n_{rpm} = \frac{120 f_{el}}{N_m} \tag{3-24}$$

όπου n_{rpm} είναι η ταχύτητα του κινητήρα σε στροφές ανά λεπτό, f_{el} η ηλεκτρική συχνότητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου και N_m ο αριθμός των πόλων του κινητήρα. Βέβαια όπως θα δούμε παρακάτω είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τη θέση του δρομέα είτε για τον έλεγχο ταχύτητας κλειστού βρόχου είτε για έλεγχο ροπής. Γενικά ο έλεγχος ροπής είναι συνήθης σε διάφορες εφαρμογές όπως στην ρομποτική και έχουν αναπτυχθεί ειδικοί αλγόριθμοι κατά τους οποίους βελτιστοποιείται η μέθοδος τροφοδοσίας με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ροπής για συγκεκριμένο ρεύμα. Πριν προχωρήσουμε όμως σε αυτή την μέθοδο, σκόπιμο είναι να τονίσουμε ότι η μέθοδος επενέργησης κινητήρων με ημιτονοειδή τροφοδοσία σε σύγχρονο κινητήρα με ημιτονοειδή ΑΗΕΔ, προσφέρει από ελάχιστες έως και μηδενικές διαταραχές ροπής. Επίσης καλύτερο θα ήταν πρώτα να μελετήσουμε τη μοντελοποίηση ενός σύγχρονου κινητήρα και το σχετικό μαθηματικό μοντέλο.

Αν θέλαμε να περιγράψουμε με φυσικά στοιχεία την μοντελοποίηση κάθε φάσης του κινητήρα, θα λέγαμε, ότι αποτελείται από μία αντίσταση, σε σειρά με μία αυτεπαγωγή και την αναπτυσσόμενη ΑΗΕΔ. Έτσι όταν εφαρμόζεται τάση σε κάθε φάση τότε αυτή διαρρέεται από ρεύμα ανάλογα με την μορφή που έχει η τάση. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τελικά την κάθε φάση αλλά και όλον τον κινητήρα είναι οι παρακάτω βασιζόμενες στο μοντέλο που φαίνεται στο Σχήμα 3-29.



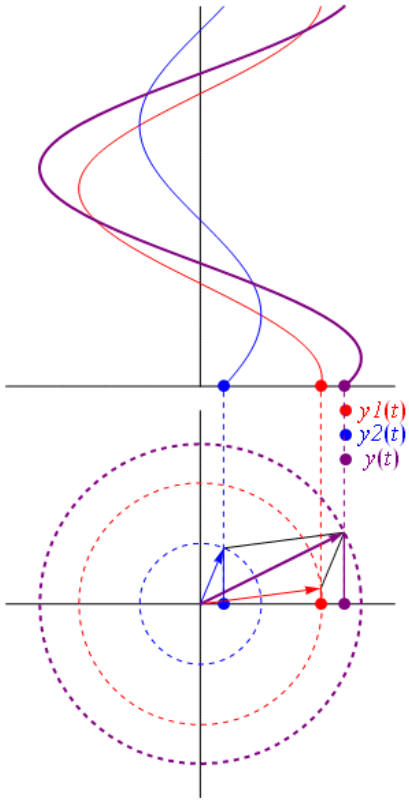
Σχήμα 3-29. Τα φυσικά στοιχεία που αποτελείται κάθε φάση του κινητήρα.

$$\begin{aligned} v_a &= i_a R_a + \frac{di_a}{dt} L_a + e_a \\ v_b &= i_b R_b + \frac{di_b}{dt} L_b + e_b \\ v_c &= i_c R_c + \frac{di_c}{dt} L_c + e_c \end{aligned} \tag{3-25}$$

Για το ρεύμα ισχύει η Εξ. (3-26).

$$
\begin{aligned}
i_a &= I\sin(\omega_{el}t) \\
i_b &= I\sin(\omega_{el}t + \frac{2\pi}{3}) \\
i_c &= I\sin(\omega_{el}t + \frac{4\pi}{3})
\end{aligned}
\tag{3-26}
$$

Φυσικά οι Εξ. (3-25) και (3-26) δεν είναι άσχετες μεταξύ τους, αφού η τάση τροφοδοσίας και γενικά οι μεταβλητές ισχύος στις φάσεις α, b, c είναι ίδιες, απλά διαφέρουν κατά 120° ηλεκτρικές μοίρες. Οι κυματομορφές του ρεύματος είναι όπως φαίνονται στο Σχήμα 3-30. Επίσης επειδή η τροφοδοσία είναι ημιτονοειδούς μορφής, η ανάλυση των κινητήρων γίνεται χρησιμοποιώντας διανύσματα – φασιδείκτες που όπως γνωρίζουμε είναι μιγαδικοί αριθμοί όπου το φυσικό νόημα εμπεριέχεται στο πραγματικό μέρος και το οποίο αντιστοιχεί σε κυματομορφή καθώς περιστρέφεται ο φασιδείκτης, βλ. Σχήμα 3-30. Τα διανύσματα αυτά περιστρέφονται με την ταχύτητα της ηλεκτρικής συχνότητας.



Σχήμα 3-30. Σχηματική αναπαράσταση φασιδείκτων όπου το πραγματικό μέρος αντιστοιχεί στο φυσικό μέγεθος.

Στο Σχήμα 3-31, βλέπουμε το διάγραμμα με τους φασιδείκτες που αντιστοιχεί σε έναν σύγχρονο κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες. Γνωρίζουμε, βλέποντας και το Σχήμα 3-29 ότι η σύνθετη αντίσταση της κάθε φάσης του κινητήρα είναι:

$$\mathbf{Z_{ph}} = R_{ph} + jX_{ph} \tag{3-27}$$

Όπου R_{ph} και X_{ph} είναι η αντίσταση [Ω] και η αντίδραση [Ω] κάθε φάσης αντίστοιχα. Για την τελευταία ισχύει ότι:

$$X_{ph} = 2\pi f_{el} L_{ph} \tag{3-28}$$

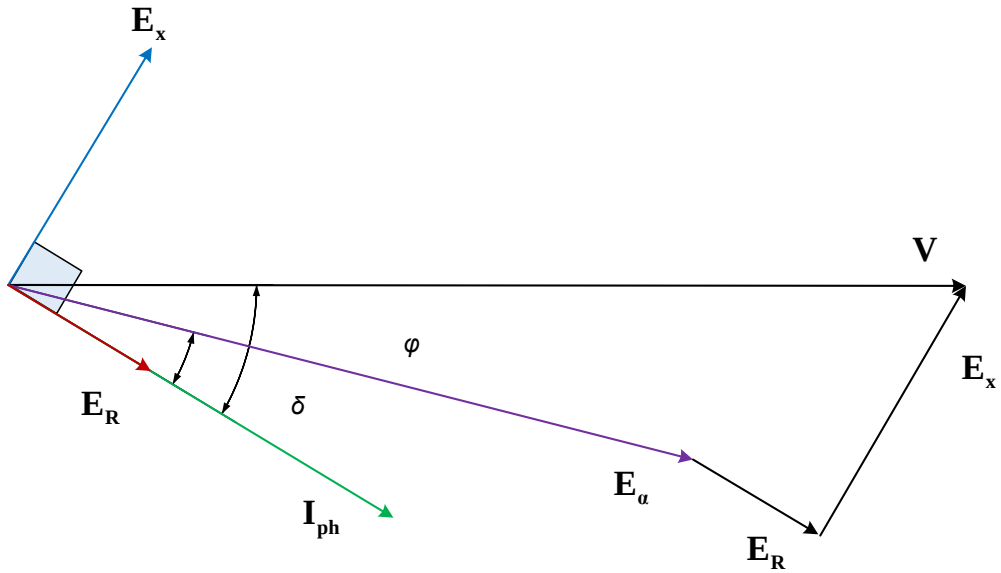
Γενικά στην μελέτη των σύγχρονων κινητήρων, η πτώση τάσης λόγω της αντίστασης αμελείται για να είναι πιο απλή η ανάλυση [45], [53], καθώς η αντίδραση είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση. Στην δική μας περίπτωση όμως η αυτεπαγωγή L_{ph} είναι πολύ μικρή και δεν μπορούμε να αμελήσουμε την αντίσταση. Ως εκ τούτου όπως φαίνεται και στον διανυσματικό διάγραμμα φασιδείκτων, βλ. Σχήμα 3-31, έχουμε τις εξής πτώσεις τάσεις σε κάθε φάση. Την πτώση τάσης στην αντίσταση, E_R, την πτώση τάσης στην αντίδραση E_X, και την ΑΗΕΔ, E_α. Για κάθε ένα από μεγέθη ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} \mathbf{E_R} &= \mathbf{I_{ph}} R_{ph} \\ \mathbf{E_X} &= j\mathbf{I_{ph}} X_{ph} \end{aligned} \tag{3-29}$$

Αλλά ισχύει από τον νόμο τάσεων του Kirchhoff ότι το άθροισμα των τάσεων ισούται με μηδέν, ή ότι ισχύει η παρακάτω εξίσωση.

$$\mathbf{V} = \mathbf{E_\alpha} + \mathbf{E_R} + \mathbf{E_x} \tag{3-30}$$

Από τις Εξ. (3-29) και (3-30), και θεωρώντας χωρίς βλάβη της γενικότητας τον φασιδείκτη της τάσης τροφοδοσίας στον πραγματικό άξονα προκύπτει η διεύθυνση και μέτρο του διανύσματος της ΑΗΕΔ. Παρατηρούμε στο διάγραμμα ότι το ρεύμα βρίσκεται σε διαφορά φάσης φ + δ ηλεκτρικές μοίρες από την τάση τροφοδοσίας όπως είναι και λογικό αφού υπάρχει η σύνθετη αντίσταση της φάσης. Επίσης βλέπουμε πως το διάνυσμα της ΑΗΕΔ E_α είναι, στην γενική περίπτωση, σε διαφορά φάσης δ με το ρεύμα. Θα δούμε όμως, ότι προκειμένου να αναπτυχθεί μέγιστη ροπή στον κινητήρα για το ίδιο ρεύμα πρέπει αυτή η διαφορά φάσης δ να είναι μηδέν και τα δύο μεγέθη να βρίσκονται σε φάση.



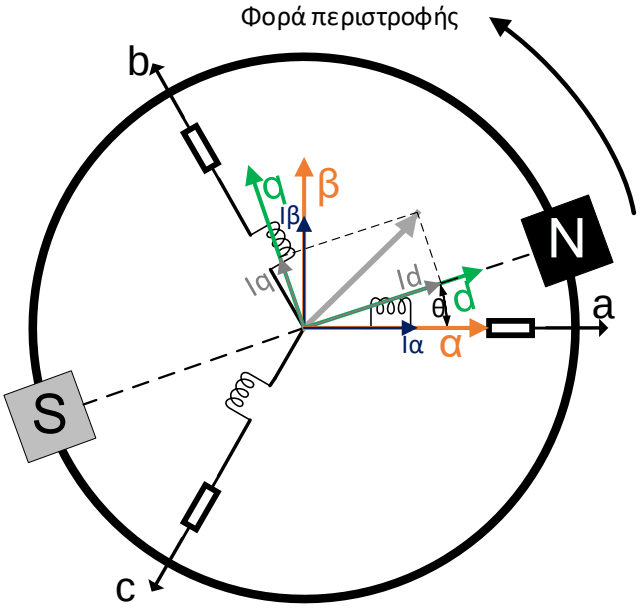
Σχήμα 3-31. Διανυσματικό διάγραμμα φασιδείκτων σύγχρονου κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες.

Επειδή τα μεγέθη μεταβάλλονται με τον χρόνο και μελετώνται σαν φασιδείκτες που περιστρέφονται όπως στο Σχήμα 3-30, είναι σύνηθες, στην μελέτη των τριφασικών συστημάτων, τα μεγέθη αυτά να μελετώνται σε περιστρεφόμενα συστήματα συνταγμένων και να αντιμετωπίζονται ως σταθερά μεγέθη. Η ανάλυση αυτή βασίζεται στην μετατροπή του Clark και την μετατροπή Park, οι οποίες περιγράφονται

λεπτομερώς στο Παράρτημα. Οι αναλύσεις αυτές βασίζονται κυρίως στο γεγονός πως τα ρεύματα σε ένα τριφασικό σύστημα βρίσκονται σε ισορροπία, δηλαδή πως λόγω το νόμου του Kirchhoff ισχύει:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \tag{3-31}$$

Αρχικά η μετατροπή Clark λαμβάνει χώρα από το σταθερό σύστημα «abc», στο σταθερό σύστημα «αβ» και την μετάβαση της ανάλυσης από τρισδιάστατο πρόβλημα σε δισδιάστατο, ενώ η μετατροπή Park λαμβάνει χώρα από το σύστημα «αβ», στο περιστρεφόμενο σύστημα «dq», βλ. Σχήμα 3-32 και Παράρτημα. Το σύστημα αυτό περιστρέφεται με ταχύτητα ίση με την ηλεκτρική συχνότητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου στα πηνία του στάση και ως εκ τούτου, σε αυτό το σύστημα τα μεταβαλλόμενα με τον ίδιο ρυθμό ρεύματα αντιμετωπίζονται ως σταθερά. Γενικά αυτό το σύστημα μπορεί να αρχίζει από οποιαδήποτε θέση στον δρομέα αλλά επιλέγουμε να έχουμε τον έναν άξονα (**d - direct axis**) στην διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τους μόνιμους μαγνήτες και τον άλλο άξονα (**q - quadrature axis**) κάθετο στον direct axis κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες, αφού όλοι οι υπολογισμοί μέχρι τώρα γίνονται στην ηλεκτρική συχνότητα και όχι στην μηχανική, βλ. Σχήμα 3-32 και Παράρτημα. Ο λόγος της επιλογής των αξόνων θα γίνει πιο ξεκάθαρος παρακάτω. Αν ο αριθμός των πόλων του κινητήρα είναι μεγαλύτερος από δύο και είναι πχ τέσσερις, τότε η γωνία που είναι στραμμένος ο quadrature axis από τον direct axis είναι 45 μηχανικές μοίρες και 90 ηλεκτρικές πάλι.



Σχήμα 3-32. Προβολή πάνω στο επίπεδο «αβ» που προκύπτει από τον μετασχηματισμό Clark αλλά και το σύστημα συντεταγμένων «dq» που προκύπτει από τον μετασχηματισμό Park. Παρατηρούμε ότι ο direct άξονας είναι στην διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου – διεύθυνση των μαγνητών και ο quadrature (κάθετος) άξονας είναι στραμμένος κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες. Επειδή ο κινητήρας είναι διπολικός οι μηχανικές με τις ηλεκτρικές μοίρες ταυτίζονται.

Η εφαρμογή της μετατροπής Clark & Park στα τρία ρεύματα των φάσεων, οδηγεί στο σταθερό ρεύμα Id (direct current) και στο Iq (quadrature current), για τις σχέσεις των οποίων με τα ρεύματα

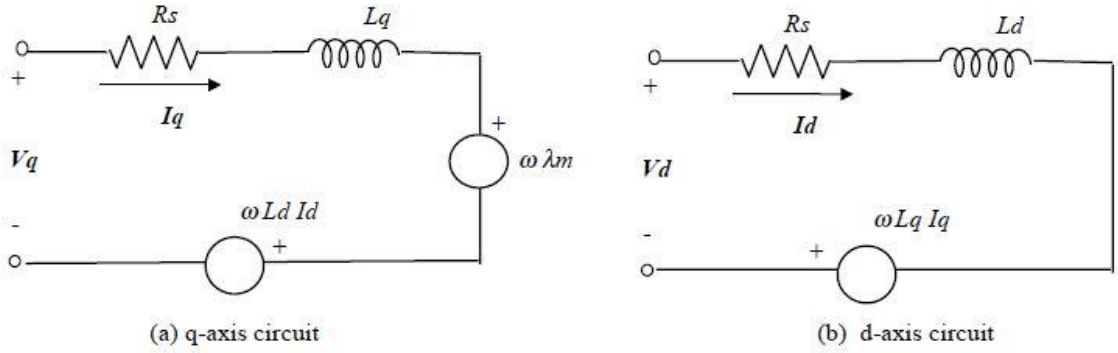
τροφοδοσίας i_a, i_b, i_c, υπάρχει ανάλυση στο Παράρτημα. Επίσης αν επιβάλλουμε τον μετασχηματισμό των Clark και Park σε όλα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τον κινητήρα, όπως για παράδειγμα την τάση, την πεπλεγμένη ροή από τους μαγνήτες, την πεπλεγμένη ροή από τα πηνία, την αυτεπαγωγή και την αλληλεπαγωγή, μπορούμε να εξάγουμε, με βάση τις Εξ. (3-25), το μαθηματικό μοντέλο που ισχύει για τους τριφασικούς κινητήρες χωρίς ψήκτρες στο περιστρεφόμενο σύστημα «dq» και το οποίο είναι το εξής:

$$\begin{aligned} V_d &= RI_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_{el}\lambda_q \\ V_q &= RI_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_{el}\lambda_d \end{aligned} \tag{3-32}$$

όπου v_d και v_q η εφαρμοζόμενη τάση στον direct και στον quadrature άξονα, λ_d και λ_q η πεπλεγμένη ροή στους αντίστοιχους άξονες και ω_{el} η ηλεκτρική γωνιακή συχνότητα περιστροφής. Η Εξ. (3-32) είναι και η βασική εξίσωση με την οποία μελετάται ένας σύγχρονος κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες, χρησιμοποιώντας σταθερά μεγέθη. Η Εξ. (3-32) μπορεί να γραφτεί και με την μορφή της Εξ. (3-33), βλέπε Παράρτημα.

$$\begin{aligned} V_d &= (R + L_d \frac{d()}{dt})I_d - \omega_{el}L_q I_q \\ V_q &= (R + L_q \frac{d()}{dt})I_q + \omega_{el}L_d I_d + \omega_{el}\lambda_f \end{aligned} \tag{3-33}$$

όπου L_d και L_q είναι η αυτεπαγωγή στον direct και στον quadrature άξονα και λ_f η πεπλεγμένη ροή από τους μόνιμους μαγνήτες. Οι Εξ. (3-32) και (3-33) αποτελούν θεμελιώδεις εξισώσεις περιγραφής των κινητήρων αυτών και με βάση αυτές μελετώνται οι συναρτήσεις μεταφοράς του κινητήρα χωρίς ψήκτρες για διάφορους ελέγχους (θέσης, ταχύτητας κ.λ.π), [10], [82].Στο Σχήμα 3-33, απεικονίζεται το αντιστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα του κινητήρα.



Σχήμα 3-33. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες, [50].

Τέλος έχουμε πως η ροπή που παράγει ο κινητήρας, βλέπε Παράρτημα, δίνεται από την εξίσωση:

$$T = \frac{3}{2}\frac{N_m}{2}(\lambda_f I_q + (L_d - L_q)I_q I_d) \tag{3-34}$$

Το 3/2 είναι χαρακτηριστικός αριθμός των τριφασικών συστημάτων. Αν ο αριθμός των φάσεων ήταν γενικά q τότε όσον αφορά την ροπή θα ίσχυε η Εξ. (3-35), [45]:

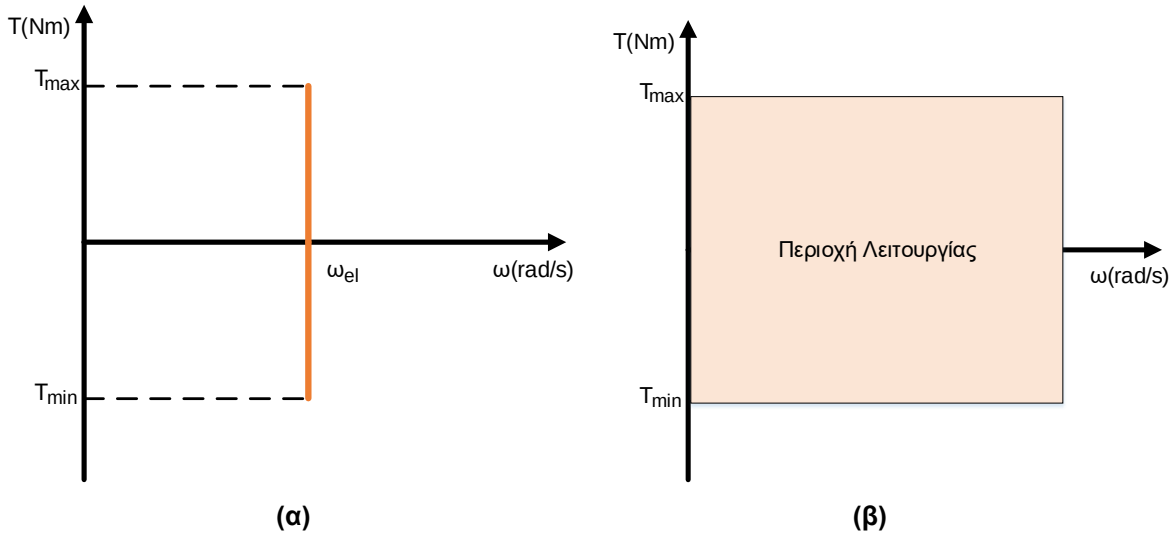
$$T = \frac{q}{2}\frac{N_m}{2}(\lambda_f I_q + (L_d - L_q)I_q I_d) \tag{3-35}$$

Στον έλεγχο πεδίου επιθυμούμε η συνιστώσα που αντιστοιχεί στον άξονα d, βλ. Σχήμα 3-32, να είναι μηδέν και άρα καταλήγουμε στον ίδιο τύπο για την ροπή.

$$T = \frac{3}{2}\frac{N_m}{2}(\lambda_f I_q) = \frac{3}{2}K_\Omega I_q \tag{3-36}$$

όπου K_Ω είναι η σταθερά ταχύτητας κάθε φάσης όπως θα δούμε παρακάτω. Για πληροφορίες σχετικά με την ροπή του κινητήρα βλέπε Παράρτημα.

Γενικότερα ένα από τα μειονεκτήματα των σύγχρονων κινητήρων είναι ότι κλειδώνουν σε μία συγκεκριμένη ταχύτητα που καθορίζεται από την συχνότητα τροφοδοσίας, περιορίζοντας την περιοχή λειτουργίας σε μία μόνο ταχύτητα, βλ. Σχήμα 3-34α. Αυτό για παράδειγμα λαμβάνει χώρα, στους σύγχρονους κινητήρες που κλειδώνουν στην συχνότητα τροφοδοσίας του ηλεκτρικού ρεύματος, π.χ. 50Hz για την Ευρώπη. Σήμερα όμως, ειδικές διατάξεις οδήγησης είναι ικανές να παράγουν τάση και τροφοδοσία σε διάφορες συχνότητες, εξαλείφοντας αυτό το μειονέκτημα και δίνοντας την δυνατότητα αύξησης του εύρους της περιοχής λειτουργίας, βλ. Σχήμα 3-34β.

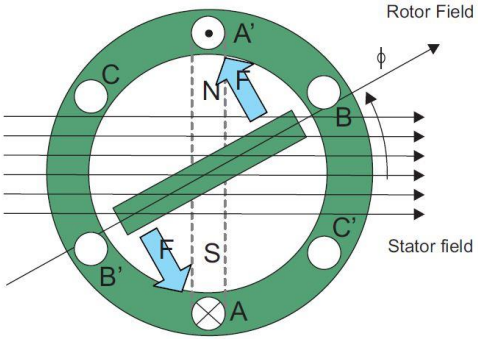


Σχήμα 3-34. (α) Κλασική περιοχή λειτουργίας σύγχρονου κινητήρα με κλειδωμένη ταχύτητα περιστροφής στην συχνότητα τροφοδοσίας. (β) Περιοχή λειτουργίας σύγχρονου κινητήρα με ειδικές διατάξεις οδήγησης να παρέχουν μεγάλο εύρος συχνοτήτων τροφοδοσίας.

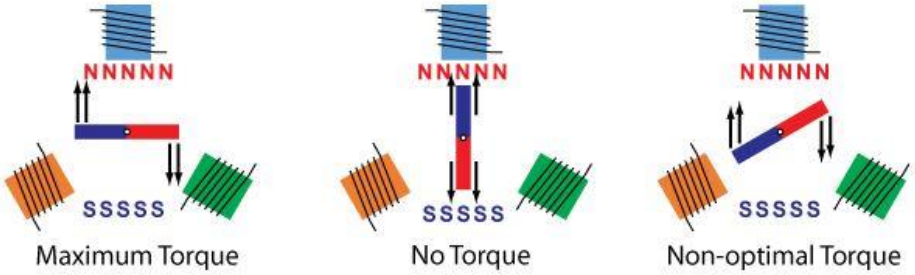
Γενικά ένας ακριβής μηχανισμός παραγωγής συχνότητας είναι απαραίτητος και αρκετός προκειμένου να οδηγήσει ένα σύγχρονο κινητήρα σε συγκεκριμένες στροφές, σε αντίθεση με έναν κινητήρα επαγωγής στην περίπτωση του οποίου, θα ήταν απαραίτητο να υπάρχει αισθητήρας ταχύτητας. Στην πράξη όμως, σπάνια χρησιμοποιούμε ανοικτού βρόχου έλεγχο καθώς συνήθως χρησιμοποιείται ο έλεγχος πεδίου (**field oriented control**), [31].

Κύριο χαρακτηριστικό αυτής της μεθόδου είναι ότι επιτρέπει στον χειριστή να ελέγξει τόσο την ροπή όσο και την μαγνητική ροή στο στάτη ξεχωριστά και ανεξάρτητα, αποτρέπει τους σύγχρονους κινητήρες να χάσουν τον συγχρονισμό ενώ τους επιτρέπει να κλειδώσουν στην σύγχρονη ταχύτητα που επιβάλλεται από την συχνότητα τροφοδοσίας της διάταξης οδήγησης. Ουσιαστικά ο έλεγχος πεδίου είναι, ότι λέει και το όνομά του, ο έλεγχος του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τους μόνιμους

μαγνήτες και του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τα πηνία του στάτη. Ουσιαστικά γνωρίζουμε πως το πεδίο στον στάτη στρέφεται με την ηλεκτρική συχνότητα περιστροφής και το μαγνητικό πεδίο των μόνιμων μαγνητών από τον δρομέα ακολουθεί αυτό το μαγνητικό πεδίο. Αν σκεφτούμε αυτά τα **δύο μαγνητικά πεδία ως διανύσματα**, βλ. Σχήμα 3-35, τότε η ροπή που παράγεται εξαρτάται από το διανυσματικό γινόμενο αυτών των δύο διανυσμάτων. Όταν αυτά τα διανύσματα είναι ευθυγραμμισμένα τότε παράγεται μηδενική ροπή ενώ όταν είναι κάθετα παράγεται μέγιστη ροπή, βλ. Σχήμα 3-36. Είναι αντίστοιχο της κλασικής περιγραφής με το μαγνητικό πεδίο και τον ρευματοφόρο αγωγό που δέχεται δύναμη “BIL”, [31].



Σχήμα 3-35. Τα δύο διανύσματα που εκφράζουν την διεύθυνση των μαγνητικών πεδίων των πηνίων του στάτη και των μόνιμων μαγνητών του δρομέα εν γένει διαφέρουν κατά γωνία δ, [79].

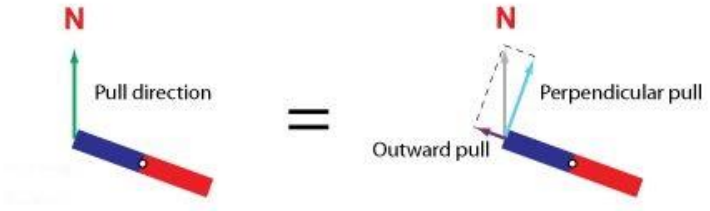


Σχήμα 3-36. Όταν το μαγνητικό πεδίο του στάτη είναι κάθετο στο μαγνητικό πεδίο από τους μόνιμους μαγνήτες τότε παράγεται η μέγιστη ροπή.

Αυτό άλλωστε το γνωρίζουμε και από την θεωρία των σύγχρονων κινητήρων, η ροπή σε συνάρτηση με την γωνία μεταξύ των δύο μαγνητικών πεδίων είναι συνάρτηση ημιτονοειδής, βλέπε Εξ. (3-43) και γίνεται μέγιστη όταν η γωνία αυτή είναι 90 μοίρες, [53].

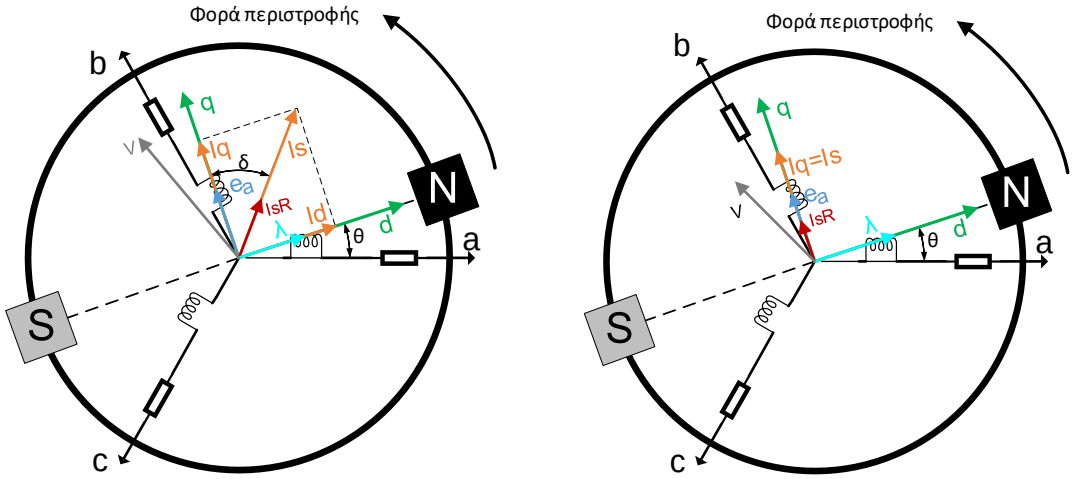
Προκειμένου να γίνει ο έλεγχος πεδίου λοιπόν, χρειάζεται να γνωρίζουμε την θέση του δρομέα κάθε φορά και γι’ αυτό χρησιμοποιείται αισθητήρας θέσης όπως οπτικός κωδικοποιητής (optical encoder). Όπως αναφέραμε προηγουμένως, ο direct άξονας είναι πάντα στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και άρα η πεπλεγμένη ροή από τους μόνιμους μαγνήτες για τον κινούμενο δισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων «dq» βρίσκεται πάντα στην διεύθυνση αυτού του άξονα, βλέπε Παράρτημα. Ως εκ τούτου η μεταβολή της πεπλεγμένης ροής που είναι ΑΗΕΔ είναι στραμμένη κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες [12] και βρίσκεται πάντα στην διεύθυνση του άξονα q. Από την άλλη το μαγνητικό πεδίο από τα πηνία είναι το άμεσο αποτέλεσμα της εφαρμογής ρεύματος σε αυτά. Το ρεύμα αναλύεται

στο ρεύμα που προκαλεί την κάθετη δύναμη μεταξύ των δύο μαγνητικών πεδίων και στο ρεύμα που προκαλεί την φυγόκεντρη δύναμη, βλ. Σχήμα 3-37.



Σχήμα 3-37. Η δύναμη που δημιουργείται είναι το όταν τα μαγνητικά πεδία δεν είναι κάθετα. Η συνισταμένη δύναμη αναλύεται σε δύναμη κάθετη και σε δύναμη προς τα έξω φυγοκεντρική.

Επίσης το διάνυσμα του ρεύματος στο σύστημα «dq» βρίσκεται σε διαφορά φάσης από την ΑΗΕΔ και αναλύεται σε δύο συνιστώσες όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-38α, μία στον direct άξονα και μία στον quadrature άξονα. Ουσιαστικά η συνιστώσα του ρεύματος στον direct άξονα είναι που συνδέεται με την δύναμη που τραβάει ακτινικά προς τα έξω τον δρομέα, ενώ η συνιστώσα του ρεύματος στον quadrature άξονα, είναι που συνδέεται με την κάθετη δύναμη ή ροπή αντίστοιχα. Ως εκ τούτου προκειμένου για το ίδιο ρεύμα να παραχθεί η μέγιστη ροπή θα πρέπει η συνιστώσα στον quadrature άξονα να είναι μέγιστη ενώ η συνιστώσα στον direct άξονα να είναι μηδέν, βλ. Σχήμα 3-38β. Αυτό ισχύει και γιατί, αν μελετήσουμε ενεργειακά την ανάπτυξη ροπής έχουμε ότι για σταθερή ταχύτητα, η ισχύς εξόδου και άρα η ροπή και η αποδοτικότητα του κινητήρα αυξάνει όταν το γινόμενο του διανύσματος της ΑΗΕΔ και του ρεύματος είναι μέγιστο και αυτό συμβαίνει όταν αυτά τα δύο είναι στην ίδια φάση και άρα παράλληλα.



(α) **(β)**

Σχήμα 3-38. Τα διανυσματικά διαγράμματα των ηλεκτρομηχανικών μεγεθών του κινητήρα. (α) Το ρεύμα που αναπτύσσεται βρίσκεται σε διαφορά φάσης από το διάνυσμα της αντί - ηλεκτρικής δύναμης. (β) Το διάνυσμα του ρεύματος βρίσκεται στην ίδια φάση με την αντί - ηλεκτρική δύναμη και ως εκ τούτου παράγεται μέγιστη ροπή. Από τα δύο σχήματα παρατηρούμε ότι για το ίδιο ποσό ροπής, η συνιστώσα i_q είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις το συνολικό ποσό ρεύματος στην (α) περίπτωση είναι μεγαλύτερο αυξάνοντας της ωμικές απώλειες.

Επίσης το ίδιο μπορούμε να συμπεράνουμε και από τις μαθηματικές εξισώσεις παρακάτω. Αρχικά θεωρούμε ότι το ρεύμα βρίσκεται σε διαφορά φάσης δ με την ΑΗΕΔ. Επίσης, ισχύει ότι η ενέργεια που απορροφάται από την αναπτυσσόμενη ΑΗΕΔ των φάσεων του κινητήρα, μετατρέπεται σε μηχανική ισχύς και ισχύει ότι,

$$T\omega_{mech} = e_\alpha i_a + e_b i_b + e_c i_c \tag{3-37}$$

Επειδή όμως η ΑΗΕΔ κάθε φάσης του κινητήρα είναι ανάλογη της ταχύτητας του κινητήρα μπορεί να γραφτεί με την μορφή:

$$e(\theta) = k_\omega(\theta)\omega_{mech} \tag{3-38}$$

όπου $\kappa_\omega(\theta)$ είναι η σταθερά ταχύτητας *κάθε* φάσης του κινητήρα συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας του του δρομέα του κινητήρα. Ως εκ τούτου ισχύει η εξίσωση:

$$T(\theta) = k_{\omega\alpha}(\theta)i_a(\theta) + k_{\omega b}(\theta)i_b(\theta) + k_{\omega c}(\theta)i_c(\theta) \tag{3-39}$$

Από την Εξ. (3-39) βλέπουμε ότι, γνωρίζοντας την ΑΗΕΔ και κατά συνέπεια την σταθερά ταχύτητας κάθε φάσης του κινητήρα, καθώς και την μορφή της (trapezoidal ή sinusoidal) μπορούμε να καθορίσουμε μονοσήμαντα την μορφή και το ποσό της παραγόμενης ροπής από την μορφή του ρεύματος που διαρρέει κάθε φάση. Έστω ότι η ΑΗΕΔ και άρα και η σταθερά ταχύτητας του κινητήρα είναι ημιτονοειδής φύσεως και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{aligned} e(\theta_{el}) &= E_\alpha \cos(\theta_{el}) \\ k_{\omega e}(\theta_{el}) &= K_\Omega \cos(\theta_{el}) \end{aligned} \tag{3-40}$$

όπου E_α και K_Ω είναι το πλάτος της αναπτυσσόμενης ΑΗΕΔ και της σταθεράς ταχύτητας κάθε φάσης αντίστοιχα. Αφού το ρεύμα απέχει κατά γωνία δ από την ΑΗΕΔ, θα απέχει και την ίδια γωνία από την σταθερά ταχύτητας και άρα θα ισχύει λόγω της Εξ. (3-40) ότι:

$$i(\theta_{el}) = I_s \cos(\theta_{el} - \delta) \tag{3-41}$$

Όπως γνωρίζουμε στους τριφασικούς κινητήρες χωρίς ψήκτρες, η μορφή της παραγόμενης ημιτονοειδής ΑΗΕΔ και του τροφοδοτούμενου ημιτονοειδούς ρεύματος, είναι ίδια σε κάθε φάση απλά διαφέρει ανά 120 μοίρες. Αντικαθιστώντας τις Εξ. (3-40) και (3-41), στην Εξ. (3-39) και χρησιμοποιώντας την παρακάτω τριγωνομετρική ταυτότητα:

$$\cos(\theta_{el})\sin(\theta_{el}) = \frac{\sin(2\theta_{el})}{2} \tag{3-42}$$

Έχουμε ότι,

$$\mathrm{T}(\theta_{el}) = \frac{3}{2} K_\Omega I_S \cos(\delta) \tag{3-43}$$

Άρα βλέπουμε, ότι όταν υπάρχει διαφορά φάσης δ μεταξύ του ρεύματος και της ΑΗΕΔ, η ροπή που παράγεται δεν είναι μέγιστη αφού υπάρχει ο συντελεστής του συνημίτονου. Όμως η Εξ. (3-41) για το ρεύμα κάθε φάσης γράφεται ως εξής:

$$
\begin{aligned}
&i_a(\theta_{el}) = I_S \cos(\theta_{el} - \delta) \Rightarrow \\
&i_a(\theta_{el}) = I_S \cos(\delta)\cos(\theta_{el}) + I_S \sin(\delta)\sin(\theta_{el}) \Rightarrow \\
&i_a(\theta_{el}) = I_q \cos(\theta_{el}) + I_d \sin(\theta_{el})
\end{aligned}
\tag{3-44}
$$

με,

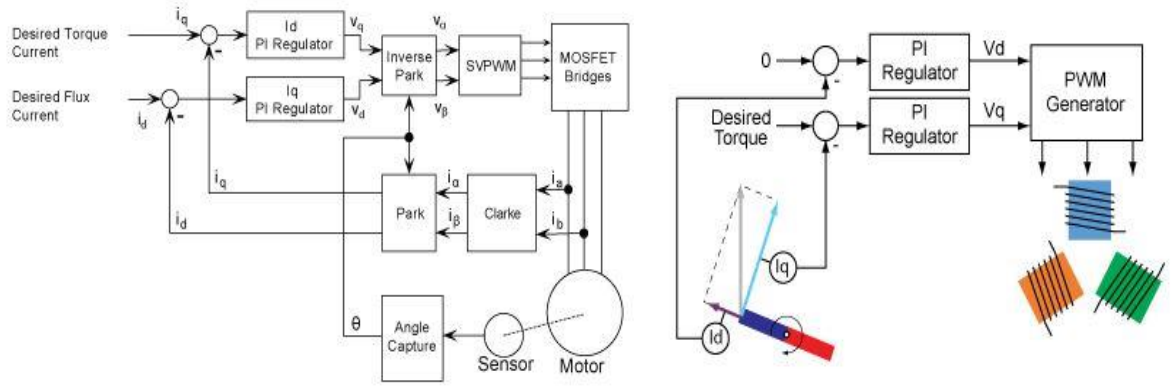
$$
\begin{aligned}
I_q &= I_s \cos(\delta) \\
I_d &= I_s \sin(\delta)
\end{aligned}
\tag{3-45}
$$

όπου I_q είναι η quadrature συνιστώσα του ρεύματος και είναι σε φάση με την ΑΗΕΔ του κινητήρα και I_d είναι η direct συνιστώσα του ρεύματος. βλ. Σχήμα 3-32. Άρα από την Εξ. (3-45) και την Εξ. (3-43) ότι:

$$
\mathrm{T}(\theta_{el}) = \frac{3}{2} K_\Omega I_q \tag{3-46}
$$

Το οποίο επαληθεύει αυτό που είδαμε προηγουμένως, ότι δηλαδή για την μέγιστη ροπή θα πρέπει το ρεύμα να ρυθμίζεται, ώστε να βρίσκεται στην ίδια φάση με την ΑΗΕΔ και να είναι μέγιστο στον quadrature άξονα και ελάχιστο στον direct. Παρατηρούμε ότι η Εξ. (3-46) είναι ίδια με την Εξ. (3-36).

Ο τρόπος με τον οποίο προσπαθούμε το ρεύμα να είναι στην ίδια φάση με ΑΗΕΔ ή αλλιώς το ρεύμα quadrature να είναι μέγιστο και το ρεύμα direct ελάχιστο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-39, στο οποίο βλέπουμε ότι μέσω αισθητήρα (αντίσταση) μετράμε το ρεύμα στον κινητήρα το οποίο είναι εναλλασσόμενο και μέσω του μετασχηματισμού Clark και Park μετατρέπεται σε ρεύμα σταθερό στο σύστημα d-q. Αυτό είναι το κομμάτι της ανατροφοδότησης στους PI controllers οποίοι έχουν ως έξοδο τα αντίστοιχα μεγέθη τροφοδοσίας. Αυτά με αντίστροφο μετασχηματισμό Park & Clark μετατρέπονται σε τάση εναλλασσόμενη. Αυτή τελικά παράγεται ανοιγοκλείνοντας τα ειδικά mosfets του controller μέσω PWM σήματος. Η τεχνική γι' αυτό ονομάζεται space vector modulation (SVM), [49].



(α) (β)

Σχήμα 3-39. (α) Τυπικό δομικό διάγραμμα εφαρμογής του ελέγχου πεδίου. (β) Τα PWM generators παράγει το κατάλληλο σήμα προκειμένου το ρεύμα στον άξονα Iq να γίνει μέγιστο και το ρεύμα Id να μηδενιστεί, [63].

4 Χαρακτηριστικές Παράμετροι Κινητήρων χωρίς ψήκτρες και Αναγνώρισή τους

4.1 Εισαγωγή

Όταν αγοράζουμε έναν κινητήρα και ιδιαίτερα κινητήρα χωρίς ψήκτρες είναι σημαντικό ανάλογα με την εφαρμογή και τις απαιτήσεις της να αναγνωριστούν οι βασικές παράμετροι που αναφέραμε παραπάνω όπως ο αριθμός των πόλων του κινητήρα το οποίο καθορίζει λειτουργικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, η διάταξη των πηνίων αν είναι π.χ. σε σύνδεση αστέρα ή τριγώνου, αν είναι κατανεμημένα σε συγκεντρωτική διάταξη (τραπεζοειδής ΑΗΕΔ) ή διανεμημένη διάταξη (ημιτονοειδής ΑΗΕΔ), βλ. Σχήμα 3-2. και Σχήμα 3-3. Επίσης, για την ηλεκτρική μοντελοποίηση του κινητήρα πρέπει να μετρηθούν η αντίσταση και ο συντελεστής επαγωγής των τυλιγμάτων των πηνίων του κινητήρα, και να καθοριστούν λειτουργικά χαρακτηριστικά όπως για παράδειγμα η σταθερά ροπής του κινητήρα ώστε να μπορούμε να κάνουμε αντιστοίχιση του ρεύματος που δίνουμε στον κινητήρα με την ηλεκτρομαγνητική ροπή που παράγεται. Χρήσιμο είναι επίσης να βρεθεί και η μέγιστη στατική τριβή του κινητήρα ώστε να υπάρχει μία πλήρης μοντεολοποίηση του κινητήρα όσον αφορά την ροπή που αποδίδει τελικά σε συνάρτηση με το ρεύμα τροφοδοσίας. Επιπροσθέτως ένα κομμάτι που επηρεάζει την επίδοση του κινητήρα είναι η ροπή αδράνειάς του και η ιξώδης τριβή που αναπτύσσεται κατά την κίνηση και θα πρέπει να υπολογιστούν. Τέλος όλοι οι ηλεκτρικοί κινητήρες περιορίζονται όσον αφορά τις επιδόσεις τους από την θερμική συμπεριφορά που έχουν και από την οποία προκύπτει το ονομαστικό ρεύμα και η ισχύς του κινητήρα. Τέλος από μηχανικής πλευράς και επειδή σε ένα ρομποτικό πόδι παίζει ρόλο η αδράνεια και το βάρος του κινητήρα είναι βασικό να υπολογιστούν και αυτά.

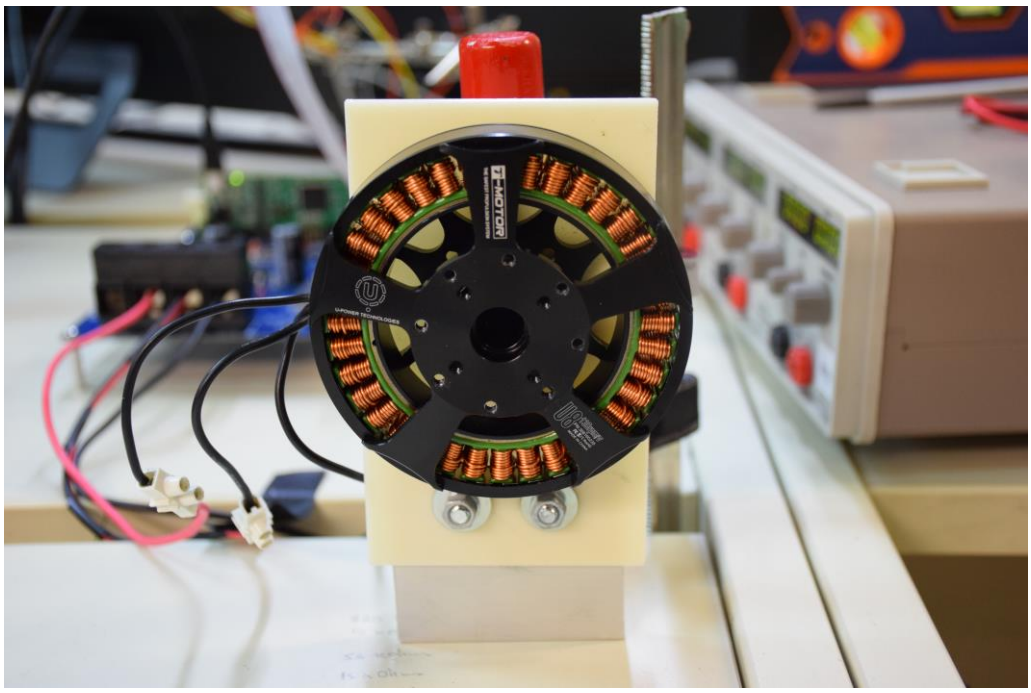
Πολλά από τα χαρακτηριστικά για τα οποία μιλήσαμε προηγουμένως όχι πάντα τα ίδια ανάλογα και με την εφαρμογή που προορίζονται κιόλας π.χ. εφαρμογές ρομποτικής ή βιομηχανία drones, δίνονται από τον κατασκευαστή της εταιρείας. Το κεφάλαιο αυτό λοιπόν προορίζεται προκειμένου να εξηγήσει, ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους που δίνεται από τον κατασκευαστή, τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την πειραματική ταυτοποίηση των διαφόρων παραμέτρων των κινητήρων.

4.2 Τύπος Κινητήρα

Αρχικά οι κινητήρες που μελετήσαμε είναι από την εταιρεία Tiger-Motor – T-motor και συγκεκριμένα ανήκουν στην κατηγορία efficiency type μοντέλο U8 με σταθερά ταχύτητας είναι KV100 και KV135. Άρα τα μοντέλα των κινητήρων που χρησιμοποιήσαμε είναι οι τύποι U8KV100 και U8KV135, [73]. Η εταιρεία αυτή κατασκευάζει κινητήρες για drones και παρέχει μαζί με αυτά διάφορους ελεγκτές (ESCs - Electronic Speed Controllers) για να γίνεται έλεγχος ταχύτητας με τραπεζοειδή οδήγηση και χωρίς αισθητήρα με τον τρόπο που περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 3. Πιο συγκεκριμένα οι κινητήρες αυτοί ανήκουν στην κατηγορία **outrunner** αφού ο δρομέας περιστρέφεται εξωτερικά από τον στάτη, έχουν 3 φάσεις για την οδήγησή τους και θεωρούνται σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες (**PMSM**) γιατί είδαμε πειραματικά και θα δούμε παρακάτω ότι η ΑΗΕΔ που αναπτύσσεται είναι ημιτονοειδής μορφής. Ο λόγος που μελετήθηκαν αυτοί οι κινητήρες είναι επειδή όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 2 εμφανίζουν

την μεγαλύτερη ειδική θερμική ειδική ροπή από τους off the shelf κινητήρες ιδίου τύπου και κρίθηκαν ιδανικοί για να ελέγξουμε την απόδοσή τους και την λειτουργικότητά τους.

Ουσιαστικά έχουν μικρό μήκος και μεγάλη ακτίνα κενού και ως εκ τούτου από κατασκευής και μόνο άποψης η ειδική ροπή, δηλαδή η ροπή προς την μάζα, σύμφωνα με αυτά που αναφέραμε προηγουμένως στο Κεφάλαιο 3, είναι υποψήφιοι για εφαρμογές επενέργησης απευθείας οδήγησης, σε ρομπότ με πόδια. Στο Σχήμα 4-1, φαίνεται ο κινητήρας U8 KV 135 οποίος από άποψη εξωτερικού σχεδιασμού δεν διαφέρει από τον κινητήρα U8 KV100. Από άποψη λειτουργικών ικανοτήτων όμως, ο Κινητήρας KV100 έχει μεγαλύτερη σταθερά ροπής αλλά μικρότερο ονομαστικό ρεύμα. Ως εκ τούτου τελικά οι δύο κινητήρες παράγουν όπως θα δούμε περίπου την ίδια μέγιστη συνεχή ροπή.



Σχήμα 4-1. Κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια της διπλωματικής μου. Είναι της εταιρείας Tiger-Motors μοντέλο U8 KV135 και στον οποίο φαίνονται ευδιάκριτα τα καλώδια για τις 3 φάσεις του κινητήρα και τα πηνία στον ακίνητο στάτη.

4.3 Πειράματα – BLDC κινητήρα

4.3.1 Μέτρηση αριθμού πόλων

Ένα από τα πρώτα πειράματα που κάναμε προκειμένου να μοντελοποιήσουμε τον κινητήρα είναι να βρούμε τον **αριθμό των πόλων** του κινητήρα δηλαδή τον αριθμό των μόνιμων μαγνητών. Φυσικά αυτή την πληροφορία, μπορεί να την πάρει κανείς από τον κατασκευαστή του κινητήρα αλλά μπορεί κάποιος να το επαληθεύσει πολύ εύκολα μέσω δύο μεθόδων, [48].

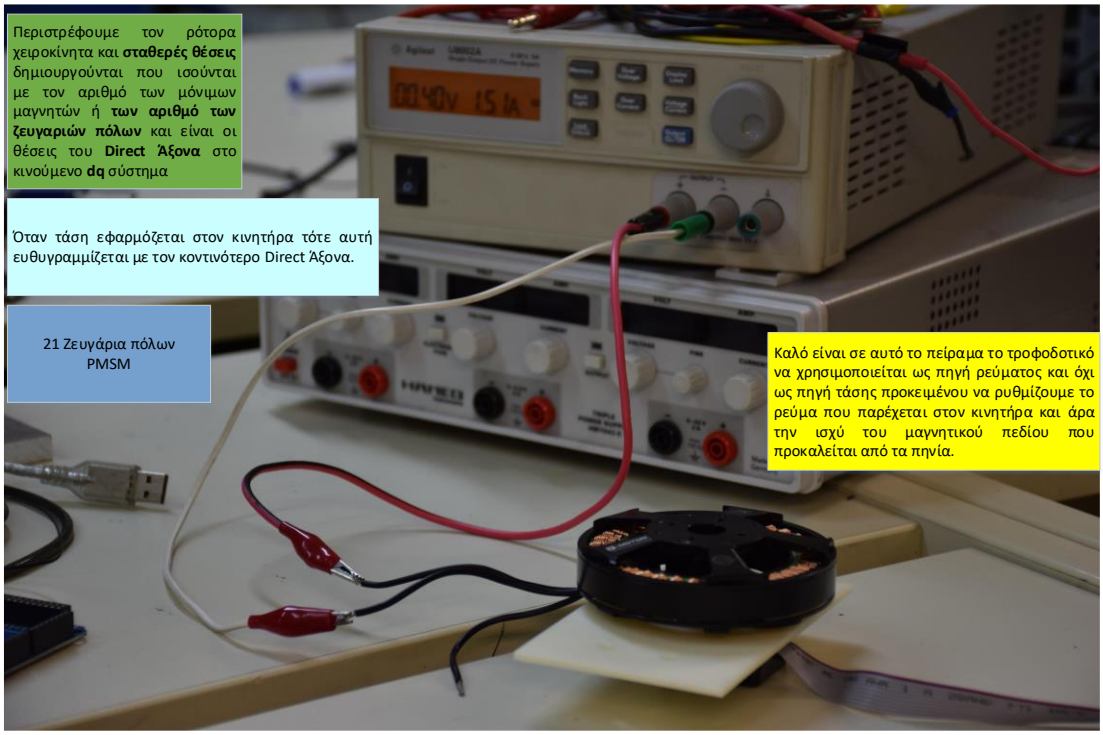
Μέθοδος 1η - Τροφοδοτικό

Στην πρώτη μέθοδο προκειμένου να βρούμε τον αριθμό των πόλων του κινητήρα χρησιμοποιήσαμε τα εξής στοιχεία.

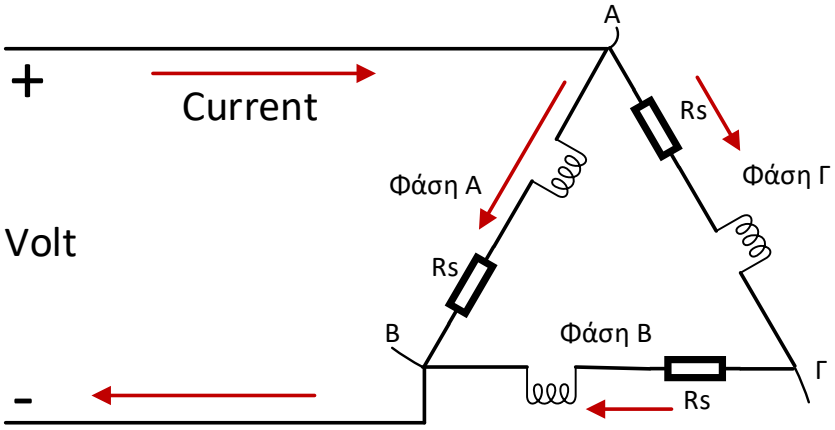
A. DC Τροφοδοτικό

B. Κινητήρας T-motor U8

Κατά τη διάρκεια του πειράματος συνδέουμε τη μία φάση του κινητήρα στο θετικό πόλο του τροφοδοτικού και την άλλη φάση στον αρνητικό πόλο του τροφοδοτικού. Στο Σχήμα 4-2, μπορούμε να δούμε την συνδεσμολογία αυτή. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή η διάταξη των πηνίων είναι σύνδεσης τριγώνου και ως εκ τούτου η διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 4-2, μπορεί να μοντελοποιηθεί σύμφωνα με το Σχήμα 4-3, στο οποίο βλέπουμε ότι επειδή είναι σύνδεση τριγώνου, όλες οι φάσεις διαρρέονται από ρεύμα με τις δύο από αυτές να διαρρέονται με το μισό.



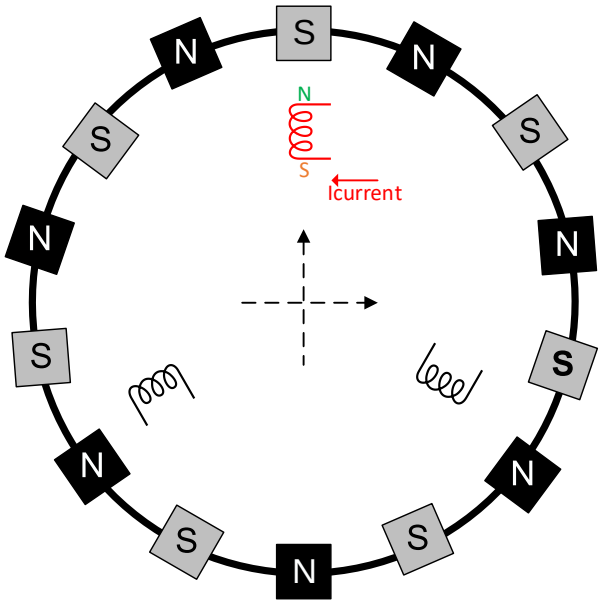
Σχήμα 4-2. Στρέφουμε τον κινητήρα αφού έχουμε συνδέσει την μία φάση στον θετικό πόλο της τροφοδοσίας και τις άλλες δύο φάσεις στον αρνητικό πόλο της τροφοδοσίας. Καθώς γυρνάμε τον δρομέα προκύπτουν ευσταθείς θέσεις αφού ανάλογα με την φόρτιση των πηνίων έχουν μαγνητιστεί και το ο αντίστοιχος πόλος από τον δρομέα έλκεται και κλειδώνει, [48].



Σχήμα 4-3. Όταν συνδέουμε την μία φάση στον θετικό πόλο και τις άλλες δύο φάσεις στον αρνητικό πόλο, το ρεύμα διαρρέει τις φάσεις. Η μορφοποίηση των φάσεων είναι σε σύνδεση τριγώνου.

Κατά συνέπεια και τα 36 πηνία που έχει ο κινητήρας, θα ενεργοποιηθούν και θα παράξουν μαγνητικό πεδίο συγκεκριμένης φοράς αλλά με τα δώδεκα από αυτά (μία φάση από τις τρεις) να έλκει με διπλάσια

δύναμη αφού διαρρέονται με διπλάσιο ρεύμα. Έστω λοιπόν ότι έχουμε τον κινητήρα στο Σχήμα 4-4, και το πηνίο, με κόκκινο χρώμα, που αντιστοιχεί στη φάση που επενεργείται με το διπλάσιο ρεύμα και δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο όπως φαίνεται. Σημειώνουμε ότι επειδή η μία φάση διαρρέεται με διπλάσιο ρεύμα και έλκει με διπλάσια δύναμη, και είναι αυτή που σταθεροποιεί την θέση του δρομέα, γι' αυτό απεικονίζουμε ένα πηνίο να διαρρέεται από ρεύμα. Όπως αναμένεται, καθώς περιστρέφουμε τον κινητήρα το μαγνητικό πεδίο από το πηνίο του στάτη έλκει τον νότιο πόλο του μαγνήτη του δρομέα και απωθεί τον βόρειο πόλο. Έτσι όταν περιστρέφουμε εμείς τον κινητήρα με το χέρι υπερνικάμε την δύναμη μεταξύ των δύο μαγνητών, μέχρι που έρχεται ο επόμενο νότιος πόλος και ξανακλειδώνει την θέση του δρομέα. Ουσιαστικά θα λέγαμε ότι κάθε θέση που κλειδώνει από τον δρομέα αντιστοιχεί στην αντίστοιχη θέση του direct άξονα του συστήματος «dq» που περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 3, αφού όπως είπαμε, επιλέγουμε η διεύθυνση του direct άξονα, να είναι στην διεύθυνση των μόνιμων μαγνητών. Η διαφορά με το Κεφάλαιο 3, ήταν ότι μελετάγαμε την πιο απλή περίπτωση κινητήρα με δύο πόλους ενώ πλέον έχουμε έναν κινητήρα, όπως προέκυψε, με 42 πόλους και άρα 21 direct άξονες.



Σχήμα 4-4. Απλή μορφή κινητήρα. Οι μόνιμοι μαγνήτες του δρομέα και ιδιαίτερα ο νότιος πόλος κλειδώνει πάνω από τον βόρειο πόλο στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που έχει διαμορφωθεί. Έτσι κάθε φορά που γυρνάμε τον κινητήρα με το χέρι κάθε νότιος πόλος πάει και ευθυγραμμίζεται με τον βόρειο πόλο της φάσης,

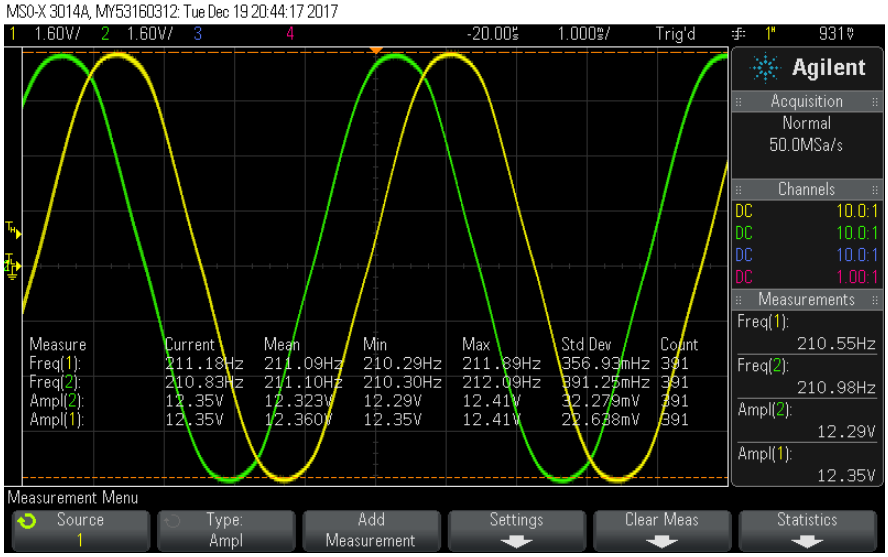
Με αυτή την μέθοδο υπολογίζουμε τον αριθμό των μόνιμων μαγνητών και ως εκ τούτου τον αριθμών των πόλων του κινητήρα.

Μέθοδος 2η - ΑΗΕΔ

Η δεύτερης μέθοδος, με την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των πόλων του κινητήρα είναι μέσω της μέτρησης της αναπτυσσόμενης ΑΗΕΔ, βλ. Σχήμα 4-5. Κάνοντας τον κινητήρα να περιστρέφεται από εξωτερική πηγή, π.χ. άλλον κινητήρα, αναπτύσσεται ΑΗΕΔ, την οποία μπορούμε

να την καταγράψουμε σε έναν παλμογράφο. Άρα πλέον ο κινητήρας μας εργάζεται σαν γεννήτρια και παράγει τάση. Η ΑΗΕΔ όπως είδαμε, προσδιορίζει την κατηγορία στην οποία ανήκει ο κινητήρας και επειδή είναι ημιτονοειδής στην δική μας περίπτωση, ο κινητήρας θεωρείται σύγχρονος ή σύγχρονη γεννήτρια ανάλογα με το τεταρτημόριο λειτουργίας. Η συχνότητα της ΑΗΕΔ είναι ίση με την ηλεκτρική συχνότητα η οποία συνδέεται με την ταχύτητα μέσω της Εξ. (3-24). Γνωρίζοντας άρα τη μηχανική ταχύτητα με την οποία περιστρέφουμε τον κινητήρα και την ηλεκτρική συχνότητα της τάσης που παράγεται, αφού την καταγράφουμε στον παλμογράφο, μπορούμε να βρούμε τον αριθμό των πόλων από την παρακάτω εξίσωση:

$$N_m = \text{int}(\frac{120 f_{el}}{n_{rpm}}) = \text{int}(\frac{120 * 211.00}{600}) = \text{int}(21.1) = 21 \tag{4-1}$$



Σχήμα 4-5. Η ανάπτυξη της ΑΗΕΔ στον κινητήρα. Παρατηρούμε πως η μορφή της είναι ημιτονοειδής και από την τιμή της συχνότητας και τη πραγματική μηχανική ταχύτητα μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των πόλων.

4.3.2 Μέτρηση αντίστασης και αυτεπαγωγής κινητήρα.

Το επόμενο βήμα για την μοντελοποίηση του κινητήρα είναι **η μέτρηση της αντίστασης και της αυτεπαγωγής κάθε φάσης**. Ο κατασκευαστής, στις προδιαγραφές του κινητήρα δίνει διαφορετικές τιμές για κάθε τύπο, όσον αφορά την αντίσταση. Για την αυτεπαγωγή δεν δίνεται κάποια πληροφορία γενικότερα. Για τον μεν U8KV100 αναφέρει ότι η αντίσταση κάθε φάσης είναι R=186mΩ ενώ για το U8KV135 αναφέρει είναι R=137mΩ. Επειδή όμως οι τιμές αυτές προκύπτουν από δειγματοληπτική μέτρηση σε μία γραμμή παραγωγής, κρίθηκε απαραίτητο για τους συγκεκριμένους κινητήρες που είχαμε να εκτιμηθούν ξανά μέσω ειδικών μεθόδων.

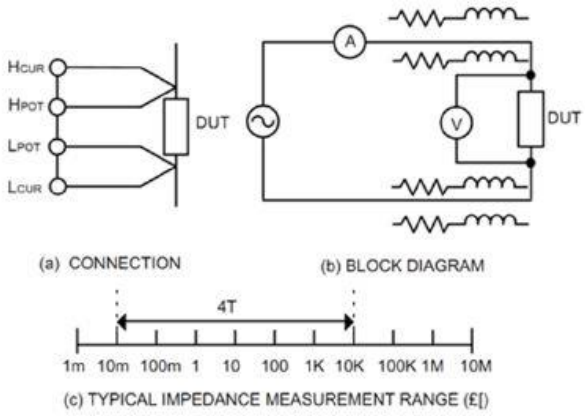
Μέθοδος 1η – RLC Meter

Ένας τρόπος, προκειμένου να μετρήσουμε την αντίσταση και την αυτεπαγωγή των φάσεων του κινητήρα είναι να χρησιμοποιήσουμε ειδικό μετρητικό όργανο, το RLC meter.

Το μετρητικό αυτό όργανο είναι κατάλληλο για μετρήσεις χαμηλών αντιστάσεων της τάξης (10mΩ-10kΩ). Η αρχή λειτουργίας του είναι ότι παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα και μετράει την εναλλασσόμενη

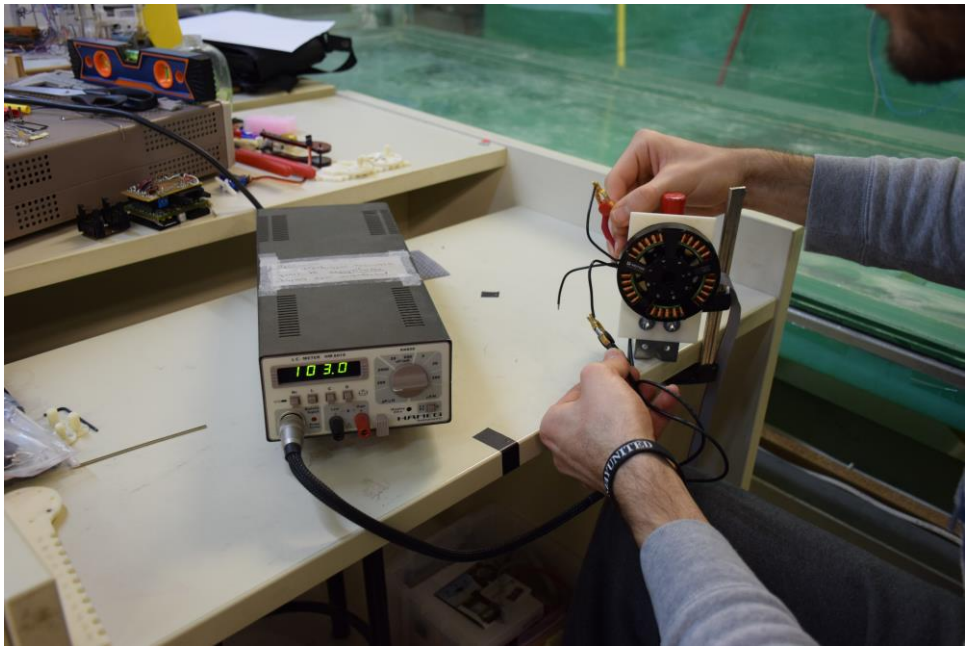
τάση που δημιουργείται γι' αυτό και στο μετρητικό ο χρήστης έχει δυνατότητα να ρυθμίσει την συχνότητα του εναλλασσόμενου σήματος, μεταβάλλοντας και την ακρίβεια της μέτρησης.

Επίσης ένα άλλο χαρακτηριστικό αυτών των μετρητικών οργάνων είναι ότι χρησιμοποιούν την λεγόμενη 4 terminal sensing, βλ. Σχήμα 4-6, με την οποία δεν λογαριάζεται στην μέτρηση η αντίσταση των καλωδίων του μετρητικού οργάνου, πραγματοποιώντας ακριβείς μετρήσεις, ειδικά στην περίπτωση όπου η αντίσταση της συσκευής που ελέγχεται είναι χαμηλή όμοιας τάξης αντίστασης των καλωδίων των κοινών μετρητικών οργάνων – πολυμέτρων.



Σχήμα 4-6. Kelvin Sensing ή 4 terminal measurement στο οποίο δεν λαμβάνεται υπόψιν η αντίσταση των καλωδίων του μετρητικού οργάνου

Στο Σχήμα 4-7, παρουσιάζεται το μετρητικό όργανο που χρησιμοποιήσαμε για την μέτρηση της αντίστασης και της αυτεπαγωγής.



Σχήμα 4-7. Μέτρηση της αντίστασης του κινητήρα μέσω του RLC meter. Φαίνονται τα καλώδια για το 4 terminal measurement.

Με το μετρητικό όργανο μετρήσαμε ανά δύο ακροδέκτες ξεχωριστά για την αντίσταση και για την επαγωγή και λάβαμε τον μέσο όρο τον οποίο αναγράφει ο Πίνακας 4-1 και ο Πίνακας 4-2 για κάθε κινητήρα. Επίσης επειδή στον κινητήρα έχουμε σύνδεση τριγώνου και όχι αστέρα, σύμφωνα με το

Σχήμα 4-3, συνδέοντας ανά δύο ακροδέκτες, διαρρέονται όλες οι φάσεις με ρεύμα και μετρώντας ανά δύο τους ακροδέκτες του κινητήρα, μετράγαμε στην ουσία την ισοδύναμη αντίσταση και την ισοδύναμη αυτεπαγωγή του κινητήρα (2 σε σειρά και το ισοδύναμό τους σε παράλληλη σύνδεση με την τρίτη). Η ισοδύναμη όμως αντίσταση και αυτεπαγωγή του κινητήρα συνδέεται με την αντίσταση και την αυτεπαγωγή κάθε φάσης, μέσω της Εξ. (4-2).

$$\begin{aligned} R_{ph} &= \frac{2}{3} R_{eq} \quad \& \quad L_{ph} = \frac{2}{3} L_{eq} \quad \textit{για τρίγωνο} \\ R_{ph} &= \frac{1}{2} R_{eq} \quad \& \quad L_{ph} = \frac{1}{2} L_{eq} \quad \textit{για αστέρα} \end{aligned} \tag{4-2}$$

Έτσι προέκυψε ο Πίνακας 4-1, στον οποίο φαίνεται ότι η αντίσταση των τυλιγμάτων του κινητήρα T-motor U8KV100, για τον οποίο όπως προαναφέραμε εμφανίζει μεγαλύτερη σταθερά ροπής είναι μεγαλύτερη.

Πίνακας 4-1. Η αντίσταση των κινητήρων T-motor μέσω του RLC Meter.

Τύπος Κινητήρα	T-motor U8KV100	T-motor U8KV135
Αντίσταση φάσης R (mΩ)	153	106

Μέσω του RLC μπορεί κανείς να υπολογίσει τον συντελεστή αυτεπαγωγής του κινητήρα. Βέβαια όπως είπαμε στο Κεφάλαιο 3, ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα (saliency ή non saliency) ο συντελεστής αυτεπαγωγής μεταβάλλεται με την θέση του δρομέα. Στους κινητήρες όπου οι μαγνήτες είναι προσκολλημένοι στην επιφάνεια του δρομέα (surface permanent magnets SPM) όπως στην δικιά μας περίπτωση, η αυτεπαγωγή δεν μεταβάλλεται, επομένως ρυθμίζοντας τη συχνότητα του RLC meter για την κατάλληλη ακρίβεια και ανάλυση μπορούμε να υπολογίσουμε την αυτεπαγωγή της φάσης του κινητήρα L_{ph} που ισούται με την αυτεπαγωγή στο direct άξονα L_d και την αυτεπαγωγή στον quadrature άξονα L_q. Βέβαια αν ο κινητήρας είχε τους μόνιμους μαγνήτες φυτευτούς μέσα στο πάχος του δρομέα (interion permanent magnets IPM) τότε η αυτεπαγωγή κάθε φάσης θα μεταβαλλόταν με την θέση του δρομέα και για αυτό καθώς μετράμε θα πρέπει να περιστρέφουμε τον κινητήρα και να ξαναγίνεται η μέτρηση, [83]. Χρησιμοποιώντας λοιπόν το RLC meter μπορέσαμε και υπολογίσαμε την αυτεπαγωγή του κινητήρα. Ο Πίνακας 4-2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα, στον οποίο βλέπουμε ότι η αυτεπαγωγή του T-motor U8KV100 είναι μεγαλύτερη.

Πίνακας 4-2. Η αυτεπαγωγή των κινητήρων T-motor μέσω του RLC Meter.

Τύπος Κινητήρα	T-motor U8KV100	T-motor U8KV135
Αυτεπαγωγή φάσης $L_{ph}=L_d=L_q$ (μH)	75.8	51.36

Μέθοδος 2η – Texas Instruments DRV8301 – 69M

Μία άλλη μέθοδος με την οποία μετρήσαμε την αντίσταση και την επαγωγή του κινητήρα είναι μέσω του board της Texas Instruments DRV8301 – 69M που χρησιμοποιήσαμε για την οδήγηση του κινητήρα

με ημιτονοειδή ρεύμα και έλεγχο πεδίου (**field oriented control FOC)**. Η συγκεκριμένη κάρτα, βλ. Σχήμα 4-8, χρησιμοποιήθηκε για διαφόρους σκοπούς. Αυτή πραγματοποιεί έλεγχο πεδίου και για τον λόγο αυτό έχει ενσωματωμένους, διάφορους αισθητήρες ρεύματος και τάσης και μέσω των οποίων πραγματοποιεί τον έλεγχο πεδίου. Επίσης η κάρτα αυτή, με κατάλληλο προγραμματισμό και σχεδιασμό αλγορίθμων, που παρέχονται από την Texas Instruments, προσφέρει έλεγχο πεδίου χωρίς την χρήση αισθητήρα (**sensorless FOC**), γνωρίζοντας όμως τις κύριες μηχανικές και ηλεκτρικές παραμέτρους του κινητήρα. Γι' αυτό προσφέρεται από την Texas Instruments επιπλέον λογισμικό για τον προγραμματισμό της κάρτας, προκειμένου να καλύπτεται η ανάγκη της ταυτοποίησης των ηλεκτρικών και μηχανικών παραμέτρων του κινητήρα. Στις ηλεκτρικές παραμέτρους που αναγνωρίζονται, περικλείονται η αντίσταση του κινητήρα και η αυτεπαγωγή του, η οποία δηλώνοντας ότι έχεις κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες είναι ουσιαστικά και η αυτεπαγωγή στο direct και στον quadrature άξονα αφού είναι ανεξάρτητη της θέσης..

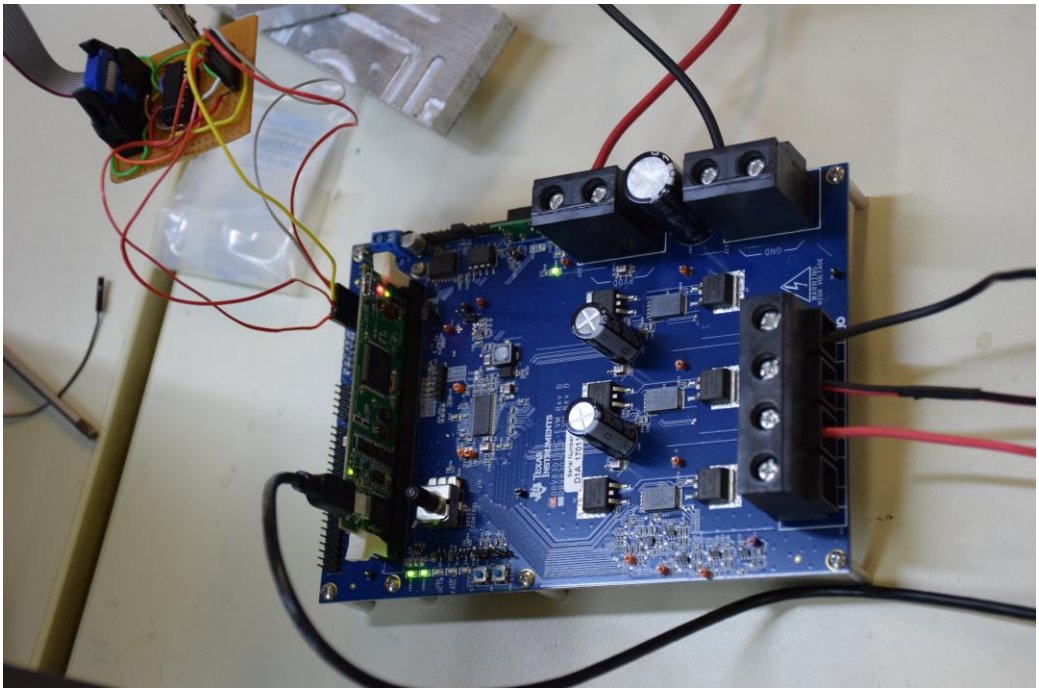
Προκειμένου να υπολογιστεί η αντίσταση κάθε φάσης του κινητήρα, μέσω του board διαρρέεται κατάλληλο ρεύμα στις φάσεις του κινητήρα και μετριέται η πτώση τάσης σε αυτές χρησιμοποιώντας τους ίδιους αισθητήρες με αυτούς για το field oriented control. Το ρεύμα που στέλνεται προκειμένου να γίνει αυτό, ορίζεται σε μία μεταβλητή και κατά την διαδικασία του υπολογισμού της αντίστασης ο κινητήρας είναι ακίνητος, σε αντίθεση με την περίπτωση της ταυτοποίησης της αυτεπαγωγής όπου ο κινητήρας κινείται. Το ρεύμα στη διαδικασία υπολογισμού της αυτεπαγωγής ορίζεται επίσης από μία μεταβλητή και το λογισμικό είναι έτσι κατασκευασμένο ώστε το ρεύμα να διαρρέει στον direct άξονα του αντίστοιχου «dq» συστήματος συντεταγμένων. Έτσι υπολογίζεται κάθε φορά το αντίστοιχο L_d το οποίο αυθαίρετα όμως θεωρείται ότι είναι ίσο με το L_q και την αυτεπαγωγή κάθε φάσης του κινητήρα γενικότερα, για τους λόγους που περιγράψαμε παραπάνω, πως δηλαδή η επαγωγή θεωρείται ανεξάρτητη της θέσης του δρομέα. Σημειώνουμε πως το συγκεκριμένο λογισμικό θεωρεί **δεδομένο** ότι οι **δύο αυτεπαγωγές είναι ίσες**. Κάτι τέτοιο βέβαια ισχύει στους υπό-εξέταση κινητήρες της T-motor, οπότε δεν χρειάζεται να κάνουμε κάτι άλλο. Γενικά για περισσότερες πληροφορίες ο χρήστης θα πρέπει να ανατρέξει στο, [78]. Ο Πίνακας 4-3 και Πίνακας 4-4 περιέχει τις τιμές της αντίστασης και της αυτεπαγωγής που προέκυψαν με αυτή την μέθοδο, οι οποίες είναι αρκετά κοντά στις τιμές που προέκυψαν μέσω του RLC Meter.

Πίνακας 4-3. Η αντίσταση των κινητήρων T-motor μέσω του DRV8301 – 69M.

Τύπος Κινητήρα	T-motor U8KV100	T-motor U8KV135
Αντίσταση φάσης R (mΩ)	139	103

Πίνακας 4-4. Η αυτεπαγωγή των κινητήρων T-motor μέσω του DRV8301 – 69M.

Τύπος Κινητήρα	T-motor U8KV100	T-motor U8KV135
Αυτεπαγωγή φάσης $L_{ph}=L_d=L_q$ (μH)	73.4	47.8



Σχήμα 4-8. Ο ελεγκτής από την εταιρεία Texas – Instruments [77] με τον οποίο έγινε η ταυτοποίηση των μηχανικών και ηλεκτρικών παραμέτρων του κινητήρα.

4.3.3 Μέτρηση σταθεράς ροπής κινητήρα

Επόμενο στάδιο κατά την μοντελοποίηση του κινητήρα είναι η **μέτρηση της σταθερά ροπής** του κινητήρα. Δηλαδή τη σταθερά που συνδέει το ρεύμα αναφοράς με την ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα. Στο Κεφάλαιο 3 είδαμε ότι η ροπή που παράγεται στον κινητήρα δίνεται από την Εξ. (3-23) που περιλαμβάνει τρεις όρους. Όπως αναφέρουμε οι δύο από αυτούς τους όρους είναι παρασιτικοί και περιλαμβάνονται ο όρος λόγω μεταβολής της αυτεπαγωγής με την θέση του δρομέα που δεν βρίσκει εφαρμογή στους τύπους κινητήρων όπως ο δικός μας (μαγνήτες στην επιφάνεια του δρομέα) και ο όρος λόγω μεταβολής της μαγνητικής αντίστασης (**cogging torque**). Ο τρίτος όρος είναι ο όρος που κάνει τον δρομέα του κινητήρα και περιστρέφεται και οποίος όπως είδαμε επίσης στο Κεφάλαιο 3 δίνεται από την Εξ. (3-36). Στην Εξ. (3-36) συνδέουμε το ρεύμα αναφοράς Iq, με την παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή. Το ρεύμα αυτό αναφοράς είναι πάντα στον quadrature άξονα αφού όπως αναφέραμε για βελτιστοποίηση της ροπής πρέπει να ελέγχουμε το ρεύμα, μέσω του field oriented control, επιδιώκοντας αυτό να βρίσκεται όλο στον quadrature άξονα. Διαφορετικά θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε την Εξ. (3-34). Βέβαια, επειδή στην δική μας περίπτωση θεωρούμε ότι η αυτεπαγωγή direct Ld είναι **περίπου** ίση με την αυτεπαγωγή quadrature Lq, η Εξ. (3-36) ισχύει και χωρίς να θεωρούμε το ρεύμα στον direct άξονα μηδέν, με την προϋπόθεση βέβαια ότι είναι μικρό. Τέλος από την Εξ. (3-36), βλέπουμε ότι η σταθερά ροπής του κινητήρα δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$K_t = \frac{3}{2} K_\Omega \tag{4-3}$$

όπου K_Ω είναι η σταθερά ταχύτητας των φάσεων του κινητήρα. Ουσιαστικά K_Ω είναι το πλάτος της ΑΗΕΔ που παράγεται από κάθε φάση, όταν ο κινητήρας περιστρέφεται σε μία ταχύτητα περιστροφής προς την ταχύτητα αυτή. Έτσι διαπιστώνουμε ότι προκειμένου να υπολογίσουμε την σταθερά ροπής πρέπει

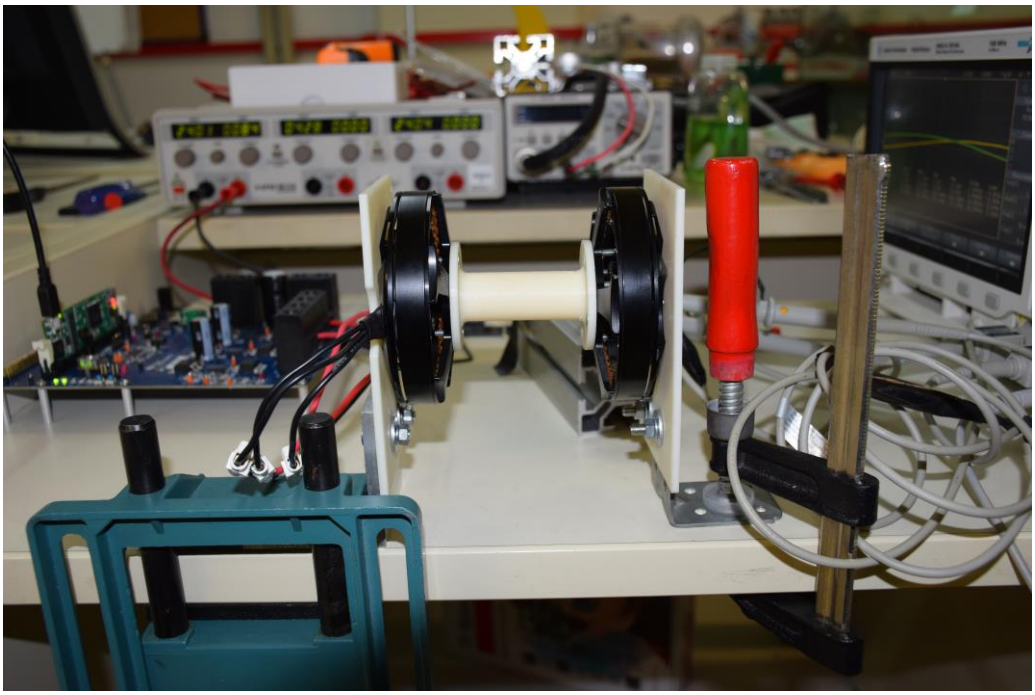
να υπολογίσουμε την σταθερά ταχύτητας της φάσης του κινητήρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η Εξ. (3-36) ή η Εξ. (4-3) ισχύει όταν η ΑΗΕΔ και η οδήγηση του κινητήρα είναι ημιτονοειδής. Δηλαδή όπως είπαμε στο Κεφάλαιο 3, ο κινητήρας να συμπεριφέρεται ως σύγχρονος κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες. Στην περίπτωση που ο κινητήρας παράγει τραπεζοειδής ΑΗΕΔ και οδηγείται με τραπεζοειδές ρεύμα (six step commutation) τότε η σταθερά ροπής δίνεται από την εξίσωση, [25].

$$K_t = 2K_\Omega \tag{4-4}$$

Από την Εξ. (4-4), βλέπουμε ότι η σταθερά ροπής είναι μεγαλύτερη στους BLDC κινητήρες με το μειονέκτημα ότι έχουμε περισσότερη διαταραχή ροπής **(toque ripple)** σε αυτή την μέθοδο. Για περισσότερες πληροφορίες κάποιος μπορεί να ανατρέξει στα [12] και [25]. Στην περίπτωση που έχουμε διαφορετικής μορφή ΑΗΕΔ από την οδήγηση του κινητήρα τότε η σταθερά ροπής προκύπτει με ανάλυση σειρών Fourier, [25]. Τέλος όπως θα διαπιστώσουμε παρακάτω η ΑΗΕΔ που παράγει ο κινητήρας είναι ημιτονοειδούς μορφής και επειδή η οδήγηση του κινητήρα τελικά θα γίνεται με ημιτονοειδή ρεύματα η σταθερά ροπής για την περίπτωση των κινητήρων που εξετάζουμε θα δίνεται από την Εξ. (4-3).

Μέθοδος 1η – Μέσω ΑΗΕΔ κινητήρα

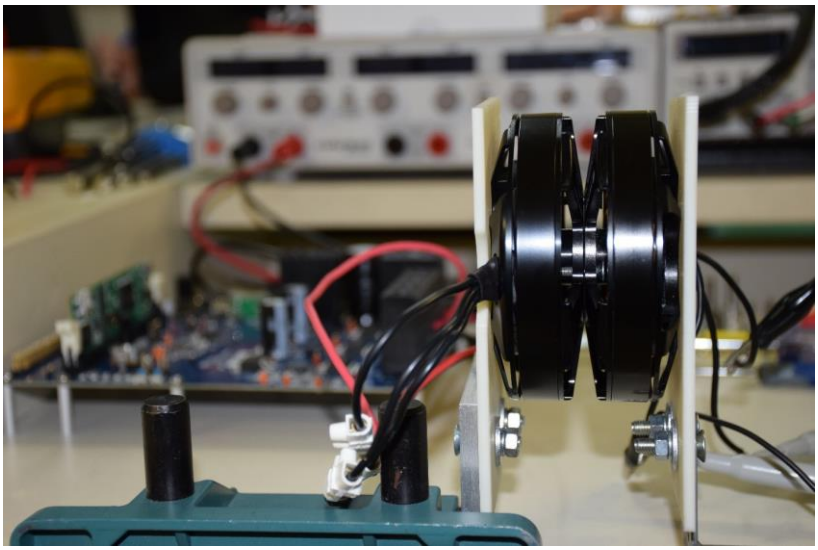
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι προκειμένου να βρούμε την σταθερά ροπής του κινητήρα, αρκεί να βρούμε την ΑΗΕΔ του κινητήρα. Για τον σκοπό αυτό συνδέσαμε τους δύο κινητήρες μαζί, βλ. Σχήμα 4-9, με την μία μηχανή να εργάζεται ως κινητήρας περιστρεφόμενος και ελεγχόμενος σε σταθερές στροφές, μέσω του board που φαίνεται στο Σχήμα 4-8, DRV 8301 – 69M Texas Instruments, το οποίο χρησιμοποιήσαμε και για την ηλεκτρική παραμετροποίηση του κινητήρα, ενώ η άλλη μηχανή εργαζότανε ως γεννήτρια. Στην συνέχεια μετρήσαμε την τάση ανά δύο ακροδέκτες του κινητήρα με τη βοήθεια του παλμογράφου Agilent InfiniiVision MSO-X 3014A.



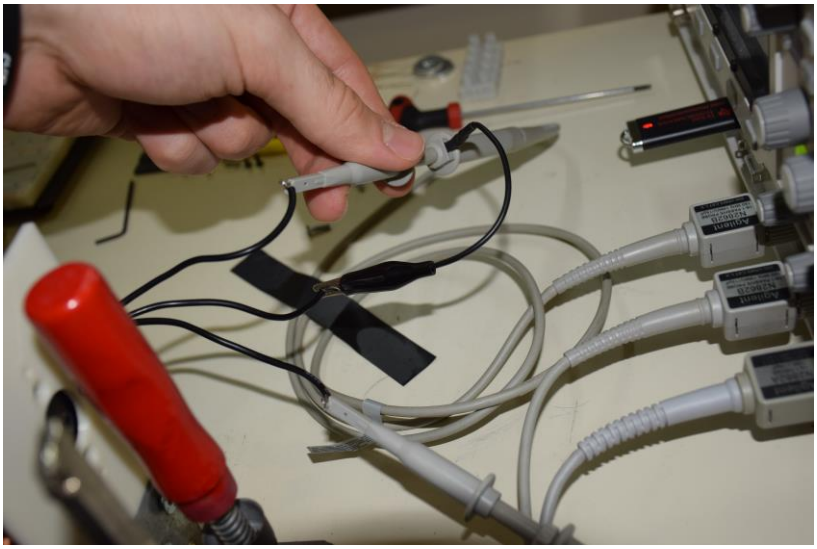
Σχήμα 4-9. Σύνδεση μηχανών προκειμένου να μετρήσουμε την ΑΗΕΔ της μηχανής δεξιά, που εργάζεται ως γεννήτρια.

Θα πρέπει να παρατηρήσουμε την παρουσία του άξονα ανάμεσά τους, παρόλο που θα μπορούσαν να είναι συνδεδεμένοι κατευθείαν ο ένας πάνω στον άλλο και να υπήρχε και καλύτερη ευθυγράμμιση, βλ. Σχήμα 4-10. Η παρουσία όμως, έντονου ηλεκτρικού θορύβου, λόγω ότι οι δύο μηχανές ήταν πολύ κοντά η μία στην άλλη, στο σήμα της ΑΗΕΔ κατέστησε δύσκολη την απεικόνισή της στον παλμογράφο.

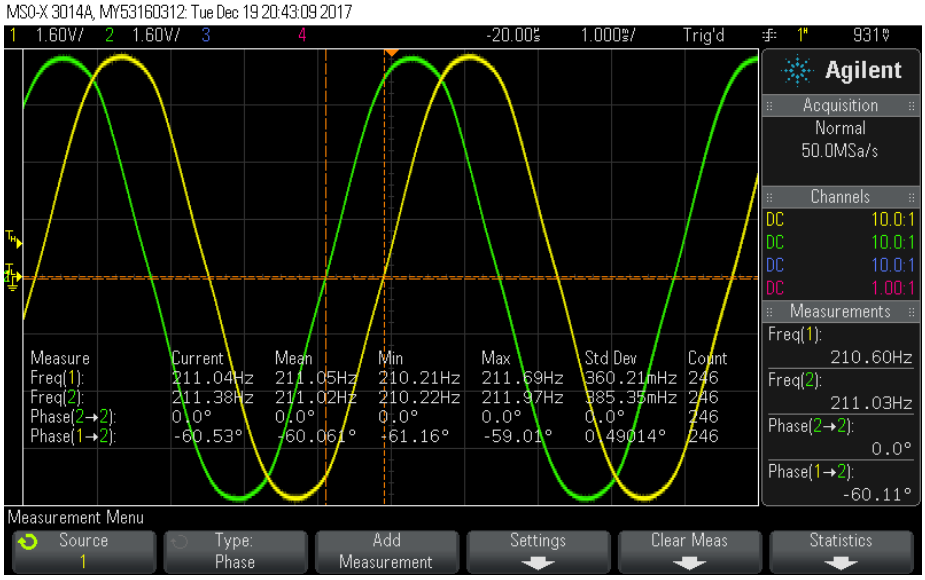
Ο κινητήρας, είναι σε σύνδεση τριγώνου και δεν έχει ουδέτερο καλώδιο. Αυτό δεν ενοχλεί εφόσον για να μετρήσουμε την ΑΗΕΔ κάθε φάσης αρκεί να συνδέσουμε τους ακροδέκτες τάσης (**voltage probes)** του παλμογράφου σε δύο ακροδέκτες του κινητήρα. Στην σύνδεση τριγώνου η τάση γραμμής ισούται με την τάση φάσης, [53]. Στο Σχήμα 4-11, μπορούμε να δούμε την σύνδεση των voltage probes του παλμογράφου με τους ακροδέκτες του κινητήρα προκειμένου να μετρήσουμε την τάση. Ως τάσης αναφοράς πήραμε τον μεσαίο ακροδέκτη b και συνδέσαμε τους θετικούς πόλους των ακροδεκτών του παλμογράφου στους ακροδέκτες a, c του κινητήρα. Επίσης στο Σχήμα 4-12, φαίνεται η ΑΗΕΔ όπως απεικονίζεται στον παλμογράφο.



Σχήμα 4-10. Σύνδεση μηχανών χωρίς άξονα. Προτιμήσαμε όμως να κάνουμε την σύνδεση του Σχ. 4-12, προκειμένου να μειώσουμε φαινόμενα ηλεκτρικού θορύβου.



Σχήμα 4-11. Τρόπος με τον οποίο συνδέσαμε τους ακροδέκτες του παλμογράφου με τους ακροδέκτες του κινητήρα. Ουσιαστικά μέτρηση ανά δύο ακροδέκτες, επειδή ο κινητήρας είναι σε σύνδεση τριγώνου αντιστοιχεί σε μέτρησης φάσης.

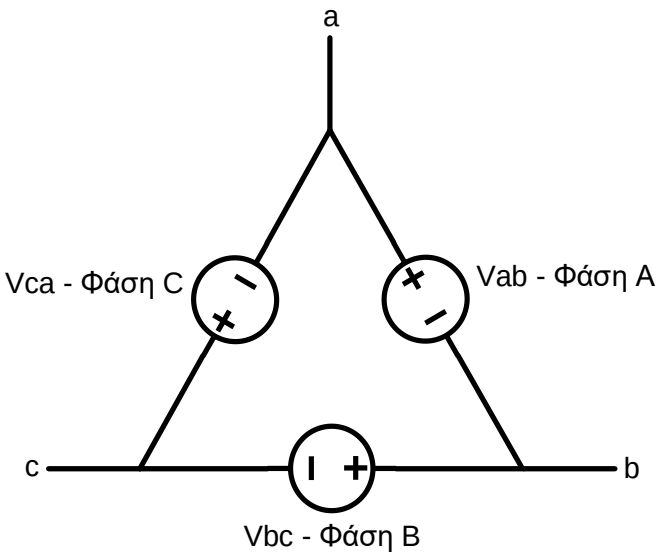


Σχήμα 4-12. ΑΗΕΔ του κινητήρα. Παρατηρούμε ότι είναι ημιτονοειδούς μορφής. Η συχνότητά της ταυτίζεται με την ηλεκτρική συχνότητα, που ισούται με την μηχανική συχνότητα περιστροφής του κινητήρα επί τον αριθμό των πόλων του κινητήρα.

Το Σχήμα 4-12, δείχνει την ΑΗΕΔ που παράγουν οι δύο φάσεις του κινητήρα. Η μέτρηση έγινε στα 600rpm περιστροφής του κινητήρα το οποίο αποδεικνύεται και στο σήμα που έχει συχνότητα 210Hz ενώ ο αριθμός των ζευγαριών πόλων του κινητήρα είναι 21, βλ. Εξ. (3-24).

Επίσης παρατηρούμε ότι διαφορά φάσης μεταξύ των δύο φάσεων είναι 60 ηλεκτρικές μοίρες και όχι 120 μοίρες. Αυτό βέβαια δεν θα έπρεπε να μας παραξενεύει για τον εξής λόγω. Αν αναλογιστούμε ότι η μηχανή έχει τη διάταξη που απεικονίζεται ως γεννήτρια στο Σχήμα 4-13, και πως η φάση Α είναι η τάση αναφοράς τότε οι άλλες φάσεις ακολουθούν την φάση αναφοράς όπως φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{\varphi}\cos(\omega t) \\ V_{bc} &= V_{\varphi}\cos(\omega t - 120) \\ V_{ca} &= V_{\varphi}\cos(\omega t - 240) \end{aligned} \tag{4-5}$$



Σχήμα 4-13. Όταν η μηχανή εργάζεται ως γεννήτρια σε σύνδεση τριγώνου.

Εμείς όμως επιλέξαμε να μετρήσουμε τις τάσεις Vab και Vcb, αφού συνδέσαμε ως θετικούς τους ακροδέκτες a, c και ως γείωση τον ακροδέκτη b. Η πρώτη τάση είναι η τάση αναφοράς ενώ για την δεύτερη τάση ισχύουν τα εξής:

$$V_{cb} = -V_{bc} = -V_{\varphi} e^{j-120} = -V_{\varphi}(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}) \Leftrightarrow$$
$$V_{cb} = V_{\varphi}(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}) = V_{\varphi} e^{j60} \quad (4\text{-}6)$$

Από το οποίο βλέπουμε πως η συγκεκριμένη τάση που μετρήσαμε προηγείται της φάσης αναφοράς κατά 60 ηλεκτρικές μοίρες και γι' αυτό στο Σχήμα 4-12, φαίνεται ότι η τάση αναφοράς υπολείπεται της τάσης Vcb κατά 60 ηλεκτρικές μοίρες. Αν θέλαμε να χρησιμοποιήσουμε την διαφορά φάσης ως ενδεικτικό στοιχείο για το αν ο κινητήρας έχει σύνδεση τριγώνου ή αστέρα δεν θα βοηθούσε γιατί και σύνδεση αστέρα αν είχαμε και συνδέαμε τους ίδιους ακροδέκτες πάλι 60 ηλεκτρικές μοίρες θα είχαν διαφορά οι δύο ΑΗΕΔ. Στην περίπτωση αστέρα έχουμε ότι τάση Vab προηγείται της τάσης αναφοράς 30 μοίρες ενώ η τάση Vcb προηγείται 90 ηλεκτρικές μοίρες και άρα μεταξύ τους διαφέρουν 60 ηλεκτρικές μοίρες.

Όσον αφορά τις μετρήσεις, για διάφορες ταχύτητες από 100 – 1500 rpm και βήμα 100rpm που επιβάλλαμε μέσω του board DRV8301 – 69M στον κινητήρα, μετράγαμε στον παλμογράφο την τάση που αναπτυσσόταν στη γεννήτρια. Για τις διάφορες ταχύτητες οι τιμές της σταθεράς ταχύτητας, διέφερε ελάχιστα. Ο Πίνακας 4-5 απεικονίζει τον μέσο όρο και για τους δύο κινητήρες.

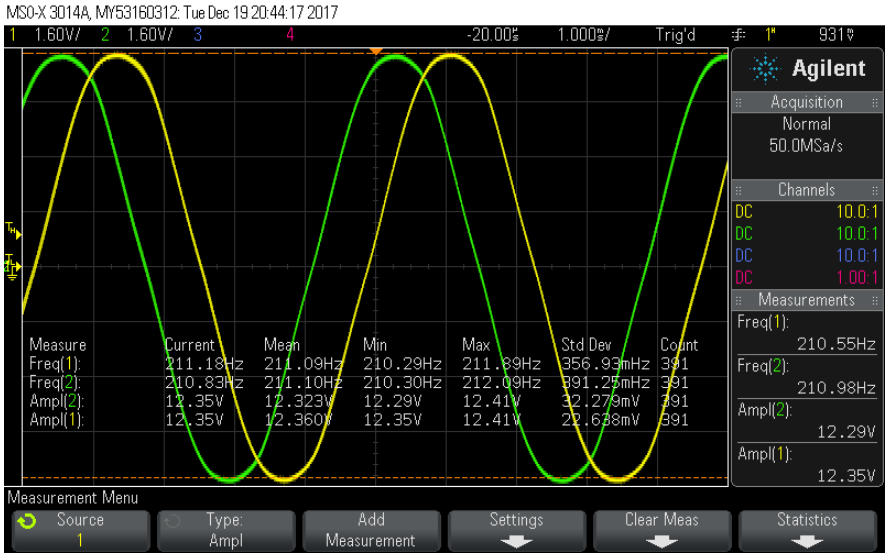
Πίνακας 4-5. Σταθερά ταχύτητα φάσης.

Τύπος Κινητήρα	T-motor U8KV100	T-motor U8KV135
K_{Ω}(Volt/rad/s)	0.0985	0.079
KV(rpm/Volt)	96.93	120.8

Βλέπουμε ότι ο αριθμός KV που είναι ουσιαστικά η σταθερά ταχύτητας σε μονάδες (rpm/Volt) και δίνεται από τους κατασκευαστές κινητήρων από την βιομηχανία των drones, είναι πολύ κοντά στην τιμή που δίνει ο κατασκευαστής T-motor και για τους δύο κινητήρες, KV100 και KV135. Υπάρχει μικρή απόκλιση που μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η μέτρηση της σταθεράς ταχύτητας σε μία σειρά παραγωγής γίνεται δειγματοληπτικά. Τέλος η σταθερά ροπής προέκυψε από τις παραπάνω τιμές της σταθεράς ταχύτητας, πολλαπλασιασμένης με τον χαρακτηριστικό αριθμό των τριφασικών συστημάτων 3/2. Αποτέλεσμα αυτού, ήταν ο Πίνακας 4-6 όπου φαίνεται ότι ο κινητήρας T-motor U8KV100 έχει μεγαλύτερη σταθερά ροπής.

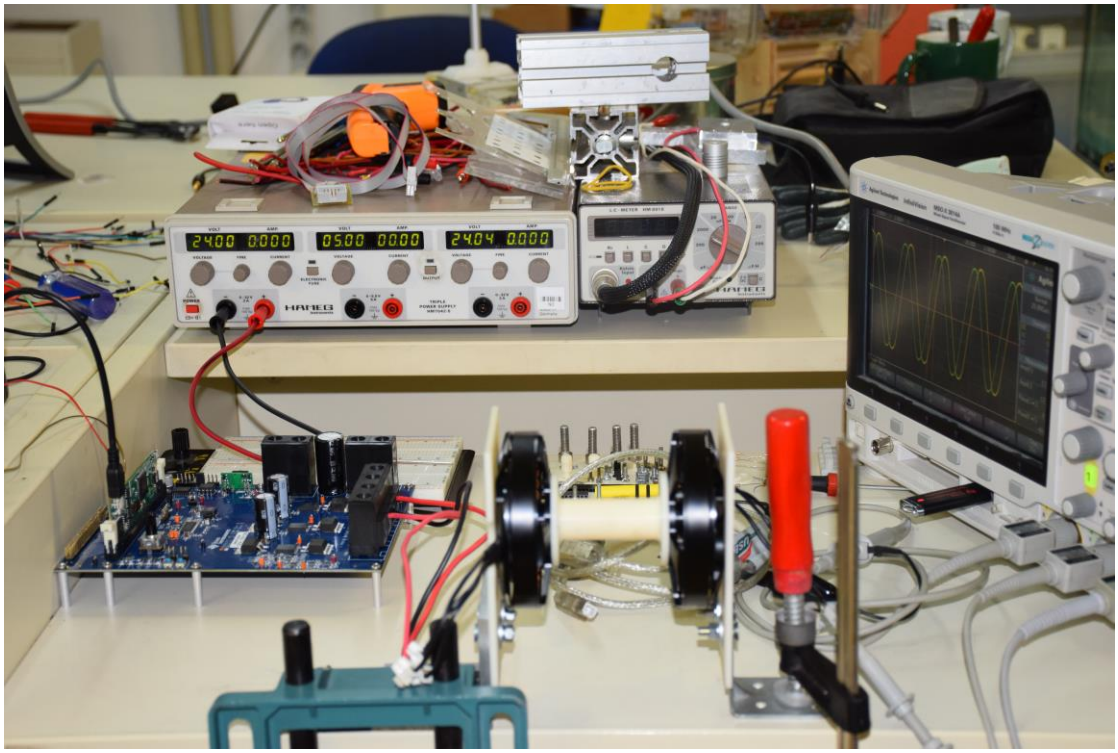
Πίνακας 4-6. Σταθερά ροπής κινητήρα.

Τύπος Κινητήρα	T-motor U8KV100	T-motor U8KV135
Kt(Nm/Amps)	0.1478	0.1186



Σχήμα 4-14. Η ΑΗΕΔ του κινητήρα για 600rpm. Φαίνεται ότι το πλάτος της είναι 6.15Volt και άρα ο λόγος του πλάτους προς την ταχύτητας μας δίνει τη σταθερά ταχύτητας του κινητήρα.

Παρουσιάζουμε και μία γενική εικόνα της διάταξης του πειράματος μέτρησης της ΑΗΕΔ του κινητήρα και κατ' επέκταση της σταθεράς ροπής.



Σχήμα 4-15. Γενική διάταξη μέτρησης της ΑΗΕΔ.

4.3.4 Προσδιορισμός μηχανικών παραμέτρων

Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες του κινητήρα, προκειμένου να έχουμε μία πλήρη μοντελοποίηση του κινητήρα θα πρέπει να υπολογίσουμε την **ροπή αδράνειας** του δρομέα του κινητήρα, την **μέγιστη στατική τριβή** και την **τριβή ιξώδους**. Προκειμένου να βρούμε αυτά τα χαρακτηριστικά μεγέθη θα

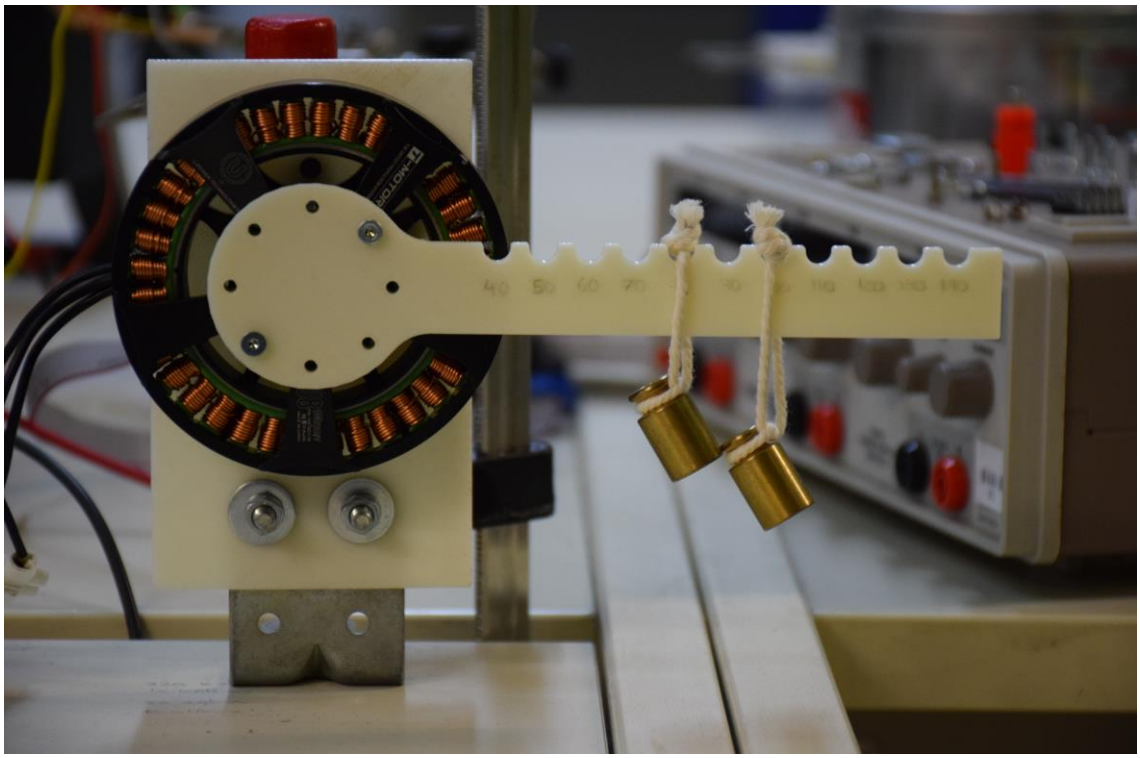
στηριχτούμε στην εξίσωση κίνησης του κινητήρα η οποία προκύπτει από τον νόμο του Νεύτωνα και είναι η παρακάτω:

$$T_{εισόδου} - T_{απωλειών} = T_{εξόδου} = J\dot{\omega} + K_B\omega \tag{4-7}$$

Στην οποία ως $T_{εισόδου}$ θεωρείται η ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα ή οποιαδήποτε άλλη ροπή εισόδου του κινητήρα και ως $T_{απωλειών}$, θεωρούμε όποια ροπή αντιστέκεται στην κίνηση του κινητήρα και δεν εξαρτάται από την ταχύτητα. Για παράδειγμα στην ροπή αυτή συμπεριλαμβάνεται η στατική τριβή των στοιχείων κύλισης του ρουλμάν του κινητήρα αλλά και μέση τιμή της ροπής cogging, βλ. Κεφάλαιο 3 και η οποία κρατάει τον κινητήρα ακίνητο και τον εμποδίζει να αρχίσει να κινείται. Φυσικά οι δύο αυτές αντιστάσεις υπάρχουν και κατά την κίνηση του κινητήρα και όχι μόνο κατά την εκκίνηση, αφού η μεν στατική τριβή των στοιχείων κύλισης του ρουλμάν υπάρχει ως τριβή κύλισης, με την προϋπόθεση βέβαια ότι αυτά κυλίονται και δεν ολισθαίνουν, και η ροπή cogging δεν παύει να υπάρχει κατά τη λειτουργία του κινητήρα. Τέλος ο όρος J δηλώνει την ροπή αδράνειας του κινητήρα ενώ ο όρος K_B την ιξώδη τριβή του κινητήρα.

Μέγιστη στατική τριβή

Αρχικά υπολογίστηκε η μέγιστη στατική τριβή, χρησιμοποιώντας την παρακάτω διάταξη βλ. Σχήμα 4-16. Χρησιμοποιήσαμε ειδική δοκό, κατασκευασμένη στο 3D Printer και σχεδιασμένη στο πρόγραμμα Solidworks. Η δοκός είχε αυλάκια από τα 40mm μέχρι τα 150mm διανεμημένα ανά 10mm και τοποθετούσαμε βαράκια μέχρις ότου η δοκός κινηθεί. Στην στατική τριβή περιλαμβάνεται η τριβή Coulomb και η ροπή cogging. Υπολογίσαμε την στατική τριβή ανά 45 μηχανικές μοίρες του κινητήρα. Ο Πίνακας 4-7, επειδή λάβαμε παραπλήσιες τιμές, εμπεριέχει την μέση τους τιμή για κάθε κινητήρα.



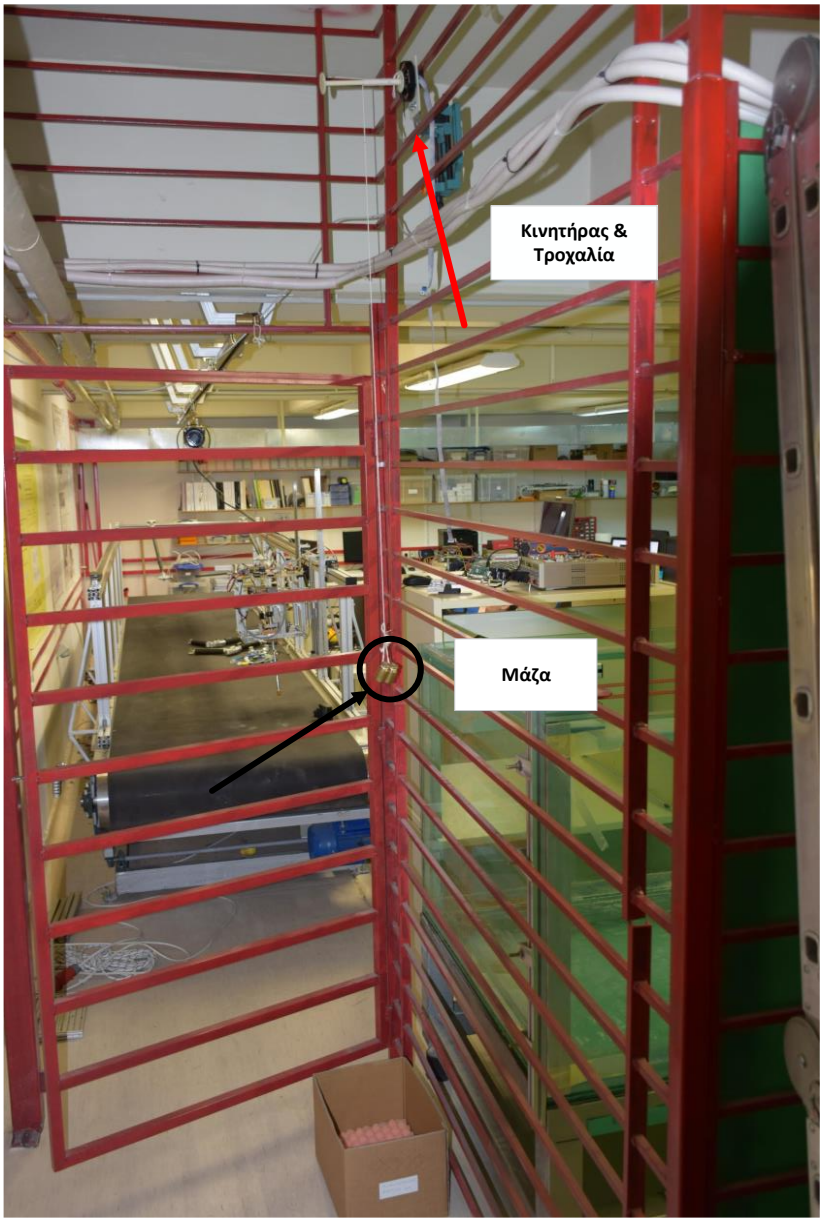
Σχήμα 4-16. Διάταξη προκειμένου να βρούμε την στατική ροπή του κινητήρα.

Πίνακας 4-7. Μέγιστη στατική ροπή κινητήρα.

Τύπος Κινητήρα	T-motor U8KV100	T-motor U8KV135
$T_{στ.τριβών}$(Nm)	0.042	0.048

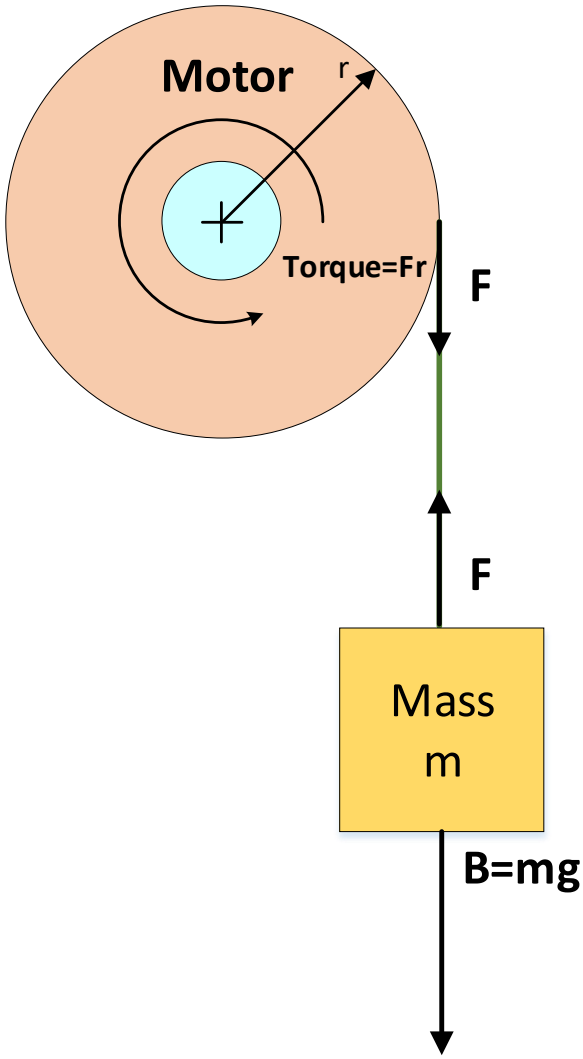
Ροπή Αδράνειας και Ιξώδης Τριβή – Μέθοδος 1η (Τροχαλία – Βαρίδι)

Για να βρούμε τη ροπή αδράνειας και την τριβή ιξώδους έπρεπε να θέσουμε τον κινητήρα σε κίνηση. Ως εκ τούτου, τοποθετήσαμε πάνω στον δρομέα μία τροχαλία και τυλίξαμε σπάγκο. Στην άκρη του σπάγκου τοποθετήσαμε συγκεκριμένη μάζα και έτσι ασκούσαμε στον δρομέα του κινητήρα ροπή συγκεκριμένης τιμής και τον αφήσαμε να περιστραφεί.. Ειδικότερα τοποθετήσαμε τον κινητήρα σε ύψος περίπου τρία μέτρα ώστε να υπάρχει αρκετός χρόνος να φτάσει την ταχύτητα μόνιμης κατάστασης. Λεπτομέρειες όσον αφορά τον κινητήρα με την τροχαλία φαίνονται στο Σχήμα 4-17.



Σχήμα 4-17. Διάταξη με τον κινητήρα σε ύψος προκειμένου να μετρήσουμε ροπή αδράνειας και τον συντελεστή ιξώδους τριβής.

Ουσιαστικά το μοντέλο του συγκεκριμένου πειράματος στηρίζεται στο Σχήμα 4-18.



Σχήμα 4-18. Ανάπτυξη δυνάμεων στον κινητήρα και στην μάζα.

Όπως γνωρίζουμε από την φυσική, τόσο ο κινητήρας όσο και η μάζα θα κάνουν επιταχυνόμενη κίνηση. Η εξίσωση κίνησης του συστήματος κινητήρα – τροχαλία – μάζα είναι η Εξ. (4-8), ή μετά από πράξεις, η Εξ. (4-9). Η μάζα εκτελεί κατακόρυφη ευθύγραμμη κίνηση. Έτσι με βάση τα σύμβολα στο Σχήμα 4-18, έχουμε ότι:

$$\begin{aligned} Fr - T_{\sigma\tau.\tau\rho\iota\beta\acute{\omega}\nu} &= J\dot{\omega} + K_B\omega \\ B - F &= m\dot{u} = m\dot{\omega}r \end{aligned} \tag{4-8}$$

όπου F δηλώνει την τάση του νήματος και B το βάρος της μάζας. Λύνοντας ως προς F προκύπτει ότι:

$$Br - T_{\sigma\tau.\tau\rho\iota\beta\acute{\omega}\nu} = (J + mr^2)\dot{\omega} + K_B\omega \tag{4-9}$$

Από την λύση της παραπάνω 1ης τάξης διαφορικής εξίσωσης του συστήματος προκύπτει η Εξ. (4-10).

$$\omega(t) = \frac{Br - T_{\sigma\tau.\tau\rho\iota\beta\acute{\omega}\nu}}{K_B} - \frac{Br - T_{\sigma\tau.\tau\rho\iota\beta\acute{\omega}\nu}}{K_B} e^{-\frac{K_B}{J}t} \tag{4-10}$$

όπου η χρονική σταθερά του μηχανικού συστήματος 1ης τάξης δίνεται από την Εξ. (4-11).

$$\tau = \frac{J + mr^2}{K_B} \Rightarrow J = \tau K_B - mr^2 \tag{4-11}$$

Η σταθερά αυτή αντιστοιχεί στον χρόνο εκείνο που η ταχύτητα έχει φτάσει το 63% της μόνιμης κατάστασης. Επίσης έχουμε ότι η ταχύτητα μόνιμης κατάστασης δίνεται από την εξίσωση:

$$\omega_{ss} = \frac{Br - T_{\sigma\tau.\tau\rho\iota\beta\acute{\omega}\nu}}{K_B} \Rightarrow K_B = \frac{Br - T_{\sigma\tau.\tau\rho\iota\beta\acute{\omega}\nu}}{\omega_{ss}} \tag{4-12}$$

Από τις Εξ. (4-11) και (4-12) είναι εύκολο, αφού καταγράψουμε τα πειραματικά δεδομένα της ταχύτητας με τον χρόνο, να βρούμε το μέγεθος της ροπής αδράνειας J και της ιξώδους τριβής K_B. Προκειμένου να βρούμε όμως την αδράνεια του κινητήρα θα πρέπει να αφαιρέσουμε την αδράνεια της μάζας καθώς και την αδράνεια της τροχαλίας αφού ισχύει:

$$J = J_{motor} + J_{pulley} \tag{4-13}$$

Ο Πίνακας 4-8 και ο Πίνακας 4-9 απεικονίζει τον μέσο όρο της ροπής αδράνειας των δύο κινητήρων και της ιξώδους τριβής, όπως προέκυψε από το παραπάνω πείραμα διαφορετικά βάρη. Αυτά έχουν προκύψει αφού έχει αφαιρεθεί η ροπή αδράνειας της τροχαλίας ίση με $J_{\tau\rho o\chi\alpha\lambda\acute{\iota}\alpha\varsigma}=3.2*10^{-6}(Kgm^2)$.

Πίνακας 4-8. Ροπή αδράνειας κινητήρων.

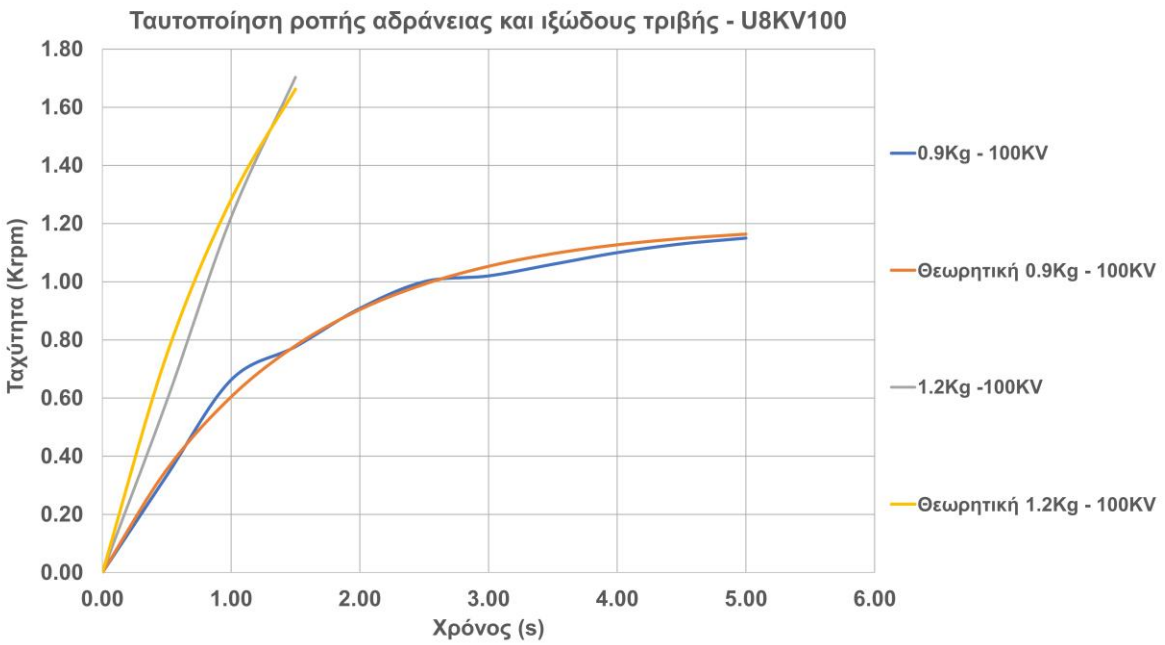
Τύπος Κινητήρα	T-motor U8KV100	T-motor U8KV135
Ροπή αδράνειας(Kgm^2)	0.000132553	0.000132869

Πίνακας 4-9. Τριβή Ιξώδους κινητήρα.

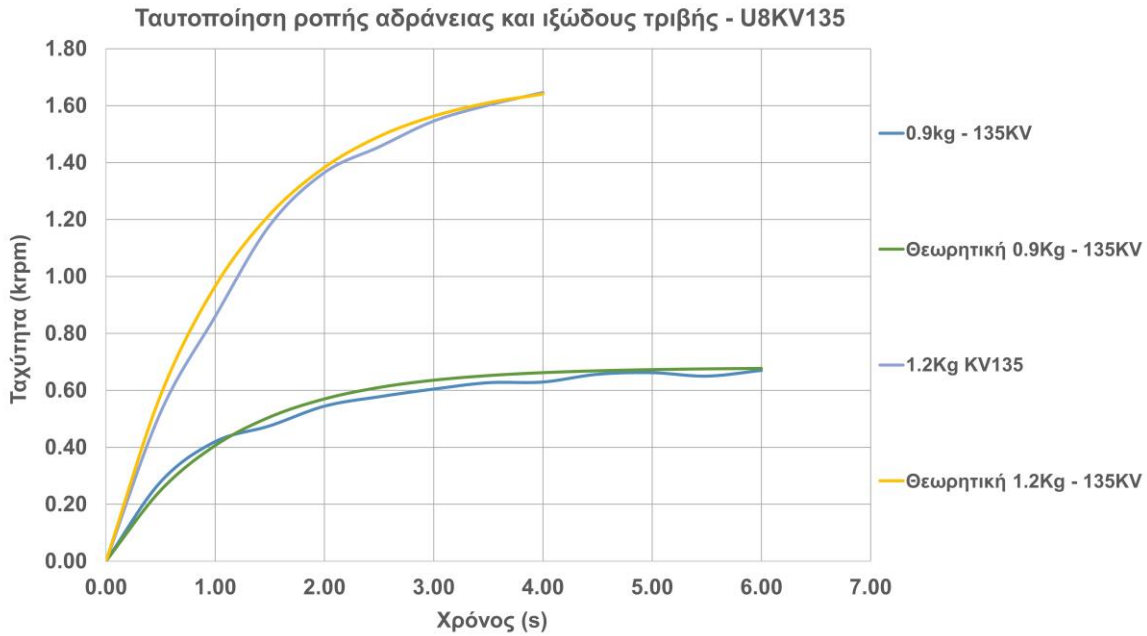
Τύπος Κινητήρα	T-motor U8KV100	T-motor U8KV135
Τριβή Ιξώδους (Nm/rad/s)	0.0001261	0.00016514

Οι πειραματικές μετρήσεις από τις οποίες προέκυψαν τα ζητούμενα μεγέθη κάθε κινητήρα, φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα για δύο διαφορετικά βάρη (0.9kg και 1.2kg). Σε αυτά βλέπουμε πως τελικά η ταχύτητα μόνιμης κατάστασης δεν προλαβαίνει να αναπτυχθεί και γι' αυτό πάνω από την πειραματική καμπύλη περνάμε τη θεωρητική, της Εξ. (4-10). Χρησιμοποιώντας αυτή την θεωρητική καμπύλη πλέον και τις Εξ. (4-11) και (4-12) υπολογίσαμε τα ζητούμενα μεγέθη και τα οποία ο Πίνακας 4-8 και Πίνακας 4-9 εμπεριέχει.

Στα διαγράμματα που απεικονίζονται στο Σχήμα 4-19 και Σχήμα 4-20 φαίνεται ότι η απόκριση της ταχύτητας δεν έχει την τέλεια μορφή της θεωρητικής καμπύλης και αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους. Ένας από αυτούς μπορεί να είναι το γεγονός ότι καθώς έπεφτε το βαρίδι, η τροχαλία είχε μία μικρή ταλάντωση καθώς επίσης και λόγω του ότι η τριβή κύλισης εξαρτάται από την θέση του δρομέα και αυτό μπορεί να επηρεάζει την μορφή της καμπύλης κατά την περιστροφή. Οι τιμές της ροπής αδράνειας και της ιξώδους τριβής είναι πολύ κοντά στις τιμές που δίνονται, για τον κινητήρα T-motor U8, [35].



Σχήμα 4-19. Απόκριση ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για τον κινητήρα U8KV100 για δύο διαφορετικά βάρη.

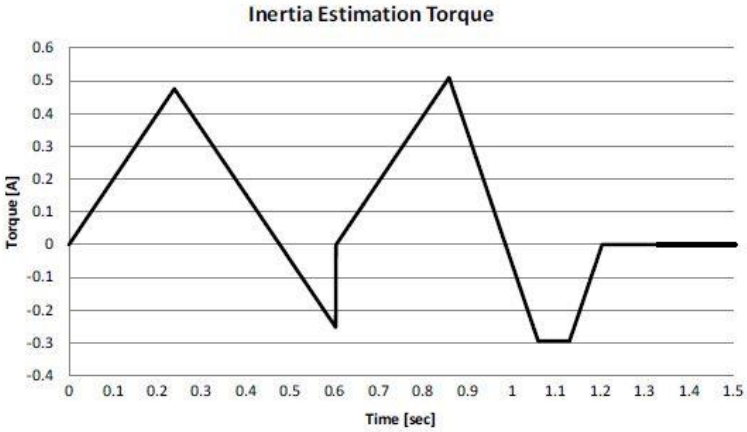


Σχήμα 4-20. Απόκριση ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για τον κινητήρα U8KV135 για δύο διαφορετικά βάρη.

Ροπή αδράνειας και Ιξώδης Τριβή – Μέθοδος 2η (Texas Instruments board)

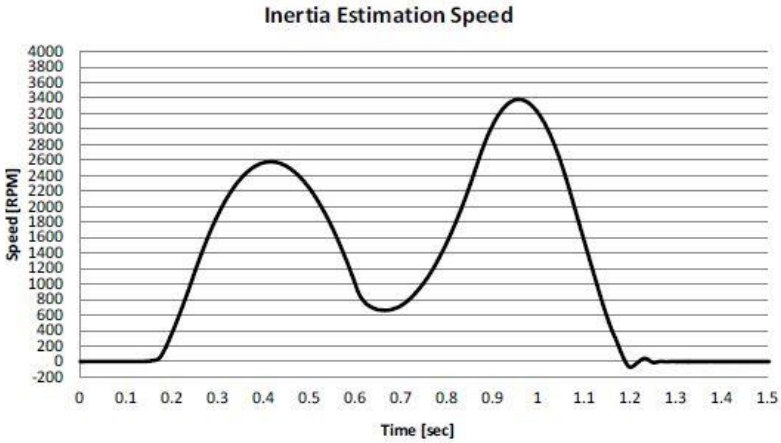
Επίσης μέσω του board της Texas Instruments – DRV8301 – 69M, υπάρχει η δυνατότητα να υπολογίσουμε και την ροπή αδράνειας, αφού προσφέρεται κατάλληλο λογισμικό ταυτοποίησης τόσο των ηλεκτρικών παραμέτρων, όπως είδαμε, όσο και των μηχανικών όπως είναι η ροπή αδράνειας και η ιξώδους τριβής. Το λογισμικό που τρέχει στον επεξεργαστή που βρίσκεται στην πράσινη κάρτα του board, βλ. Σχήμα 4-8, θεωρεί πως η εξίσωση κίνησης του κινητήρα είναι η Εξ. (4-10), χωρίς τον όρο

των απωλειών (στατικής τριβής και ροπής cogging) και υποβάλει τον κινητήρα σε ένα προφίλ ροπής - ρεύματος σαν αυτό στο Σχήμα 4-21.



Σχήμα 4-21. Η ροπή αναφοράς στον κινητήρα. Αυτή σε συνδυασμό με την ταχύτητα που μετράει από την ανατροφοδότηση και την εξίσωση κίνησης προκύπτει η ροπή αδράνειας και η τριβή εξόδους του κινητήρα, [78].

Με βάση αυτό το προφίλ ροπής – ρεύματος και την εξίσωση κίνησης του κινητήρα, το προφίλ της ταχύτητας πρέπει να είναι αυτής της μορφής, βλ. Σχήμα 4-22, όπου βλέπουμε ότι ο κινητήρας επιταχύνεται και επιβραδύνεται μέχρι κάποια ταχύτητα και ξανά το ίδιο μέχρι να σταματήσει.



Σχήμα 4-22. Προφίλ ταχύτητας του κινητήρα, [78].

Συλλέγοντας δεδομένα από το ρεύμα αναφοράς κάθε χρονικά στιγμή του κινητήρα και την ταχύτητά του, το λογισμικό επιστρέφει τις τιμές της αδράνειας και της ιξώδους τριβής.

Τέλος όπως είπαμε και βλέπουμε στο διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-21, το λογισμικό υποβάλλει τον κινητήρα σε ένα συγκεκριμένο ρεύμα αναφοράς, το οποίο αντιστοιχεί στον άξονα quadrature. Έτσι το λογισμικό ουσιαστικά δεν ταυτοποιεί την ροπή αδράνειας και την ιξώδης ροπή μέσω της ροπής αυτής αλλά μέσω του ρεύματος. Γι' αυτό το λογισμικό επιστρέφει την ροπή αδράνειας και την τριβή ιξώδους σε μονάδες [A/krpm/s] και [As/krpm] και οι οποίες ανάλογα με τον κινητήρα και την σταθερά ροπής υπολογίζονται στις μονάδες σύμφωνα με:

$$J = kgm^2 = \frac{Nm}{rad/s} = \frac{A}{krpm}\left(\frac{120K_t\pi}{1000}\right) \tag{4-14}$$

$$K_B = \frac{Nm}{rad/s^2} = \frac{A}{krpm/s}\left(\frac{120K_t\pi}{1000}\right) \quad (4\text{-}15)$$

Τέλος η ταυτοποίηση αυτή γίνεται ή με αισθητήρα (**sensored inertia identification**) ή χωρίς αισθητήρα (**sensorless inertia identification**). Ακολούθως παρατίθεται ο Πίνακας 4-10 και ο Πίνακας 4-11 με τις τιμές όπως προέκυψαν για τους δύο κινητήρες.

Πίνακας 4-10. Ροπή αδράνειας κινητήρα μέσω του board της TI.

Τύπος Κινητήρα	T-motor U8KV100	T-motor U8KV135
Ροπή αδράνειας(Kgm^2)	0.0001283	0.000124

Πίνακας 4-11. Τριβή ιξώδους κινητήρα μέσω του board της TI.

Τύπος Κινητήρα	T-motor U8KV100	T-motor U8KV135
Τριβή Ιξώδους (Nm/rad/s)	0.000101	0.0001228

Οι τιμές αυτές είναι αρκετά κοντά σε αυτές που βρήκαμε με το πείραμα προηγουμένως, όπως τις παρουσιάζει ο Πίνακας 4-8 και ο Πίνακας 4-9, και είναι πολύ βοηθητικές για μία προσεγγιστική λύση και εύρεση της ροπής αδράνειας και της ιξώδους τριβής. Τέλος για περισσότερες πληροφορίες και ενέργειες που πρέπει να ακολουθήσει κανείς, προκειμένου να υπολογίσει την ροπή αδράνειας και την ιξώδης τριβή με την 2^η μέθοδο και για κινητήρες με μεγάλη ροπή τριβής ή cogging ροπή κ.λ.π, θα πρέπει να διαβάσει το εγχειρίδιο, [78].

4.4 Θερμική Ανάλυση

Στους ηλεκτρικούς κινητήρες **τα όρια λειτουργίας και η ονομαστική τιμή ρεύματος** προκύπτουν από τη θερμική συμπεριφορά του κινητήρα, η οποία εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία δωματίου στην οποία βρίσκονται (θερμοκρασία αναφοράς - ambient temperature) και από την έδρασή τους. Όσο ευκολότερη είναι η απαγωγή θερμότητας προς το περιβάλλον τόσο περισσότερο ρεύμα μπορεί να ρέει στον κινητήρα. Συγκεκριμένα τα όρια λειτουργίας των κινητήρων χωρίς ψήκτρες συνδέονται άμεσα με τη θερμοκρασία και ειδικότερα συνδέονται με τα όρια θερμοκρασίας στα οποία μπορεί να φτάσει η μόνωση των τυλιγμάτων του κινητήρα και την κατηγορία στην οποία ανήκουν. Στην περίπτωση των κινητήρων T-motor U8, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, τα καλώδια μπορούν να φτάσουν μέχρι τους 200°C χωρίς να καούν, ενώ η μόνωση που έχουν εξωτερικά και που είναι **κλάσης F (Class F)**, στο παράρτημα διευκρινίζουνε ορισμένα στοιχεία για τα επίπεδα μόνωσης όπως είδαμε ότι υπάρχουν στα τυλίγματα των κινητήρων και στο Κεφάλαιο 3, βλ. Σχήμα 3-4, μπορεί να φτάσει μέχρι τους 155°C. Όμως η θερμοκρασία επαφής χαλκού-μόνωσης είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία εξωτερικά της μόνωσης και αν θεωρήσουμε ότι το όριο στην πρώτη είναι 155°C, τότε το όριο εξωτερικά είναι γύρω στους 125°C με 135°C, [71]. Όμως επειδή η θερμοκρασία δωματίου είναι γύρω στους 25 ^{o}C και η

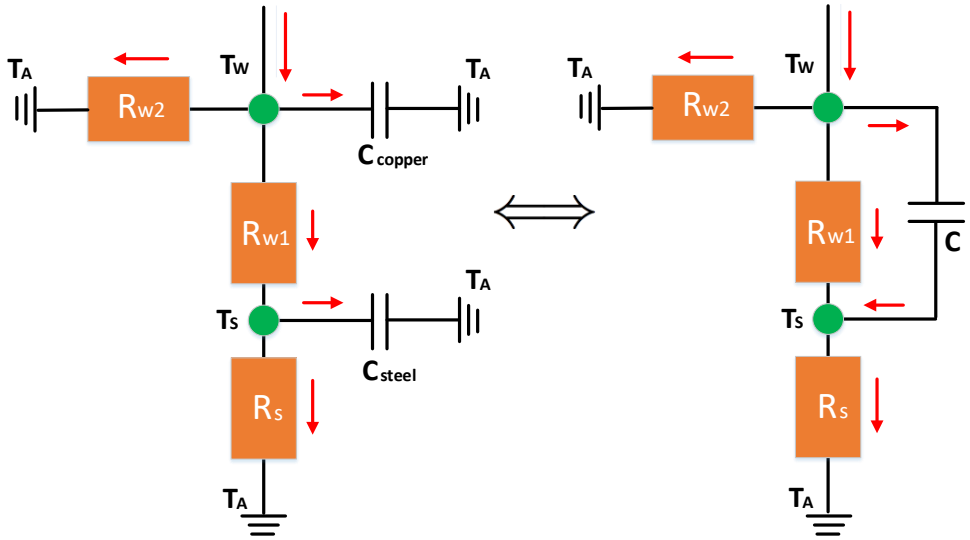
μόνωση εξωτερικά επιτρέπεται να φτάσει τους 125°C με 135°C, τότε το όριο της ανόδου θερμοκρασίας των τυλιγμάτων, όταν ο κινητήρας βρίσκεται σε συνεχής λειτουργία είναι 100°C.

4.4.1 Θεωρητική μελέτη

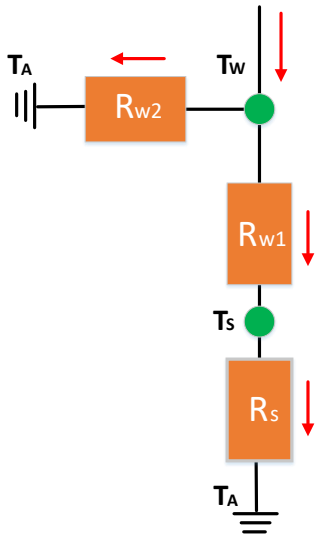
Γενικά η θεωρητική συμπεριφορά των κινητήρων απαιτεί λεπτομερή ανάλυση. Στο Παράρτημα υπάρχει η σχετική θεωρία και οι λόγοι που μας οδηγούν να λάβουμε σοβαρά υπόψιν τα θερμικά χαρακτηριστικά των κινητήρων.

Όπως αναφέρουμε και στο Παράστημα, στους κινητήρες έχουμε τις απώλειες Joule και τις απώλειες σιδήρου (Hysteresis & Eddy current) που μετατρέπονται σε θερμότητα. Αρχικά ένας μέρος αυτής της θερμότητας απορροφάται από τον κινητήρα λόγω της θερμοχωρητικότητάς του (θερμοχωρητικότητα χαλκού και θερμοχωρητικότητα χάλυβα), ένας μέρος μεταφέρεται από τα τυλίγματα στον στάτη και από τον στάτη στο περιβάλλον ενώ ένα τρίτο μέρος κατευθύνεται κατευθείαν από τα τυλίγματα στο περιβάλλον, βλ. Σχήμα 4-23. Κάποια στιγμή βέβαια η θερμοκρασία του κινητήρα φτάνει μία μέγιστη και σταθερή τιμή όπου και βρίσκεται σε ισορροπία, βλ. Σχήμα 4-24.

Η τιμή της σταθερής αυτής θερμοκρασίας είναι ανάλογη του ρεύματός του. Το ονομαστικό ρεύμα (**nominal current**) δηλαδή το μέγιστο συνεχές ρεύμα που ρέει στα καλώδια του κινητήρα αντιστοιχεί στην μέγιστη σταθερή θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει ο κινητήρας και δεν πρέπει να ξεπερνά την θερμοκρασία στην οποία η μόνωση των τυλιγμάτων του καταστρέφεται. Τέλος το ονομαστικό ρεύμα μέσω της σταθερά ροπής αντιστοιχίζεται σε **ονομαστική ροπή (nominal torque)**, μέγεθος που αποτελεί ένα από τα ποιο χαρακτηριστικά μεγέθη του κινητήρα και όριο της περιοχής σταθερής λειτουργίας του κινητήρα, βλ. Παράρτημα. Φυσικά το όριο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας επηρεάζεται και από την **θερμοκρασία αναφοράς (ambient temperature)**. Κατά την διάρκεια του θερμικού πειράματος μελετήσαμε το ρεύμα που αντιστοιχεί στο ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα, μετρώντας την θερμοκρασία των τυλιγμάτων του κινητήρα, όντας ο κινητήρας σε **κατάσταση ακινησίας (stall)**. Στην περίπτωση που ο κινητήρας κινείται τότε το ρεύμα και συνάμα και η ροπή μικραίνει λόγω της έντονης επίδρασης των δινορρευμάτων, βλ. Παράρτημα.

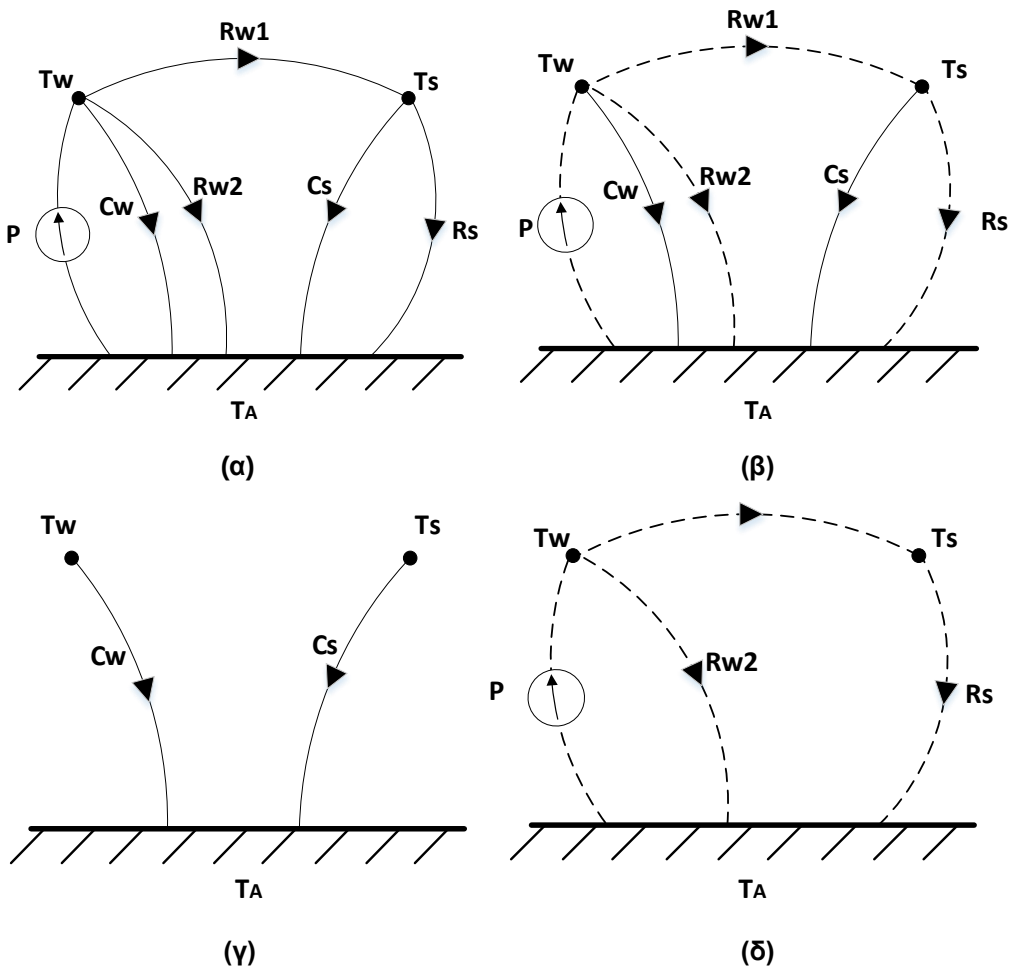


Σχήμα 4-23. Θερμικό κύκλωμα κατά την μεταβατική περίοδο όπου η θερμοκρασία του κινητήρα αυξάνει. Θερμικό κύκλωμα κατά την θερμική ισορροπία του συστήματος.



Σχήμα 4-24. Θερμικό κύκλωμα κατά την θερμική ισορροπία του συστήματος.

Προκειμένου να εξάγουμε τις μαθηματικές εξισώσεις του θερμικού γραμμικού συστήματος, με βάση το Σχήμα 4-23 και το Σχήμα 4-24, καταστρώνουμε τον γραμμικό γράφο και από εκεί το κανονικό δέντρο και τους δεσμούς όπως φαίνονται στο Σχήμα 4-25.



Σχήμα 4-25. (α) Γραμμικός γράφος θερμικού συστήματος. (β) Κανονικό δέντρο και δεσμοί (γ) Κανονικό δέντρο. (δ) Δεσμοί.

Από το Σχήμα 4-23 έως το Σχήμα 4-25, έχουμε ότι T_A συμβολίζει την θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_W και C_W την θερμοκρασία και την θερμοχωρητικότητα των τυλιγμάτων, T_S και C_S την θερμοκρασία και την θερμοχωρητικότητα του δρομέα, P την εισερχόμενη θερμική ισχύ που δίνεται από την Εξ. (4-20) και τέλος R_{W1}, R_{W2}, και R_S την θερμική αντίσταση από τα τυλίγματα στον στάτη, την θερμική αντίσταση από τα τυλίγματα στο περιβάλλον και την θερμική αντίσταση από τον δρομέα στο περιβάλλον αντίστοιχα.

Οι μαθηματικές εξισώσεις του θερμικού συστήματος 2ης τάξης, δύο ανεξάρτητες θερμοχωρητικότητες, έτσι όπως προκύπτουν από τους γράφους είναι:

$$\begin{aligned} \frac{dT_w}{dt} &= \frac{P}{C_w} - \left(\frac{T_w - T_s}{\tau_1} + \frac{T_w - T_A}{\tau_{12}}\right) \\ \frac{dT_s}{dt} &= \frac{T_w - T_s}{\tau_{21}} - \frac{T_s - T_A}{\tau_2} \end{aligned} \tag{4-16}$$

όπου τελικά για τις σταθερές τ_1,τ_{12},τ_{21},τ_2 ισχύει πως είναι ίσες με:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= C_w R_{w1} \\ \tau_{12} &= C_w R_{w2} \\ \tau_2 &= C_s R_s \\ \tau_{21} &= C_r R_{w1} \end{aligned} \tag{4-17}$$

Αν λάβουμε ως έξοδο του συστήματος την θερμοκρασία των τυλιγμάτων, τότε η συνάρτηση μεταφοράς από P σε T_W, είναι:

$$G(s) = \frac{\left(s + \left(\frac{1}{\tau_{21}} + \frac{1}{\tau_2}\right)\right)\frac{1}{C_W}}{s^2 + s\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_{12}} + \frac{1}{\tau_{21}} + \frac{1}{\tau_2}\right) + \left(\frac{1}{\tau_1\tau_2} + \frac{1}{\tau_{12}\tau_{21}} + \frac{1}{\tau_{12}\tau_2}\right)} = \frac{(s+c)\frac{1}{C_W}}{s^2 + sa + \beta} = \frac{T_W}{P} \tag{4-18}$$

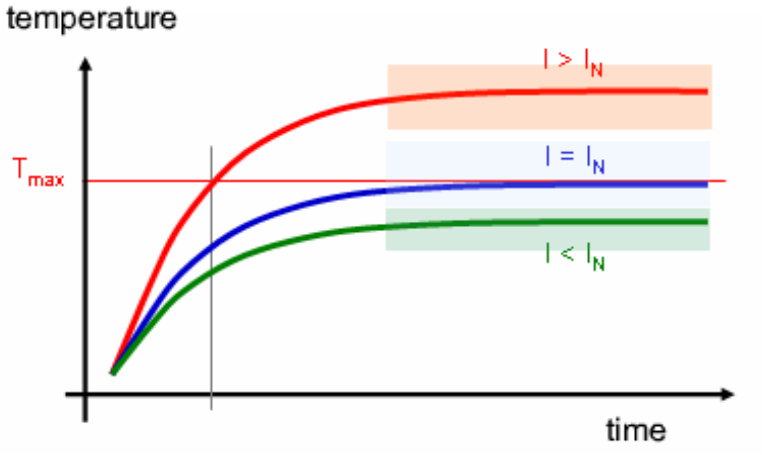
Αν θεωρήσουμε ότι οι πόλοι της συνάρτησης μεταφοράς (πεδίο συχνότητας), της Εξ. (4-18), του θερμικού συστήματος 2ης τάξης είναι οι K_1 και K_2, τότε η Εξ. (4-19) αποτελεί την εξίσωση απόκρισης της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων στο πεδίο του χρόνου είναι:

$$T_W = A + Be^{K_1 t} + Ce^{K_2 t} \tag{4-19}$$

Παρακάτω θα δούμε ότι η μεταβλητή c στην Εξ. (4-18), δηλαδή ο μηδενιστής του συστήματος είναι κοντά στον έναν πόλο. Το γεγονός αυτό επηρεάζει την απόκριση του θερμικού συστήματος 2ης τάξης του κινητήρα, που τελικά ομοιάζει με απόκριση συστήματος 1ης τάξης. Θα δούμε επίσης ότι ο ένας πόλος είναι μία τάξη μικρότερος και άρα γρηγορότερος από το άλλον πόλο γεγονός που επίσης επηρεάζει την απόκριση. Στις Εξ. (4-16) και (4-18), P είναι η θερμική ισχύς όπου εισέρχεται στο σύστημα και ισούται με:

$$P = I_{RMS}{}^2 R_{Electrical} = \frac{3}{2} I_s{}^2 R_{Electrical} = \frac{3}{2} I_q{}^2 R_{Electrical} \tag{4-20}$$

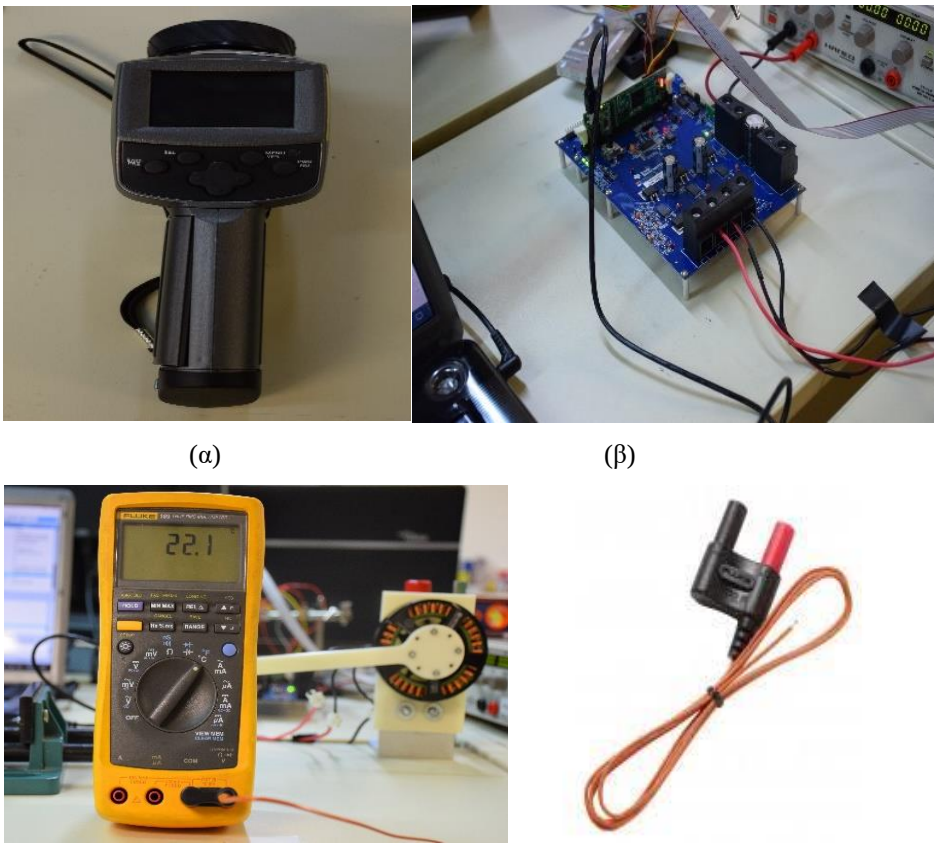
Γενικά, με βάση τα σχόλια για τους πόλους της συνάρτησης μεταφοράς της Εξ. (4-18), αναμένουμε η θερμική καμπύλη απόκρισης, να είναι όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-26, όπου I_N συμβολίζει το μέγιστο συνεχές ρεύμα (ονομαστικό ρεύμα), [42].



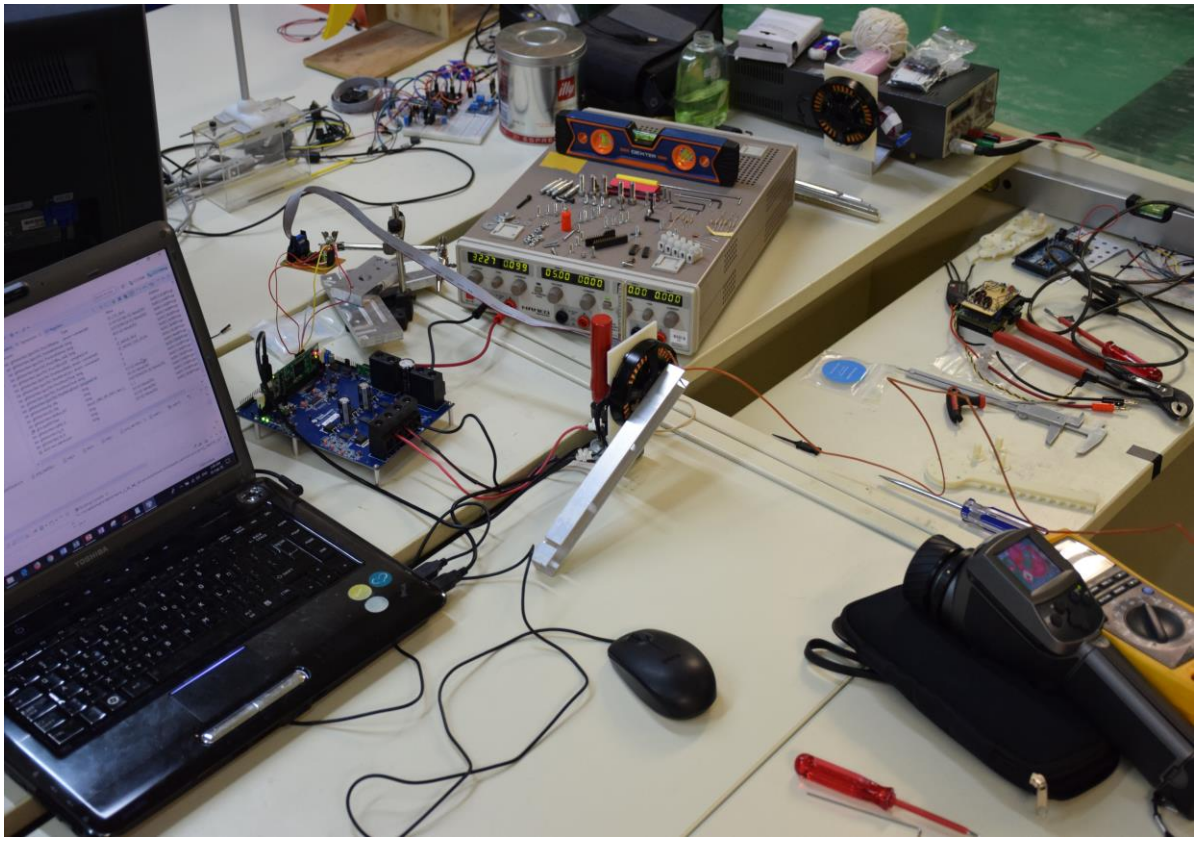
Σχήμα 4-26. Απόκριση της θερμικού συστήματος του κινητήρα.

4.4.2 Πειραματική μελέτη

Προκειμένου να εξετάσουμε την θερμική συμπεριφορά του κινητήρα που φαίνεται στο Σχήμα 4-1, χρησιμοποιήσαμε επιπλέον και τα στοιχεία τα οποία φαίνονται στις εικόνες στο Σχήμα 4-27.



Σχήμα 4-27. (α) Θερμική Κάμερα FLIR E300. (β) Texas Instruments DRV8301 - 69M Kit. (γ) Ψηφιακό πολύμετρο FLUKE 189 με θερμοστοιχείο. (δ) Θερμοστοιχείο type K εταιρείας FLUKE.



Σχήμα 4-28. Διάταξη πειράματος στο οποίο φαίνονται η θερμική κάμερα, το πολύμετρο με το θερμοστοιχείο στα πηνία του κινητήρα, ο κινητήρας και το board για την οδήγηση του κινητήρα. Μέσω του μοχλού που έβρισκε αντίσταση στο γραφείο που φαίνονται στην εικόνα προκαλούσαμε σφάλμα θέσης στον κινητήρα και αυτός με την σειρά του ασκούσε ροπή τραβώντας το μέγιστο ρεύμα που επιλέγεται στις ρυθμίσεις.

Αρχικά στον κινητήρα τοποθετήσαμε ειδικό μοχλό από αλουμίνιου, βλ. Σχήμα 4-28, κατεργασία του οποίου έγινε με εξοπλισμό του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου. Στην συνέχεια εφαρμόζουμε στον κινητήρα **έλεγχο θέσης (position control)** με σκοπό ο μοχλός να βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση προς γραφείο. Λόγω όμως της παρουσίας του γραφείου ο μοχλός δεν μπορεί να πάει σε αυτή την θέση και αυτό είχε ως αποτέλεσμα ο controller του board να στέλνει το μέγιστο ρεύμα **quadrature, Iq** το οποίο ρυθμίζεται στον αλγόριθμο που τρέχει στην κάρτα στο board προκειμένου να φέρει τον κινητήρα στην θέση αναφοράς.

Εν συνεχεία αφού γνωρίζαμε το ρεύμα που τραβάει ο κινητήρας χρησιμοποιήσαμε την θερμική κάμερα προκειμένου να δούμε την απόκριση της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων του κινητήρα. Για την επαλήθευση της ποσοτικής μέτρησης από την θερμική κάμερα, χρησιμοποιήσαμε και το θερμοστοιχείο το οποίο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-28, είχε τοποθετηθεί μέσα στα πηνία. Γνωρίζοντας από την θερμική κάμερα ποια πηνία θερμαίνονται περισσότερο μέσω της **ποιοτικής θερμικής ανάλυσης** που προσφέρει, τοποθετήσαμε το θερμοστοιχείο κατάλληλα. Τέλος το πείραμα πραγματοποιήθηκε για διάφορες τιμές του ρεύματος – ισχύος, τις οποίες παρουσιάζει ο Πίνακας 4-12, με τις αντίστοιχες υψηλότερες θερμοκρασίες.

Πίνακας 4-12. Μέγιστη θερμοκρασία του κινητήρα ως προς ρεύμα Iq.

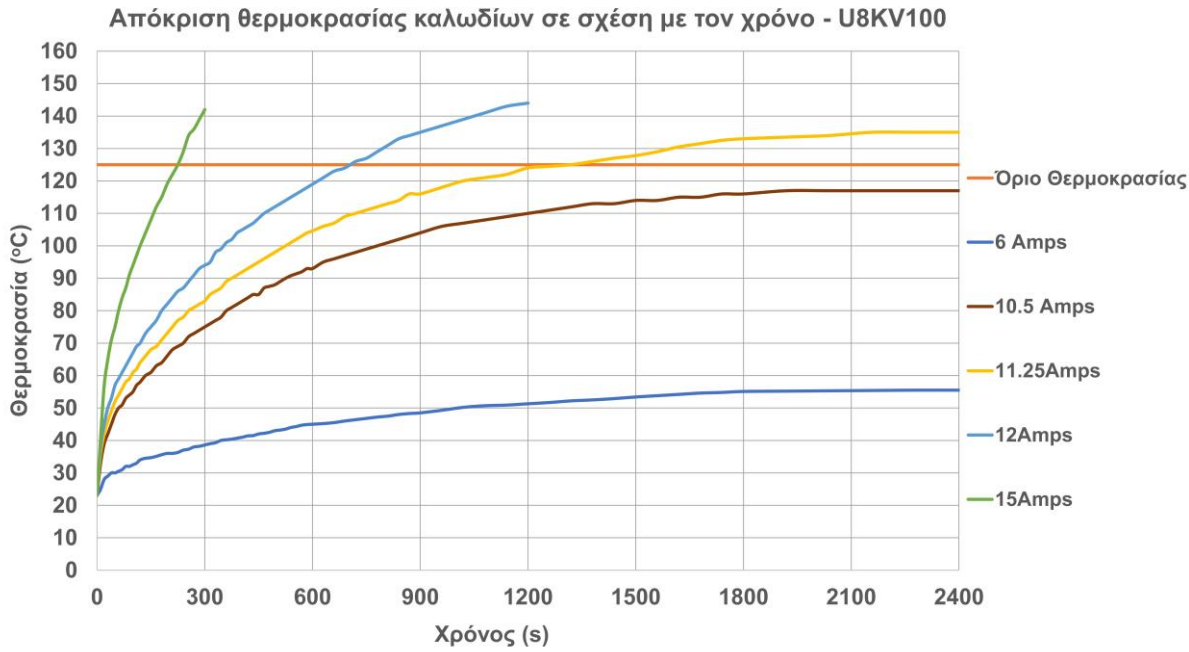
U8KV100		U8KV135	
Iq_ref (Amps)	Temp (ºC)	Iq_ref (Amps)	Temp (ºC)
6	55.5	6	45
10.5	117	12	108
11.25	135	13	122
12	144	13.5	135
15	142 (240s)	15	135* (840s)
-		17	135*(137s)

Εν τέλει, ο Πίνακας 4-12, και τα διαγράμματα στο Σχήμα 4-29 και στο Σχήμα 4-30, πληροφορούν ότι το ρεύμα που αντιστοιχεί στο μέγιστο συνεχές ανήκει στην περιοχή [10.5-11.25A] για τον κινητήρα U8KV100 και στην περιοχή [13-13.5A] για τον κινητήρα U8KV135, αφού στις δύο αυτές περιπτώσεις **το όριο των 125ºC-135ºC** είναι μέσα σε αυτό το φάσμα. Η διαφορά στα A (Ampere) δικαιολογείται από το γεγονός πως οι δύο κινητήρες διαφέρουν ως προς την αντίσταση, βλ. Πίνακας 4-1 και Πίνακας 4-3, και από το γεγονός η θερμική ισχύς εισόδου, και 10.5Amps για τον κινητήρα T-motor U8KV100 και στα 13Amps για τον κινητήρα T-motor U8KV100 είναι περίπου ίδια.

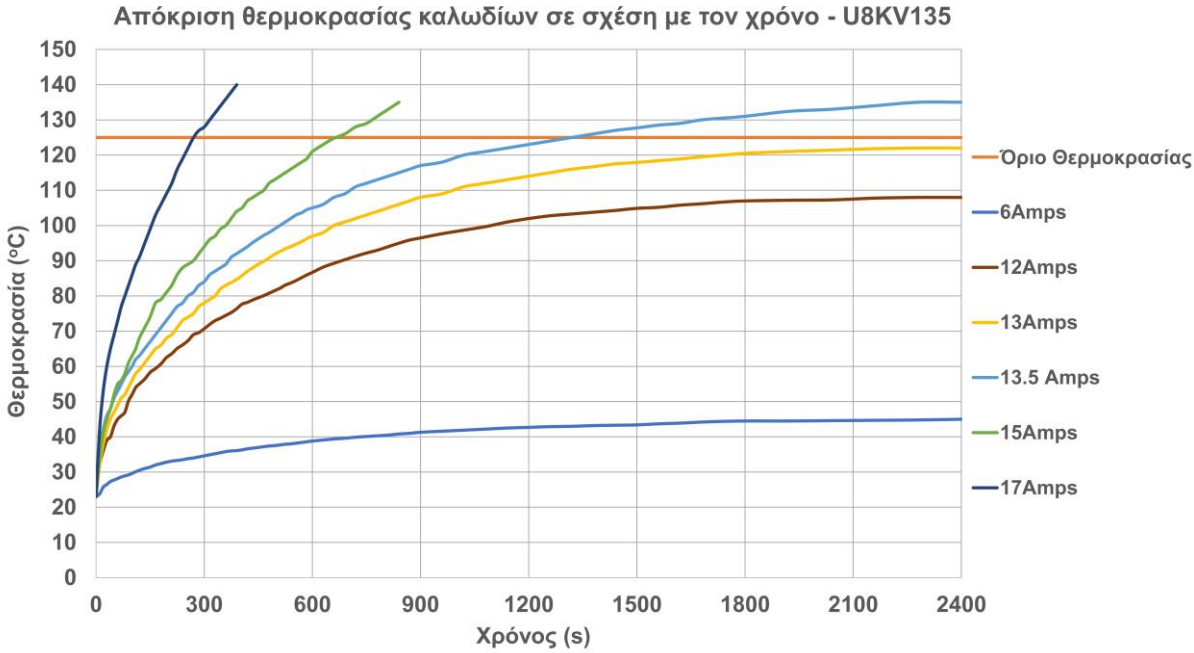
$$P_{inputKV100} = \frac{3}{2}10.5^2 0.153 = 25.30KW \simeq \frac{3}{2}13^2 0.102 = 25.86KW = P_{inputKV135} \qquad (4\text{-}21)$$

Αυτό συνεπάγεται ότι για διαφορετικό ρεύμα έχουμε παραγωγή περίπου ίδιας θερμικής ισχύος από τους δύο κινητήρες, ικανής ώστε τα τυλίγματα του στάτη να φτάσουν τις οριακές θερμοκρασίες. Τέλος όταν κινείται ο κινητήρας εμφανίζονται και επιπλέον απώλειες, βλ. Παράρτημα, που θερμαίνουν τον κινητήρα περαιτέρω, οπότε ίσως θα πρέπει να μπει και κάποιος συντελεστής ασφάλειας στις οριακές τιμές ρεύματος που βρήκαμε προηγουμένως.

Από το Σχήμα 4-29 και το Σχήμα 4-30, φαίνεται πως η θερμική απόκριση μοιάζει με απόκριση συστήματος 1ης τάξης και αυτό γιατί από τους δύο πόλους του συστήματος, ο πρώτος φαίνεται να αποσβένει πολύ γρηγορότερα σε σχέση με το άλλον και καθορίζει τα αρχικά στάδια της απόκρισης. Η μόνιμη κατάσταση της απόκρισης καθορίζεται όμως από τον αργό πόλο. Επίσης για πολύ υψηλά ρεύματα (15A και 17A) βλέπουμε πως η θερμοκρασία των τυλιγμάτων ανεβαίνει ταχύρρυθμα μέχρι την οριακή θερμοκρασία των 125 με 135ºC, λόγω της αύξησης της θερμικής ισχύος. Για λόγους ασφάλειας του κινητήρα όμως δεν επιτράπηκε να αυξηθεί περαιτέρω η θερμοκρασία των τυλιγμάτων και ως εκ τούτου η απόκριση διακόπηκε πριν φτάσει στην μόνιμη κατάσταση. Ουσιαστικά σε αυτή την περίπτωση η απόκριση μέχρι την οριακή θερμοκρασία σχετίζεται άμεσα με το γρήγορο πόλο του συστήματος αφού δεν έχει προλάβει να αποσβέσει και να λάβει επίδραση ο αργός πόλος. Αυτός είναι και ο λόγος που, βλ. Παράρτημα - Πίνακας 8-1, ο χρόνος στη λειτουργία μικρής διάρκειας πέρα του ονομαστικού ρεύματος σχετίζεται με την χρονική σταθερά των τυλιγμάτων που συνδέεται με τον γρήγορο πόλο της απόκρισης.

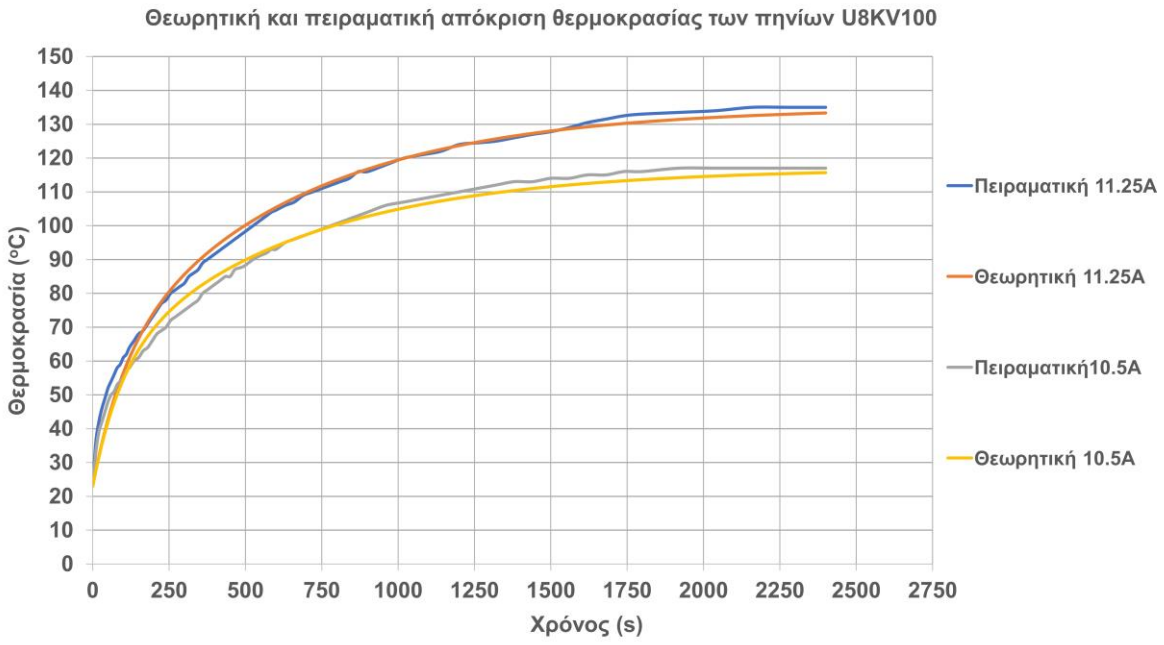


Σχήμα 4-29. Απόκριση θερμοκρασίας τυλιγμάτων κινητήρα U8KV100

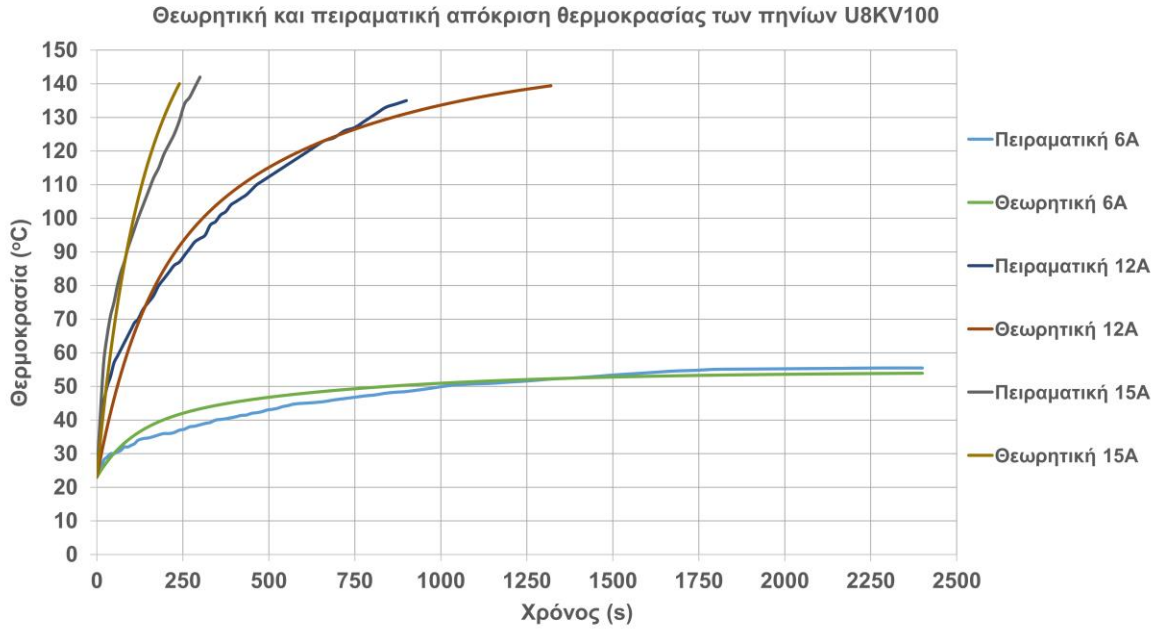


Σχήμα 4-30. Απόκριση θερμοκρασίας τυλιγμάτων κινητήρα U8KV135

Ομοίως με την εύρεση της ροπής αδράνειας και της ιξώδους τριβής, προσαρμόσαμε αυτήν την εξίσωση στα πειραματικά δεδομένα και των δύο κινητήρων και μπορέσαμε να βρούμε αρχικά τους πόλους του θερμικού συστήματος του κινητήρα και από εκεί τις χρονικές σταθερές που ορίσαμε στην Εξ. (4-17). Ιδιαίτερα ως αποκρίσεις αναφοράς πήραμε για τον κινητήρα U8KV100 τις αποκρίσεις στα ρεύματα I=10.5A και I=11.25A, ενώ για τον κινητήρα U8KV135 τα ρεύματα I=12A, I=13A και I=13.5A. Έτσι προσαρμόζοντας την Εξ. (4-19) για τις προαναφερθείσες εισόδους προέκυψαν οι αποκρίσεις που φαίνονται από το Σχήμα 4-31 έως το Σχήμα 4-34.



Σχήμα 4-31. Καμπύλες θερμοκρασιακής απόκρισης με βάση τις οποίες προέκυψε το θεωρητικό θερμικό μοντέλο του κινητήρα U8KV100.



Σχήμα 4-32. Καμπύλες επαλήθευσης θεωρητικού μοντέλου και πειράματος στον κινητήρα U8KV100.

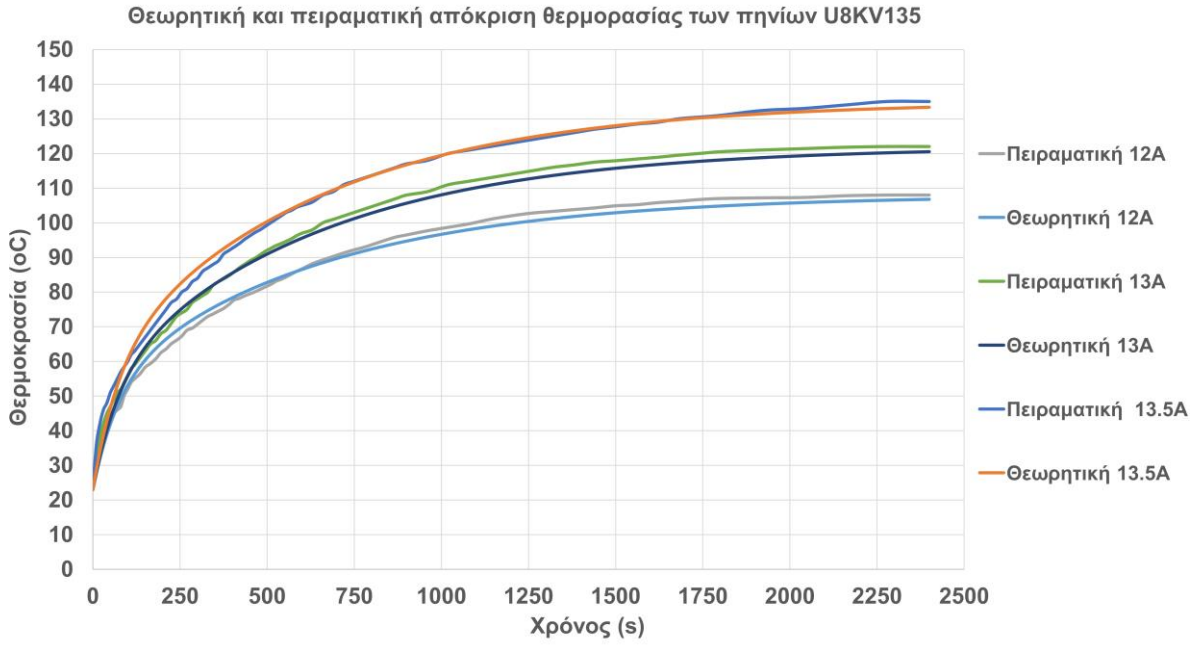
Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές των πόλων και των χρονικών σταθερών που αναγράφει ο Πίνακας 4-13 και ο Πίνακας 4-14.

Πίνακας 4-13. Τιμές πόλων του θερμικού μοντέλου των κινητήρων.

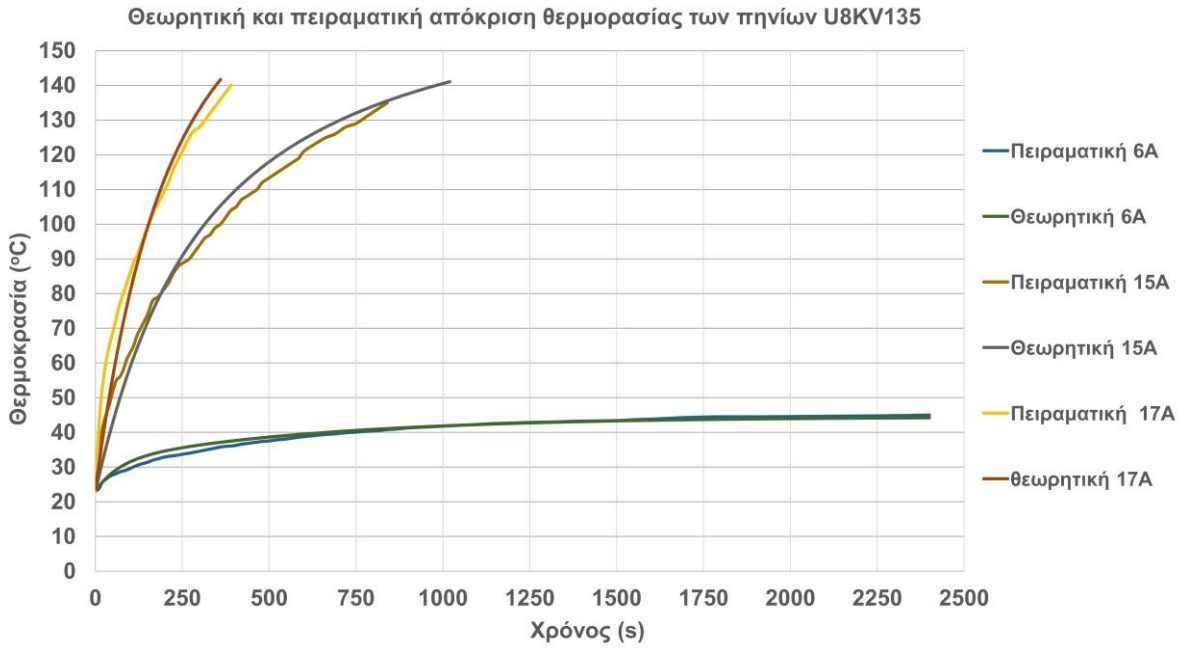
Θερμικός Πόλος	U8 KV100	U8 KV135
$1^{ος}$ – K_1	0.01	0.014
$2^{ος}$ – K_2	0.0016	0.0016

Πίνακας 4-14. Τιμές χρονικών σταθερών του θερμικού μοντέλου των κινητήρων.

Χρονική σταθερά	U8 KV100	U8 KV135
τ_1 (s)	89.58	71.76
τ_{12} (s)	255.67	301.58
τ_2 (s)	164.79	252.4



Σχήμα 4-33. Καμπύλες θερμοκρασιακής απόκρισης με βάση τις οποίες προέκυψε το θεωρητικό θερμικό μοντέλο του κινητήρα U8KV135.



Σχήμα 4-34. Καμπύλες επαλήθευσης θεωρητικού μοντέλου και πειράματος στον κινητήρα U8KV135.

Στο Σχήμα 4-31 και στο Σχήμα 4-33, βλέπουμε τις θεωρητικές αποκρίσεις στα ρεύματα που τέθηκαν σαν είσοδοι ώστε να μπορέσουμε να προβλέψουμε τη θερμοκρασιακή απόκριση του κινητήρα. Παρατηρούμε βέβαια κάποιες μικρές αποκλίσεις που μπορεί να οφείλονται σε δύο λόγους κυρίως. Είτε στο σφάλμα κατά την παρατήρηση και καταγραφή των πειραματικών δεδομένων και είτε λόγω του ότι η αντίσταση των τυλιγμάτων αυξάνει με την θερμοκρασία και άρα μεταβάλλεται και η εισερχόμενη θερμική ισχύς στο σύστημα πράγμα το οποίο το συγκεκριμένο μοντέλο δεν προβλέπει. Τέλος μόνο για τον υπολογισμό των χρονικών σταθερών του συστήματος, όχι των σταθερών α, β, c, που βλέπουμε παρακάτω, θεωρήσαμε ότι δεν έχουμε απαγωγή θερμότητας από τα καλώδια στο περιβάλλον απευθείας. Διαφορετικά δεν θα μπορούσαμε να τις υπολογίσουμε όλες μαζί, αφού θα είναι σε αριθμό 4 και οι διαθέσιμες εξισώσεις 3. Ουσιαστικά δηλαδή με το τρόπο αυτό αμελήσαμε από τον θερμικό γραμμικό γράφο, τον κλάδο της θερμικής αντίστασης από τα τυλίγματα στο περιβάλλον με αποτέλεσμα να απλοποιήσουμε τις Εξ. (4-16) και (4-18), αμελώντας την χρονική σταθερά τ_{12} της Εξ. (4-17).

Συγκεκριμένα το θερμικό μοντέλο των κινητήρων, είτε λάβουμε την απαγωγή θερμότητας από τα τυλίγματα στο περιβάλλον είτε όχι, δίνεται με βάση την Εξ. (4-22) που εξαρτάται από τον χρόνο και το ρεύμα (ισχύς).

$$T_w(t, I_q) = A + Be^{K1t} + \Gamma e^{K2t} \tag{4-22}$$

Όπου για τους διάφορους συντελεστές της Εξ. (4-22) ισχύει:

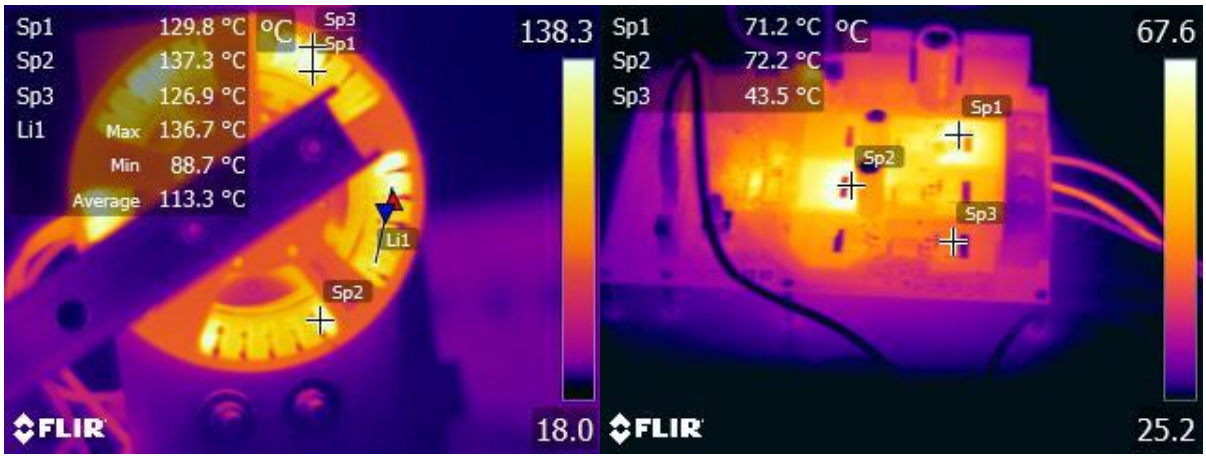
$$\begin{aligned} A &= \frac{P}{C_W}\frac{c}{\beta} \\ \Gamma &= \frac{P}{C_W}\left(1 - \frac{c}{\beta}K_1 - \frac{c}{\beta}a\right) / (K_1 - K_2) \\ B &= -\Gamma - \frac{P}{C_W}\frac{c}{\beta} \end{aligned} \tag{4-23}$$

Όπου P είναι η θερμική ισχύς εισόδου στο σύστημα όπως περιγράφεται από την Εξ. (4-20) και περιλαμβάνεται σε όλους τους συντελεστές της Εξ. (4-23). Ως εκ τούτου, η θερμοκρασία εξαρτάται από το ρεύμα που διαρρέει τον κινητήρα. Επίσης οι συντελεστές α, β,c είναι οι συντελεστές της συνάρτησης μεταφοράς, βλ. Εξ. (4-18), ενώ C_W είναι η θερμοχωρητικότητα των τυλιγμάτων. Όλοι αυτοί οι συντελεστές αρχικά υπολογίστηκαν με τα δεδομένα ρεύματα που φαίνονται στο Σχήμα 4-31 και στο Σχήμα 4-33, ενώ στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του κινητήρα όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4-32 και στο Σχήμα 4-34. Έτσι τελικά προκύπτει ένα θερμικό μοντέλο για κάθε κινητήρα. Παρατηρούμε ότι η μεταβλητή c, μηδενιστής στην συνάρτηση μεταφοράς, βλ. Εξ. (4-24), και που εμπεριέχει ο Πίνακας 4-15, είναι κοντά στον αργό πόλο του, γεγονός το οποίο είναι ένας σοβαρός λόγος γιατί η απόκριση προσεγγίζει σύστημα 1ης τάξης.

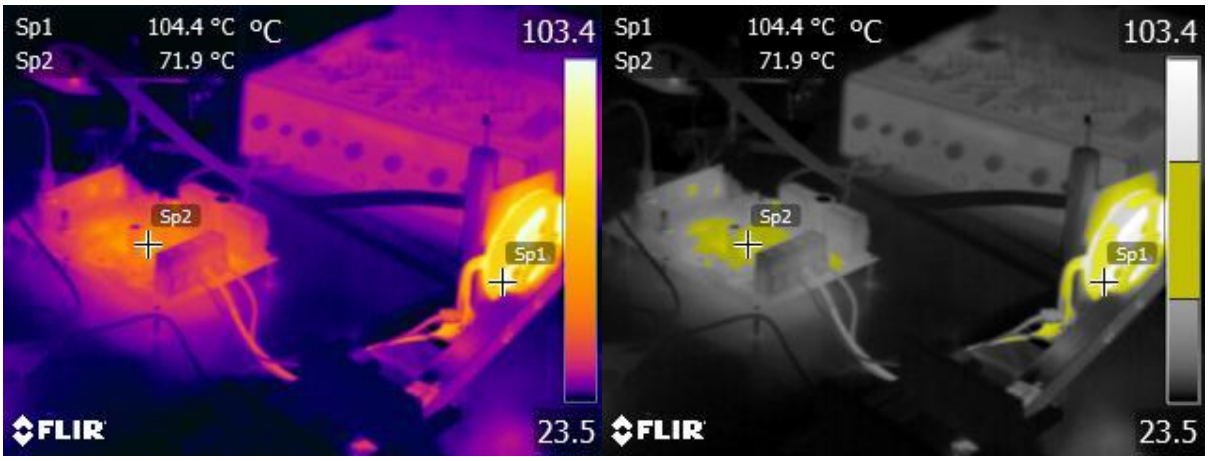
Πίνακας 4-15. Συντελεστές θερμικού μοντέλου.

Συντελεστές	U8 KV100	U8 KV135
α (s^{-1})	0.0116	0.0116
β (s^{-1})	0.000016	0.000024
c (s^{-1})	0.002744	0.002589
C_W (J/K)	44.8	30

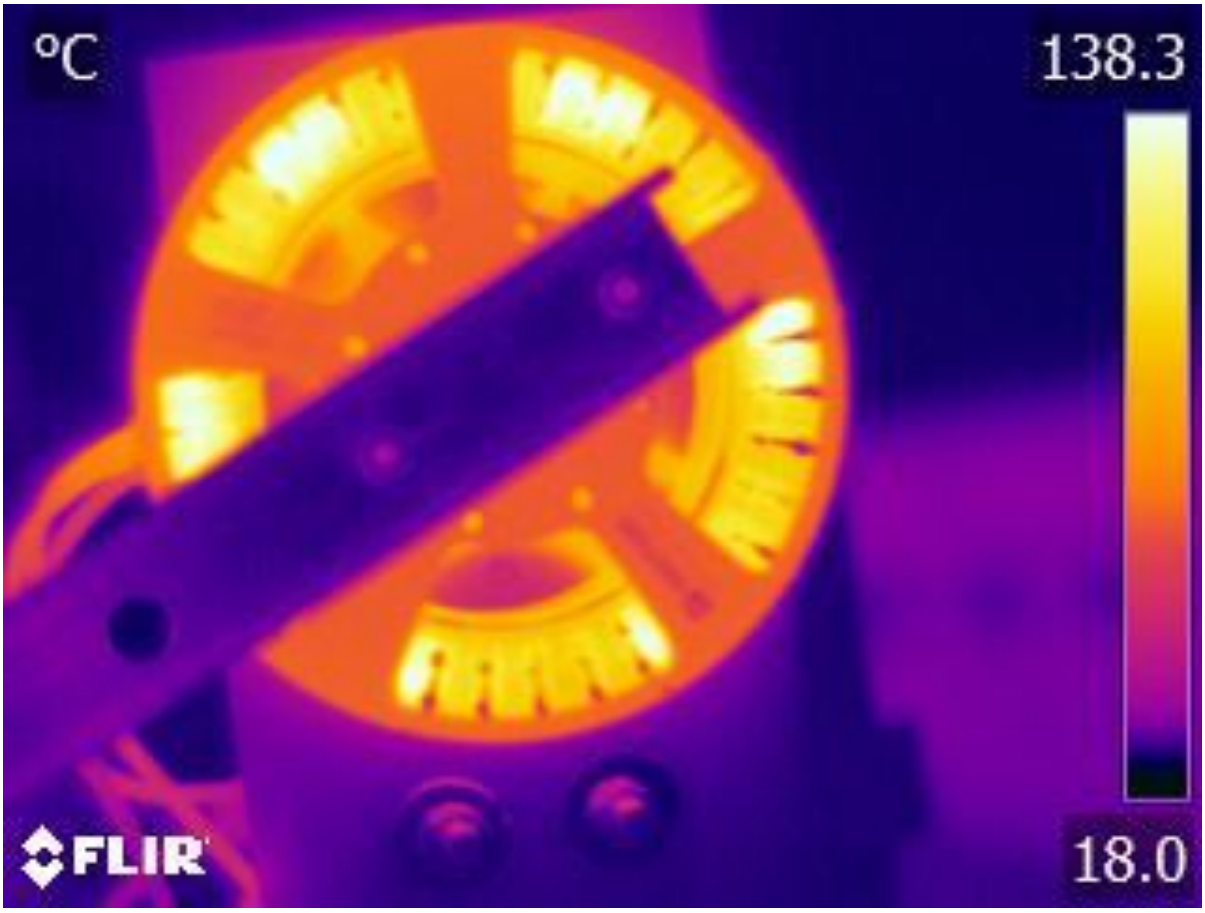
Τέλος η χρήση της θερμικής κάμερας ήταν πολύ βοηθητική καθώς εκτός από ποσοτικά συμπεράσματα είχαμε και χρήσιμα ποιοτικά συμπεράσματα όσον αφορά τις φάσεις που επενεργούνται κάθε φορά. Επειδή το πείραμα γίνεται με τον κινητήρα σε κατάσταση ακινησίας (stall) είναι εύλογο να περιμένουμε να μην επενεργούνται όλες οι φάσεις με το ίδιο ρεύμα, καθώς έχουμε και ημιτονοειδή οδήγηση και ως εκ τούτου δεν εμφανίζουν και οι τρεις φάσεις την ίδια θερμοκρασία. Αυτό μπορούμε να το παρατηρήσουμε είτε μέσω θερμικής φωτογραφίας στον κινητήρα, βλ. Σχήμα 4-35^{α}, είτε στον board, βλ. Σχήμα 4-35β, που οδηγεί τον κινητήρα όπου τα 2 MOSFETs από τα 6 που επενεργούνται και μέσω των οποίων ρέει ρεύμα, θερμαίνονται περισσότερο. Επίσης από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των φάσεων μπορούμε να παρατηρήσουμε και τη διάταξη αυτών όπου όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4-37 καθαρά, τα 36 πηνία χωρίζονται σε εξάδες και σε κάθε εξάδα όπως προκύπτει από την θερμοκρασιακή διαφορά έχουμε την ακόλουθη διάταξη: AA-BB-CC δηλαδή ανά δύο πηνία ανήκουν στην ίδια φάση. Αξίζει να σημειωθεί ότι το board του κινητήρα έχει θερμικό όριο και φέρνει σε κορεσμό τα FETs όταν η θερμοκρασία των τελευταίων έχει φτάσει τους 155 βαθμούς Κελσίου, [34].



Σχήμα 4-35. Χρήση της FLIR E300 infrared θερμικής κάμερας προκειμένου να κάνουμε θερμική ανάλυση του κινητήρα. (α) Θερμική εικόνα του κινητήρα στην οποία βλέπουμε τα πηνία έχουν διαφορετική θερμοκρασία από φάση σε φάση αλλά και στην ίδια την φάση. (β) Θερμική εικόνα από το board. Παρατηρούμε ότι τα mosfets συγκεκριμένης φάσης έχουν την υψηλότερη θερμοκρασία.



Σχήμα 4-36. Θερμική εικόνα της διάταξης του θερμικού συστήματος. Η δεξιά εικόνα περιλαμβάνει διαμερισμό της εικόνας σε τρία θερμικά επίπεδα.



Σχήμα 4-37. Από την θερμοκρασιακή διαφορά μπορούμε να παρατηρήσουμε την διάταξη των πηνίων στον στάτη.

5 Προσομοίωση Επενέργησης Απευθείας Οδήγησης Μονόποδου ρομπότ με δύο συνδέσμους σε κατακόρυφο οδηγό

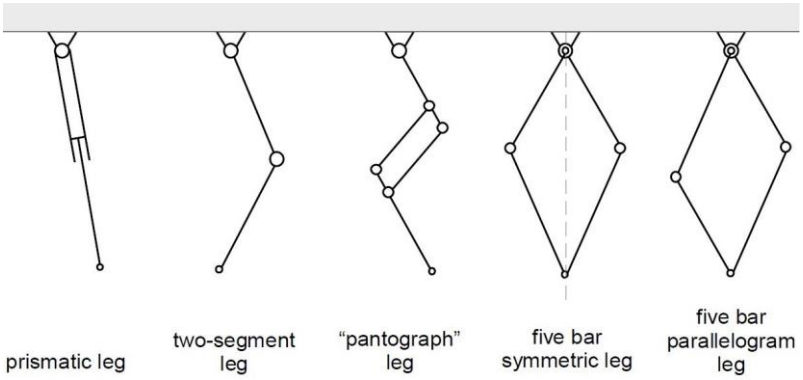
5.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 2 είδαμε κάποια σχετικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν τα ρομπότ με πόδια και δη στην περίπτωση της απευθείας επενέργησης του ρομπότ. Επίσης στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύσαμε τη συμπεριφορά του κινητήρα και περιγράψαμε τον τρόπο, τις δυνατότητες, και τα όρια λειτουργίας των κινητήρων που χρησιμοποιήσαμε.

Βασικό όμως σκοπός της όλης ανάλυσης μέχρι τώρα είναι η χρήση των κινητήρων αυτών και η μελέτη των δυνατοτήτων τους σε τετράποδα ρομπότ προκειμένου να επιτύχουμε επενέργηση απευθείας οδήγησης. Κατά την μελέτη της επενέργησης τετράποδων ρομπότ όμως, το πρώτο βήμα είναι η μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός ποδιού και η εξέταση της συμπεριφοράς του ως μονόποδου ρομπότ. Έτσι αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει την μοντελοποίηση ενός μονόποδου ρομπότ, στο οποίο η επενέργηση των αρθρώσεων είναι απευθείας οδήγησης και πραγματοποιείται με τους κινητήρες T-motor που αναφέραμε στα προηγούμενα κεφάλαια, οι οποίοι είναι μοντελοποιημένοι με τις πειραματικές διαδικασίες του Κεφαλαίου 4. Ουσιαστικά εξετάζουμε κατά πόσο μπορούν οι κινητήρες αυτοί με την συγκεκριμένη μέθοδο επενέργησης, έχοντας υπόψιν την μέγιστη συνεχή ροπή και γενικότερα τις δυνατότητες ροπής (σταθερά ροπής), να εφαρμοστούν σε ένα μονόποδο ρομπότ. Παράλληλα προκειμένου να γίνει αυτό, πραγματοποιήθηκε μία εκτίμηση των σχεδιαστικών παραμέτρων (διαστάσεις και βάρος) που πρέπει να έχει το πόδι για να είναι λειτουργικό με τους συγκεκριμένους κινητήρες.

5.2 Σχεδιαστικές αρχές

Όσον αφορά τις σχεδιαστικές αρχές των ρομπότ με πόδια υπάρχουν διάφορες παραλλαγές στην βιβλιογραφία για τετράποδα ρομπότ που το κάθε ένα από αυτά παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.



Σχήμα 5-1. Διάφορες παραλλαγές ποδιών.

Βασικό μέλημα κατά την σχεδιασμό του ποδιού του ρομπότ είναι να αντέχει στις κρούσεις που αναπτύσσονται κατά την επαφή με το έδαφος. Όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο 2 θα πρέπει ο μηχανισμός αλλά και ο τρόπος επενέργησης να είναι τέτοιοι ώστε να μπορούν να απορροφήσουν τα

κρουστικά φορτία που δέχονται ιδιαίτερα όταν το ρομπότ βρίσκεται σε κατάσταση τρεξίματος ή υπερπήδησης εμποδίων και οι δυνάμεις είναι μεγάλες. Ανάμεσα στις μεθόδους επενέργησης, στο Κεφάλαιο 2 είδαμε ότι την μεγαλύτερη προστασία παρέχει η μέθοδος επενέργησης απευθείας οδήγησης όπου δεν υπάρχει κιβώτιο και επομένως εκλείπουν οι κίνδυνοι που κρύβονται σε αυτό.

Σχετικά με τα υλικά από τα οποία κατασκευάζεται το πόδι, θα πρέπει, στις αρθρώσεις για παράδειγμα, να είναι στιβαρά και να μην εμφανίζουν ενδοτικότητα ώστε η λειτουργία της άρθρωσης να μην εξασθενεί μετά από πολλούς κύκλους λειτουργίας, [13]. Επίσης θα πρέπει να είναι ένα κατεργάσιμο υλικό και ταυτόχρονα ελαφρύ όπως το aerospace aluminum alloys class, (7075-T6 κράμα αλουμινίου). Όσον αφορά τους συνδέσμους **(links)** του μηχανισμού του ποδιού θα πρέπει εκτός από ελαφριά και αντοχής να είναι εύκολα στην αποσυναρμολόγηση και συναρμολόγηση, [13]. Τα πιο κοινό υλικό που καλύπτει αυτές τις προδιαγραφές είναι οι σωλήνες από ανθρακόνημα (carbon fiber tubes). Αυτά έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι χαμηλού κόστους και είναι διαθέσιμα σε διαφορετικά μεγέθη. Μπορούν να είναι το ένα μέσα στο άλλο ώστε να αποκτήσουν την κατάλληλη αντοχή. Επίσης ο χώρος μέσα στον σωλήνα μπορεί γίνει εκμεταλλεύσιμος ώστε να περάσουν τα καλώδια των ηλεκτρονικών και των αισθητήρων και να έχουμε μία πιο συμπαγή σχεδίαση, [13]. Ο Πίνακας 5-1 παρουσιάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο προαναφερθέντων υλικών.

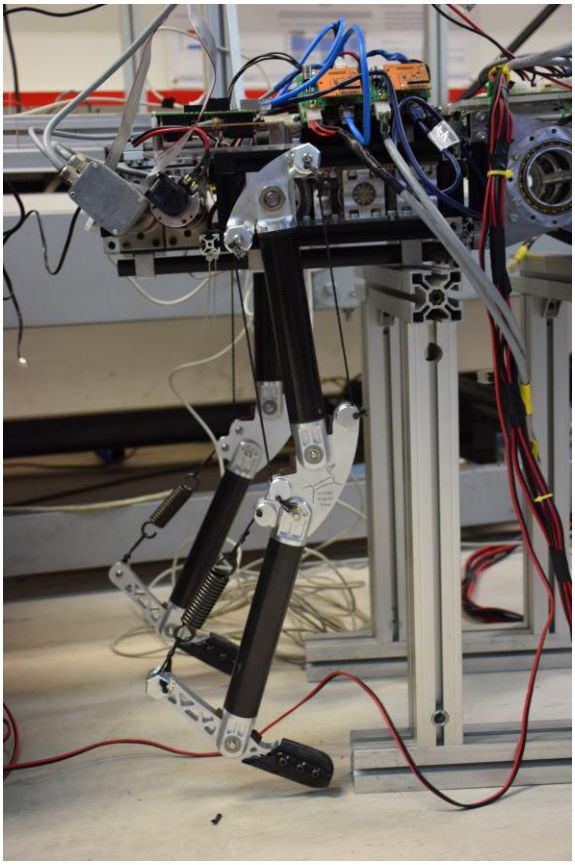
Πίνακας 5-1. Υλικά για τη μοντελοποίηση των δομικών τμημάτων του ρομπότ, [13].

Τμήμα ποδιού	Υλικό	Πυκνότητα [Kg/m^3]	Τάση Διαρροής [MPa]
Αρθρώσεις	7075-T6	2810	430
Σύνδεσμοι	Carbon fiber tubes	1466	200

Επιπλέον επειδή δεν έχουμε κιβώτια αφού η επενέργηση είναι απευθείας οδήγησης, δεν είναι αναγκαία η τοποθέτηση ελαστικού στοιχείου προκειμένου να βοηθήσει την κατασκευή από κρουστικά φορτία π.χ. στο δεύτερο σύνδεσμο που έρχεται σε επαφή με το περιβάλλον. Παρόλα αυτά βέβαια, όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο 2, μία από τις βασικές αρχές σχεδιασμού των ποδιών είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα και ένας τρόπος για να αυξηθεί αυτή είναι να εισαχθεί στην κατασκευή κάποιο ελατήριο.

Γενικά οι αρθρώσεις είναι τα πιο βαριά στοιχεία στην κατασκευή του ποδιού και καλό είναι να είναι όσο το δυνατόν ελαφρότερες. Ανάμεσα στις διάφορες παραλλαγές ποδιών, βλ. Σχήμα 5-1, φαίνεται μία παραλλαγή που χρησιμοποιεί πρισματική άρθρωση ενώ οι υπόλοιπες είναι στροφικές αρθρώσεις. Γενικά οι μηχανισμοί ποδιών με στροφικές αρθρώσεις συμπεριφέρονται καλύτερα όταν έχουμε αλληλεπίδραση με το έδαφος και ανάπτυξη δυνάμεων, [13]. Έτσι λόγω των παραπάνω για μηχανισμό ποδιού επιλέγουμε την δεύτερη περίπτωση «two segment leg» αφού έχει τον μικρότερο αριθμό στροφικών αρθρώσεων.

Το Σχήμα 5-2, παρουσιάζει το πόδι του τετράποδου ρομπότ Laelaps του ΕΜΠ στο οποίο εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά που περιγράψαμε παραπάνω όσο αφορά την επιλογή υλικού και του μηχανισμού. Στον μηχανισμό αυτόν έχουμε και ελατήριο για να προστατεύει το σύστημα επενέργησης αφού υπάρχει μείωση μέσω μειωτήρα και ιμάντα/τροχαλίας.



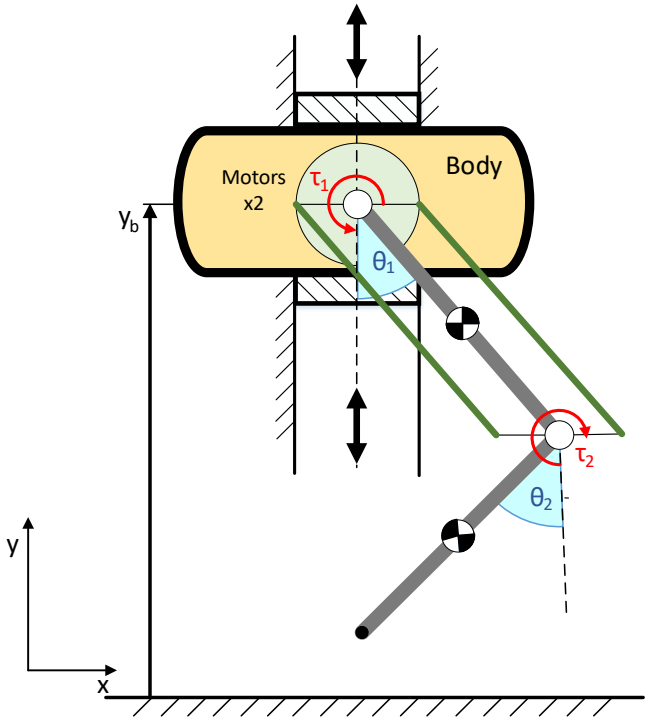
Σχήμα 5-2. Ο μηχανισμός του ποδιού του τετράποδου ρομπότ Laelaps του εργαστηρίου ρομποτικής ΕΜΠ. Φαίνονται χαρακτηριστικά τα υλικά αλουμινίου και ανθρακονήματος στις αρθρώσεις και στους συνδέσμους αντίστοιχα.

Επίσης όπως αναφέραμε και στο Κεφάλαιο 2, άλλος ένας στόχος κατά την σχεδιασμό του ποδιού είναι να είναι ελαφρύ και να παρουσιάζει μικρή ροπή αδράνειας προκειμένου να μπορούν να επιτευχθούν μεγάλες επιταχύνσεις και γρήγορη αλλαγή θέσης του ποδιού. Ειδικότερα είδαμε ότι καλό είναι, οι κινητήρες να τοποθετηθούν στο ισχίο (hip), προκειμένου το κέντρο μάζας του όλου μηχανισμού να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σώμα του ρομπότ και άρα η αδράνεια να είναι μικρή. Αυτό το βλέπουμε στην σχεδιασμό της εικόνας στο Σχήμα 5-2, όπου και οι δύο κινητήρες βρίσκονται στο σώμα και ο ένας επενεργεί την άρθρωση του ισχίου ενώ ο άλλος μέσω του μηχανισμού με τους τένοντες την άρθρωση στο γόνατο. Ο ίδιος ακριβώς μηχανισμός έχει θεωρηθεί και στην δική μας περίπτωση με την διαφορά ότι επειδή έχουμε επενέργηση απευθείας οδήγησης και αναγκαστικά οι επιδόσεις ροπής είναι μικρότερες, το πόδι διαστασιολογικά είναι μικρότερο. Τέλος στην δική μας σχεδιασμού, δεν έχουμε τοποθετήσει ελατήριο και τον μηχανισμό με το πέλμα.

5.3 Προσομοίωση ποδιού με 2 συνδέσμους – επενέργηση απευθείας οδήγησης

Αρχικά σκοπός της προσομοίωση είναι να εξετάσουμε κατά πόσο οι κινητήρες για τους οποίους μιλήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο μπορούν να εφαρμοστούν, ώστε να δημιουργηθεί ένα τετράποδο ρομπότ το οποίο να μπορεί να κάνει όλες τις κινήσεις (περπάτημα, τρέξιμο, υπερπήδηση εμποδίων, κ.λπ.).

Αρχικά η μελέτη θα περιοριστεί σε ένα μονόποδο ρομπότ το οποίο θα ομοιάζει σε μορφή με το ήδη υπάρχον πόδι του τετράποδου ρομπότ στο Σχήμα 5-2. Η κίνηση του ρομπότ περιορίζεται από κατακόρυφο οδηγό, βλ. Σχήμα 5-3, με τους δύο κινητήρες χωρίς ψήκτρες τοποθετημένους στο σώμα του μονόποδου.



Σχήμα 5-3. Μονόποδα ρομπότ με δύο συνδέσμους για κατακόρυφη κίνηση και επενέργηση απευθείας οδήγησης.

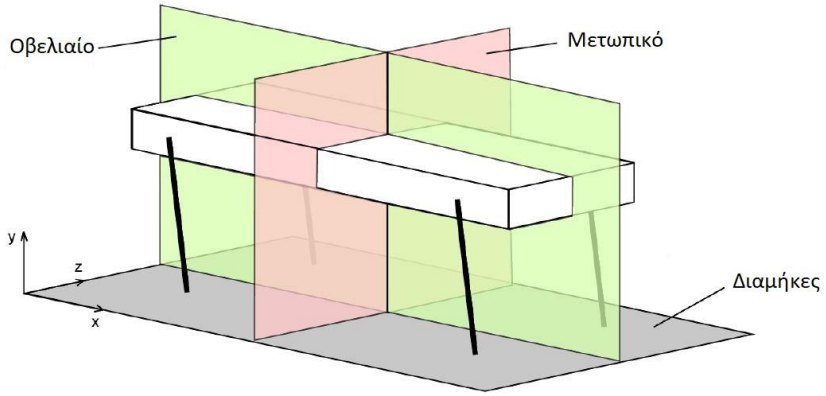
Θα μελετήσουμε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση το ρομπότ είναι ακίνητο στην χειρότερη θέση όσον αφορά τις ροπές που θα αναπτύσσονται στις αρθρώσεις και μελετάμε τις διαστάσεις του ρομπότ, δεδομένων των δυνατοτήτων των κινητήρων. Στην δεύτερη περίπτωση το ρομπότ από την χειρότερη θέση πρέπει να σηκωθεί όρθιο και εξετάζουμε αν με τις διαστάσεις που βρήκαμε προηγουμένως, μπορούν οι κινητήρες αυτοί να «σηκώνουν» ένα τέτοιο ρομπότ.

5.3.1 Μοντελοποίηση

Με βάση το Σχήμα 5-3, η μοντελοποίηση του ποδιού είναι η εξής. Το πόδι κινείται στο οβελιαίο επίπεδο (sagittal), βλ. Σχήμα 5-4, και επιπλέον η κίνηση του σώματος περιορίζεται στο κατακόρυφο άξονα. Οι γενικευμένες συντεταγμένες αποτελούνται από τις απόλυτες γωνίες θ_1 και θ_2 και την μετατόπιση στον κατακόρυφο άξονα του σώματος yb. Οι αρθρώσεις θ_1 και θ_2 επενεργούνται από τους δύο κινητήρες που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο με ροπές τ_1 και τ_2 αντίστοιχα.

Αρχικά, βλ. Σχήμα 5-5, θεωρούμε ότι το σώμα του ποδιού περιλαμβάνει το βάρος των δύο κινητήρων m_{mi}, συν επιπλέον το βάρος των ηλεκτρονικών, μπαταριών και το 1/4 του βάρους του σκελετού ενός τετράποδου ρομπότ που θα μπορέσει να έχει εφαρμογή αυτό το πόδι. Φυσικά εδώ εξετάζουμε την περίπτωση του μονόποδου ρομπότ αλλά στην ουσία θέλουμε να εξετάσουμε την

δυνατότητα αυτών των κινητήρων σε τετράποδο ρομπότ. Θεωρούμε ότι στην συγκεκριμένη μοντελοποίηση το σώμα δεν περιστρέφεται και άρα δεν λαμβάνουμε υπόψιν την ροπή αδράνειάς του αλλά μόνο την μάζα του m_b.



Σχήμα 5-4. Τρία επίπεδα κίνησης ενός ρομπότ με πόδια, [13].

Όσον αφορά τους συνδέσμους του ποδιού, βλ. Σχήμα 5-5, ο πρώτος έχει μήκος που ισούται με l_1 ενώ το κέντρο βάρος του απέχει από το ισχίο απόσταση d_1. Θεωρούμε ότι η μάζα του 1ου συνδέσμου m_1 ισούται με το μισό της μάζας της άρθρωσης του συνδέσμου στο ισχίο $m_{αρθ.1}$, την μάζα του υλικού που αποτελείται $m_{ανθρακ.1}$ και όπως είπαμε είναι κυλινδρικό ανθρακόνημα και με το μισό της μάζας της άρθρωσης στο γόνατο $m_{αρθ.2}$. Η ροπή αδράνειας του, I_1 δεν υπολογίζεται ως το κέντρο μάζα του συνδέσμου αλλά ως προς την άρθρωση που περιστρέφεται (ισχίο) με βάση τον κανόνα του Steiner, βλ. Εξ. (5-5) - (5-8). Τα ίδια αντιστοίχως ισχύουν και για το δεύτερο σύνδεσμο όπου το κέντρο βάρος απέχει από το γόνατο απόσταση d_2, έχει μήκος l_2 και μάζα m_2 που αποτελείται από το μισό της άρθρωσης του γονάτου $m_{αρθ.2}$, την μάζα του υλικού που αποτελείται $m_{ανθρακ.2}$ και την μάζα του πέλματος $m_{πελμ}$. Η ροπή αδράνειας I_2, υπολογίζεται επίσης ως προς τον άξονα περιστροφής (γόνατο) και όχι ως προς το κέντρο βάρους του. Έτσι έχουμε τις παρακάτω εξισώσεις.

$$
\begin{aligned}
m_{l1} &= \frac{m_{\alpha\rho\theta.1}}{2} + \frac{m_{\alpha\rho\theta.2}}{2} + m_{\alpha\nu\theta\rho\alpha\kappa.1} \\
m_{\alpha\nu\theta\rho\alpha\kappa.1} &= \rho\pi \frac{d_{\varepsilon\xi.}^2 - d_{\varepsilon\sigma.}^2}{4} l_{\alpha\nu\theta\rho\alpha\kappa.1}
\end{aligned}
\tag{5-1}
$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του υλικού και παριστάνουν την κατανομή των μαζών για τον πρώτο σύνδεσμο. Όσον αφορά τον δεύτερο έχουμε.

$$
\begin{aligned}
m_{l2} &= \frac{m_{\alpha\rho\theta.2}}{2} + m_{\alpha\nu\theta\rho\alpha\kappa.2} + m_{\pi\varepsilon\lambda\mu.} \\
m_{\alpha\nu\theta\rho\alpha\kappa.2} &= \pi\rho \frac{d_{\varepsilon\xi.}^2 - d_{\varepsilon\sigma.}^2}{2} l_{\alpha\nu\theta\rho\alpha\kappa.2}
\end{aligned}
\tag{5-2}
$$

Όσον αφορά τα κέντρα μάζας κάθε συνδέσμου ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$
d_1 = \frac{m_{\alpha\nu\theta\rho\alpha\kappa.1} \frac{l_1}{2} + \frac{m_{\alpha\rho\theta.1}}{2} l_{\alpha\rho\theta.1}}{m_1}
\tag{5-3}
$$

$$d_2 = \frac{\frac{m_{\alpha\rho\theta.2}}{2} l_{\alpha\rho\theta.2} + m_{\alpha\nu\theta\rho\alpha\kappa.2} \frac{l_2}{2} + m_{\pi\acute{\varepsilon}\lambda\mu.} l_2}{m_2} \tag{5-4}$$

Οι ροπές αδράνειας των δύο συνδέσμων του μονόποδου ρομπότ ως προς το κέντρο βάρος τους, δίνονται από τις Εξ. (5-5) και (5-6).

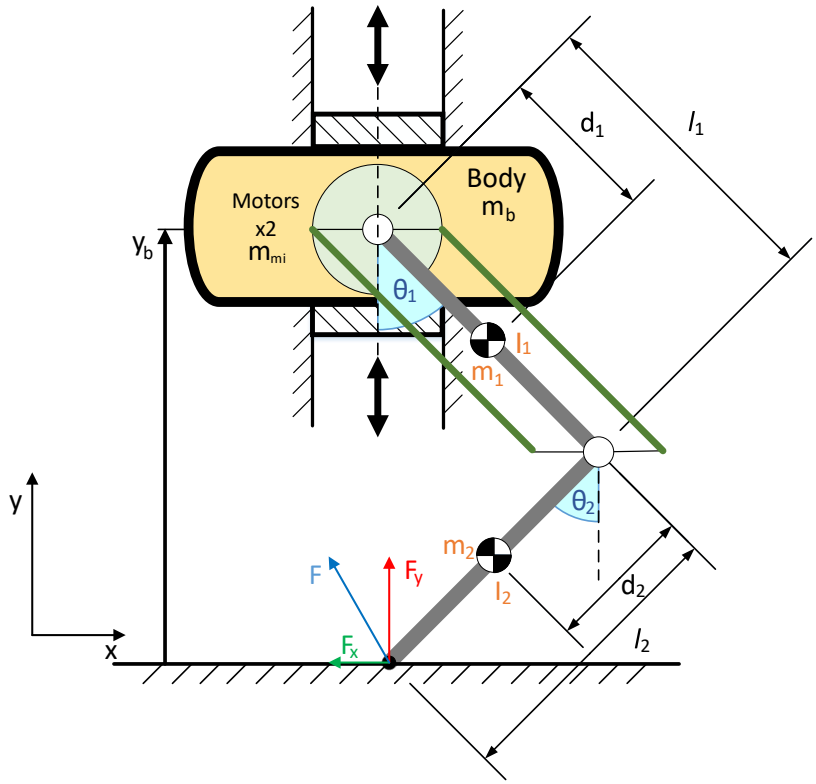
$$I_1 = \frac{m_1 l_1^2}{12} \tag{5-5}$$

$$I_2 = \frac{m_2 l_2^2}{12} \tag{5-6}$$

Έτσι με βάση τον κανόνα του Steiner οι ροπές αδράνειας των δύο συνδέσμων ως προς τον άξονα περιστροφής, συμπεριλαμβανομένου και της ροπής αδράνειας των κινητήρων I_{m1} και I_{m2}, υπολογίζονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$I_1 = \frac{m_1 l_1^2}{3} + I_{m1} \tag{5-7}$$

$$I_2 = \frac{m_2 l_2^2}{3} + I_{m2} \tag{5-8}$$



Σχήμα 5-5. Μονόποδα ρομπότ με δύο συνδέσμους για κατακόρυφη κίνηση και επενέργηση με απευθείας οδήγηση.

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς και το Σχήμα 5-5, εργαστήκαμε ως εξής προκειμένου να εξάγουμε τις εξισώσεις κίνησης. Αρχικά παρουσιάζουμε την θέση του κέντρου βάρους (κ.β.) του πρώτου συνδέσμου σε απόλυτες συντεταγμένες:

$$x_1 = x_b + d_1 \sin(\theta_1(t))$$
$$y_1 = y_b(t) - d_1 \cos(\theta_1(t)) \tag{5-9}$$

Εν συνεχεία έχουμε για το κ.β. του 2ου συνδέσμου και του πέλματος ότι

$$x_2 = x_b + l_1 \sin(\theta_1(t)) + d_2 \sin(\theta_2(t))$$
$$y_2 = y_b(t) - l_1 \cos(\theta_1(t)) - d_1 \cos(\theta_2(t)) \tag{5-10}$$

και

$$x_f = x_1(t) + l_2 \sin(\theta_2(t))$$
$$y_f = y_1(t) - l_1 \cos(\theta_2(t)) \tag{5-11}$$

Η κινητική ενέργεια του συστήματος είναι:

$$K = K_{\sigma\acute{\omega}\mu\alpha} + K_{\sigma\acute{\upsilon}\nu\delta.1} + K_{\sigma\acute{\upsilon}\nu\delta.2} \Rightarrow$$
$$K = \frac{1}{2} m_b y_b^2 + [\frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1(t)^2 + \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2)] + [\frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2(t)^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2)] \tag{5-12}$$

όπου όπως αναφέραμε το σώμα του μονόποδου δεν περιστρέφεται αλλά εκτελεί μόνο κατακόρυφη κίνηση. Επίσης όπως είπαμε οι γωνίες θ_1 και θ_2 είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και αντιστοιχούν σε απόλυτες γωνίες. Επίσης η δυναμική ενέργεια του συστήματος είναι:

$$U = U_{\sigma\acute{\omega}\mu\alpha} + U_{\sigma\upsilon\nu\delta.1} + U_{\sigma\upsilon\nu\delta.2} \Rightarrow$$
$$U = m_b g y_b + m_1 g y_1 + m_2 g y_2 \tag{5-13}$$

Άρα έχουμε ότι η λαγκραντζιανή συνάρτηση είναι:

$$L = K - U \tag{5-14}$$

Εκτός από την κινητική ενέργεια και την δυναμική έχουμε και τις απώλειες ενέργειες οι οποίες δίνονται από τον τύπο:

$$P_{\alpha\pi\omega\lambda.} = \frac{1}{2} b_{\iota\sigma\chi\acute{\iota}o\upsilon} \theta_1(t)^2 + \frac{1}{2} b_{\gamma o\nu\acute{\alpha}\tau.} \theta_2(t)^2 \tag{5-15}$$

και οι οποίες δηλώνουν τις απώλειες λόγω τριβής ιξώδους στις αρθρώσεις στο ισχίο και στο γόνατο. Προκειμένου όμως το σύστημα να μπορεί να διατηρεί την κίνησή του παρά τις απώλειες ενέργειας έχουμε και την ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα και περιλαμβάνει την ενέργεια από τους κινητήρες και τις δυνάμεις που ασκεί το έδαφος και δίνονται από την παρακάτω εξίσωση.

$$P_{input} = \tau_1 \dot{\theta}_1(t_1) + \tau_2 \dot{\theta}_2(t) + F_x \dot{x}_f + F_y \dot{y}_f \tag{5-16}$$

Έχοντας αυτές τις εξισώσεις ενέργειας του συστήματος, η δυναμική εξίσωση κίνησης του μονόποδου ρομπότ δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \frac{\partial P_{input}}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial P_{losses}}{\partial \dot{q}} \tag{5-17}$$

Όπου q είναι το διάνυσμα των γενικευμένων συντεταγμένων (θ1, θ2, yb). Η Εξ. (5-17) μας δίνει την εξίσωση κίνησης του συστήματος η οποία με την μορφή πινάκων έχει την παρακάτω μορφή.

$$\mathbf{M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq + F_d\dot{q} + F_c\, q + J^{\tau}F_{ext} = [0\ \ \tau]^T} \tag{5-18}$$

Όπου **M** είναι το μητρώο μάζας, **C** είναι το μητρώο που περιέχει τις δυνάμεις Coriolis και τις φυγόκεντρες δυνάμεις, **K** περιέχει τις βαρυτικές δυνάμεις, $\mathbf{F_d}$ και $\mathbf{F_c}$ είναι τα διαγώνια μητρώα ιξώδους τριβής (dampening) και τριβής Coulomb αντίστοιχα, **J** είναι η Ιακωβιανή του μηχανισμού και εξαρτάται από τον διαμόρφωση που έχει, δηλαδή τις γωνίες θ_1 και θ_2, $\mathbf{F_{ext}}$ είναι το διάνυσμα των εξωτερικών δυνάμεων που φαίνονται και στο Σχήμα 5-5, και τέλος **τ** είναι το διάνυσμα των επενεργουσών ροπών στο σύστημα. Επειδή έχουμε 3 βαθμούς ελευθερίας συνολικά και επενεργούνται με ροπή μόνο οι δύο από αυτούς λέμε ότι το σύστημα είναι υπο-επενεργούμενο.

Για την επενέργηση των αρθρώσεων χρησιμοποιούμε τους κινητήρες χωρίς ψήκτρες που αναλύσαμε προηγουμένως. Παρόλο που επενεργούνται με ημιτονοειδές ρεύμα, τελικά μετά την ανάλυση που κάναμε στο 3ο και 4ο κεφάλαιο είδαμε ότι στο περιστρεφόμενο σύστημα dq οι κινητήρες αυτοί αντιμετωπίζονται με σταθερά -dc- μεγέθη. Είδαμε ότι μετά τον έλεγχο πεδίου ότι για σταθερό ρεύμα Iq στον quadrature άξονα αντιστοιχεί συγκεκριμένη τιμή στην ροπή και άρα όσο αφορά την τελική προσέγγιση των κινητήρων αυτών δεν αλλάζει κάτι σε αντιστοιχία με τους κινητήρες με ψήκτρες, απλά αντί για σταθερό ρεύμα από την τροφοδοσία, έχουμε το σταθερό ρεύμα στον quadrature άξονα Iq και το οποίο ισούται με το πλάτος του ημιτονοειδούς ρεύματος που τροφοδοτείται.

Οι κινητήρες αυτοί όπως και όλοι οι ηλεκτρικοί κινητήρες περιορίζονται από δύο κυρίως περιορισμούς. Από τις δυνατότητές τους σε παραγωγή ροπής και τις δυνατότητές τους σε παραγωγή ρεύματος. Ο πρώτος περιορίζεται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και ισχύει η Εξ. (3-36). Ο δεύτερος περιορισμός υπάρχει επειδή καθώς διαρρέεται ο κινητήρας από ρεύμα αυτός θερμαίνεται λόγω της αντίστασης των τυλιγμάτων του και ως εκ τούτου περιορίζεται θερμικά, ανάλυση που είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η θερμική ισχύς που παράγεται και θερμαίνει τον κινητήρα όταν τον τροφοδοτούμε με ρεύμα Iq είναι:

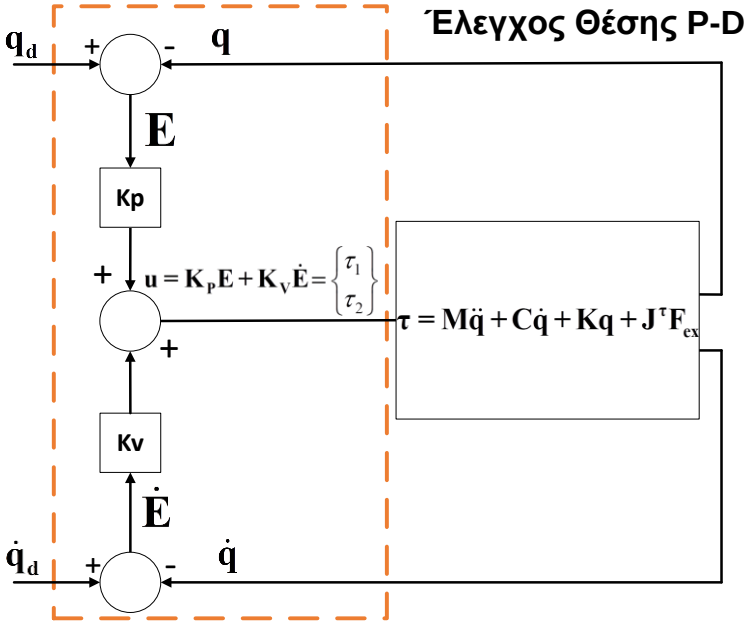
$$P = \frac{3}{2} I_q R^2 \tag{5-19}$$

Τέλος οι κινητήρες εργάζονται στο μέγιστο συνεχές ρεύμα ή αν θέλουμε να εργαστούν σε μεγαλύτερο ρεύμα αυτό θα πρέπει να περιορίζεται ώστε η rms τιμή του ρεύματος να είναι ίση ή μικρότερη από το μέγιστο συνεχές ρεύμα.

Ο νόμος ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε είναι P-D έλεγχος θέσης σε κάθε άρθρωση και άρα ισχύει το ακόλουθο λογικό διάγραμμα το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 5-6, με βάση αυτό τον νόμο ελέγχου. Με τον νόμο αυτό ελέγχου μπορούμε να πούμε ότι πετυχαίνουμε ο κινητήρας να εργάζεται ως ένα εικονικό ελατήριο και αποσβεστήρα όπως περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 2 αφού ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$\tau = K_p e + K_D \dot{e} \tag{5-20}$$

όπου e είναι στο σφάλμα στην θέση της άρθρωσης. Έτσι έχουμε το λεγόμενο **virtual joint compliance** και μπορούμε ρυθμίζοντας τα κέρδη με διαφορετικό τρόπο να έχουμε διαφορετική ενδοτικότητα σε κάθε άρθρωση. Αυτό βέβαια ακολουθείται από το **Virtual Leg Compliance** γιατί στην ουσία σκοπός είναι να εξετάσουμε, μέσω του P-D ελέγχου, την εικονική ενδοτικότητα όλου του ποδιού. Λίγες παραπάνω λεπτομέρειες πάνω στον έλεγχο αυτό μπορούμε να δούμε στο Παράρτημα 8.1.4.



Σχήμα 5-6. Έλεγχος θέσης PD στις επενεργούμενες αρθρώσεις.

Συνοψίζοντας ο Πίνακας 5-2 παρουσιάζει τις διάφορες λειτουργικές και κατασκευαστικές παραμέτρους των κινητήρων με βάση τα όσα υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 4.

Πίνακας 5-2. Κατασκευαστικές και Λειτουργικές παράμετροι κινητήρων.

Παράμετροι κινητήρα	Τιμές
Μάζα Κινητήρων ($M_{κιν.}$)	0.236 Kg
Ροπή Αδράνεια U8KV100 ($I_{κιν.A}$)	0.0001325Kgm^2
Ροπή Αδράνεια U8KV135 ($I_{κιν.B}$)	0.0001325Kgm^2
Στατική τριβή U8KV100 ($τ_{στ.τριβών1}$)	0.042Nm
Στατική τριβή U8KV135 ($τ_{στ.τριβών2}$)	0.048Nm
Τριβή Ιξώδους U8KV100 ($b_{ισχίου}$)	0.0001261Nms/rad
Τριβή Ιξώδους U8KV135 ($b_{γονάτ.}$)	0.0001651Nms/rad
Σταθερά Ροπής Κινητήρα U8KV100 (K_{t1})	0.148Nm/A
Σταθερά Ροπής Κινητήρα U8KV135 (K_{t2})	0.119Nm/A

Προκειμένου να δούμε τα μεγέθη του ποδιού που μπορούμε να κατασκευάσουμε ελέγξαμε κατά πόσο αυτοί οι κινητήρες με τις δυνατότητες και τους περιορισμούς που τους διέπουν μπορούν να σηκώσουν το βάρος του ρομπότ και να σταθούν με ευστάθεια στην «χειρότερη θέση» που είναι όταν τα πόδια είναι λυγισμένα και είναι σαν σε κατάσταση από «βαθύ κάθισμα». Σε αυτήν την θέση έχουμε ότι οι αρθρώσεις έχουν στραφεί στις μέγιστες μοίρες που μπορούν σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα. Αυτές είναι 60° μοίρες για το ισχίο και 85° μοίρες για το γόνατο, βλ. Σχήμα 5-7.

Λαμβάνοντας υπόψιν τη σταθερά ροπής και το μέγιστο συνεχές ρεύμα που μπορεί να τραβήξει ο κάθε κινητήρας, σύμφωνα με την θερμική ανάλυση του Κεφάλαιο 4, προκύπτει ο Πίνακας 5-3 και ο οποίος εμπεριέχει την τιμή της μέγιστης συνεχής ροπής.

Πίνακας 5-3. Μέγιστη συνεχής Η/Μ ροπή κινητήρων.

Κινητήρας	Μέγιστη Η/Μ Ροπή
T-motor U8KV100	1.63 (Nm)
T-motor U8KV135	1.54 (Nm)

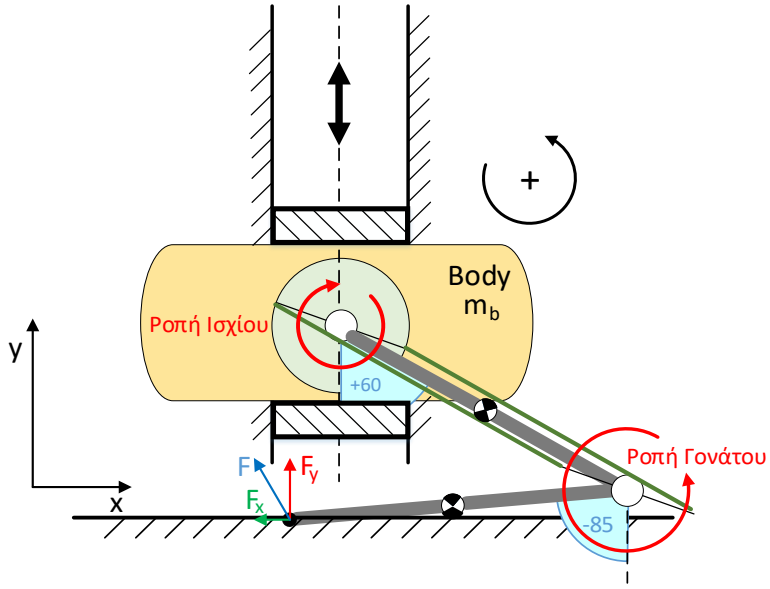
Οι τιμές που αναγράφει ο Πίνακας 5-3, αντιπροσωπεύουν την μέγιστη συνεχή ηλεκτρομαγνητική ροπή των κινητήρων με βάση το ρεύμα και την σταθερά ροπής. Όμως από αυτή την ροπή προκειμένου να βρούμε την ροπή εξόδου πρέπει να αφαιρέσουμε την ροπή τριβής. Ισχύουν δηλαδή οι σχέσεις παρακάτω:

$$\tau_{\varepsilon\xi\acute{o}\delta o\upsilon} = \tau_{H/M} - \tau_{\sigma\tau.\tau\rho\iota\beta\acute{\omega}\nu} \tag{5-21}$$

Μέσα στις λειτουργικές παραμέτρους που εμπεριέχει ο Πίνακας 5-2, αναγράφει και τις στατικές τριβές για κάθε κινητήρα και επομένως μπορούμε να υπολογίσουμε την μέγιστη ροπή εξόδου του κινητήρα.

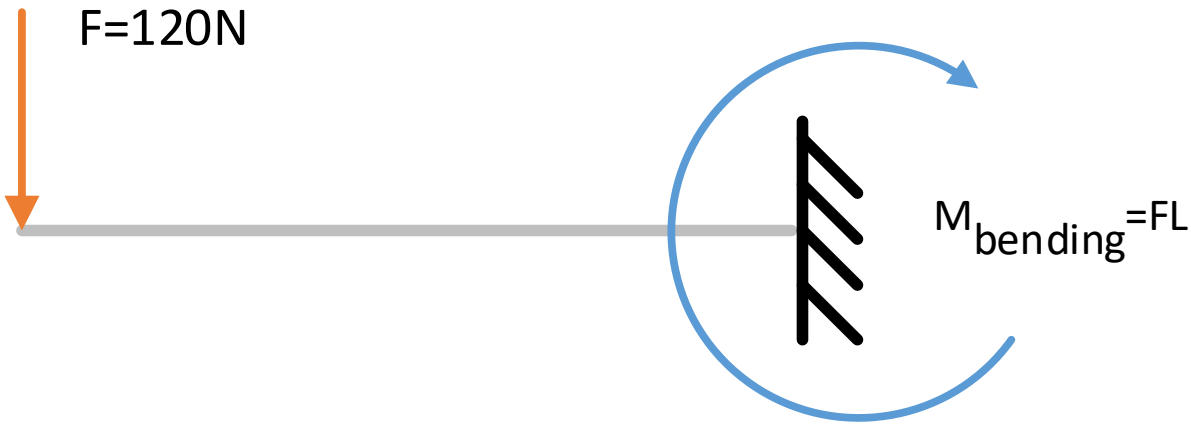
Πίνακας 5-4. Μέγιστη συνεχής ροπή εξόδου κινητήρων.

Κινητήρας	Μέγιστη Ροπή Εξόδου
T-motor U8KV100	1.588 (Nm)
T-motor U8KV135	1.492 (Nm)



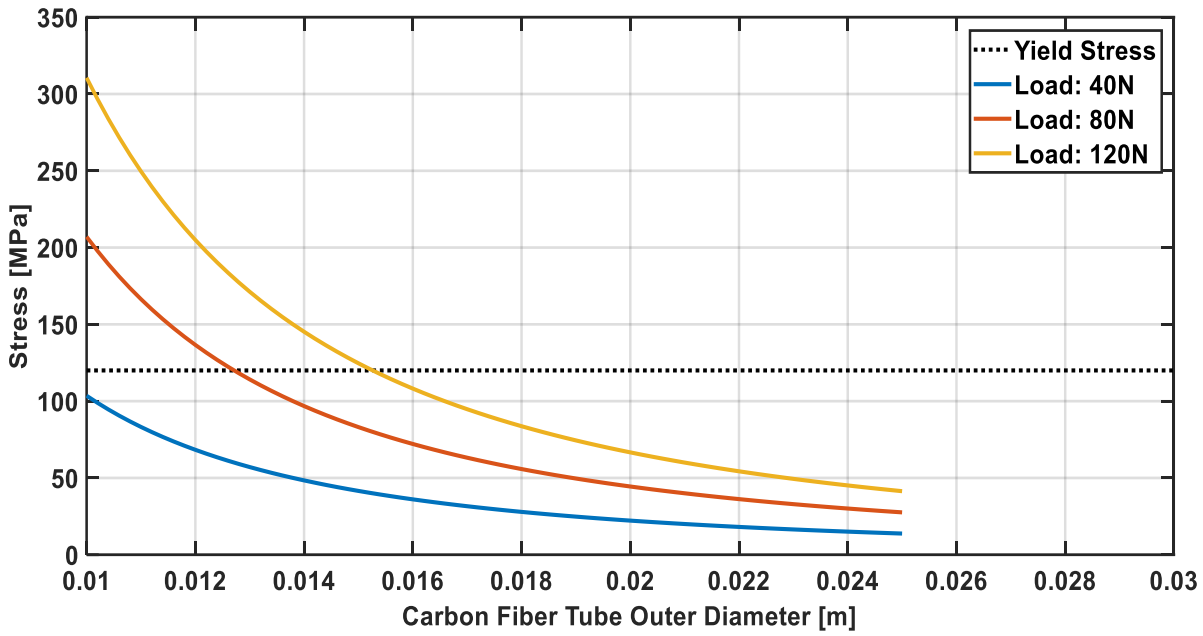
Σχήμα 5-7. Η χειρότερη από άποψη απαιτήσεων ροπή που θα πρέπει να αναπτυχθεί στις αρθρώσεις προκειμένου να μπορούν οι κινητήρες να σηκώσουν το βάρος του ρομπότ.

Προκειμένου να γίνει η ανάλυση επιλέξαμε ως βάρος του σώματος το 1 kg. Οι βασικοί παράμετροι σχεδιασμού του ποδιού είναι πρώτον το βάρος του σώματος που επιλέχθηκε εξ' αρχής και άρα δεν μεταβάλλεται κατά τον σχεδιασμό, δεύτερον το μήκος των συνδέσμων και τρίτον οι μάζες τους, που περιλαμβάνουν επίσης και τις μάζες των αρθρώσεων και του πέλματος. Τα υπόλοιπα μεγέθη όπως η ροπή αδράνειας, προέκυψαν με βάση τις εξισώσεις που αναφέραμε προηγουμένως. Προκειμένου να μειώσουμε τους 2 βαθμούς ελευθερίας που μένουν, κατά τον σχεδιασμό (βάρος και μήκος συνδέσμων) έπρεπε να έχουμε και μία σχέση μεταξύ της μάζας των συνδέσμων (ανθρακόνημα) και του μήκους τους. Έτσι τελικά η μόνη μεταβλητή σχεδίασης του προβλήματος είναι τα μήκη των συνδέσμων με αποτέλεσμα να μπορούμε να βρούμε τα οριακά μεγέθη αυτών, στα οποία οι κινητήρες αυτοί αντέχουν να σηκώσουν το 1kg του σώματος. Η σχέση μεταξύ της μάζας και του μήκους του ανθρακονήματος προέκυψε με βάση το ανθρακόνημα που χρησιμοποιήθηκε στο τετράποδο ρομπότ, βλ. Σχήμα 5-2. Το ανθρακόνημα αυτό ήταν τύπου Carbon Fibre Tube (Roll Wrapped), [16]. Ο σωλήνας ανθρακονήματος που επιλέχθηκε για το συγκεκριμένο τετράποδο, προκειμένου να αντέχει τρεις φορές το βάρος του, δηλαδή γύρω στα 900N ήταν 37.8mm εξωτερικής διαμέτρου,. Στην δική μας περίπτωση, υποθέσαμε ότι το σώμα του μονόποδου ζυγίζει 1kg. Η ανάλυση όμως γίνεται προκειμένου να εξετάσουμε την συμπεριφορά που θα είχε το πόδι αυτό σε ένα τετράποδο ρομπότ, το οποίο προσεγγιστικά θεωρούμε ότι ζυγίζει το τετραπλάσιο βάρος, 4kg. Γενικά το βάρος αυτό μοιράζεται στα τέσσερα πόδια, αλλά στη μελέτη αντοχής του ανθρακονήματος θα πρέπει να θεωρήσουμε ότι όλο το βάρος «πέφτει» πάνω στο ένα πόδι, ώστε να συμπεριλάβουμε την πιο επικίνδυνη κατάσταση που το τετράποδο ρομπότ μπορεί να βρεθεί, όπως π.χ. όταν από ένα άλμα προσγειωθεί στο ένα πόδι και το οποίο θα λάβει όλο το βάρος επί τρεις φορές. Έτσι στον υπολογισμό του σωλήνα ανθρακονήματος θεωρούμε ρομπότ βάρους 40N και άρα τρεις φορές το βάρος του, 120N.



Σχήμα 5-8. Το φορτίο αναπτύσσεται πάνω στο δοκό προκαλώντας καμπτική καταπόνηση

Έστω ότι επιλέγουμε το ανθρακόνημα να είναι μήκους 15cm. Τότε η εσωτερική διάμετρος με βάση την απλή μελέτη δοκού σε οριζόντια θέση που καταπονείται σε κάμψη με βάρος 120N θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 15.8mm, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-9. Έτσι από τους τυποποιημένους σωλήνες που προσφέρονται [16], επιλέγουμε αρχικά εκείνο τον σωλήνα ανθρακονήματος με εξωτερική διάμετρο 20.8mm και εσωτερική διάμετρο 18mm. Ο αμέσως μικρότερης διαμέτρου σωλήνας έχει εσωτερική διάμετρο 14mm, οποίος για μήκος 15cm δεν ικανοποιεί το κριτήριο αντοχής.



Σχήμα 5-9. Μελέτη αντοχής του ανθρακονήματος με όριο διαρροής τα 120 MPa και μήκος 15cm, για διάφορα βάρη.

Η σχέση μάζας και μήκους συνδέσμου αν συμπεριλάβουμε και τις μισές μάζες από κάθε άρθρωση όπως περιγράφαμε προηγουμένως είναι:

$$m_1 = 0.14 l_1 + \frac{l_1}{0.32}\frac{0.14}{2} + \frac{l_1}{0.32}\frac{0.245}{2}$$
$$m_2 = 0.14 l_1 + \frac{l_2}{0.25}\frac{0.245}{2} \qquad (5\text{-}22)$$

Η Εξ. (5-22) προέκυψε ως εξής. Αρχικά από τον κατασκευαστή δίνεται ότι για το ανθρακόνημα με εσωτερική διάμετρο 18mm το βάρος ανά μήκος είναι 0.14kg/m. Εν συνεχεία, στο πόδι που απεικονίζεται στο Σχήμα 5-2, η μάζα στο ισχίο και στο γόνατο είναι 140gr και 245γρ, αντίστοιχα. Επίσης στο συγκεκριμένο πόδι τα μήκη των συνδέσμων είναι 25cm για τον πρώτο σύνδεσμο και 32cm για τον δεύτερο. Έτσι για την δική μας εφαρμογή θεωρούμε την μάζα των αρθρώσεων, ως την μάζα των αρθρώσεων του ποδιού στο Σχήμα 5-2, προς το μήκος των συνδέσμων του, πολλαπλασιασμένη επί το μήκος των συνδέσμων του ποδιού που εξετάζουμε, l_1 και l_2. Έτσι με βάση αυτά καταλήξαμε στα ακόλουθα συμπεράσματα.

5.4 Συμπεράσματα

Μετά από δοκιμές για τις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης που αναφέραμε, και χρησιμοποιώντας την λογική που παρουσιάζουμε παρακάτω και τα σταθερά βάρη που επιλέξαμε, βάρος σώματος και αρθρώσεων, το μέγιστο μήκος συνδέσμων, με τελικά 14mm εσωτερική διάμετρο ανθρακονήματος και βάρος ανά μήκος 0.1kg/m, που μπορεί να έχει το μονόποδο ρομπότ ώστε αυτοί οι κινητήρες να μπορούν να κρατήσουν και να σηκώσουν βάρος 1Kg είναι αντίστοιχα:

$$l_1 = 11cm$$
$$l_2 = 12cm \qquad (5\text{-}23)$$

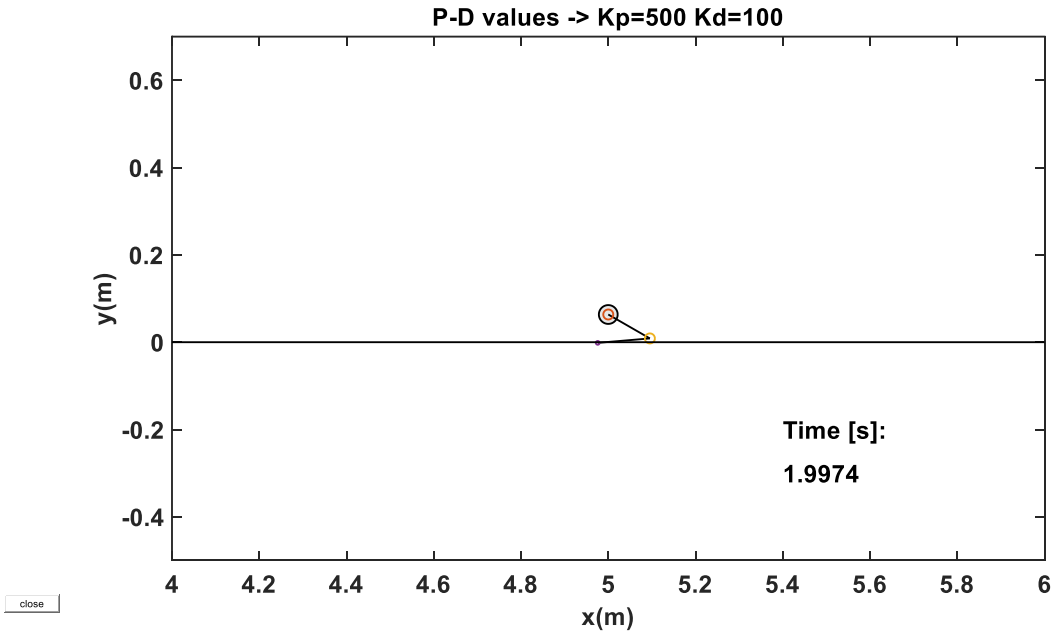
Αυτά τα δύο νούμερα προέκυψαν ως εξής. Αρχικά όπως είπαμε επιλέξαμε τυχαία ανθρακόνημα με εσωτερική διάμετρο 18mm και μήκος 15cm, ενώ βάρος ανά μήκος 0.14kg/m, [16]. Από την προσομοίωση είδαμε ότι έπρεπε να μειώσουμε το μήκος των συνδέσμων γιατί οι κινητήρες δεν μπορούσαν να κρατήσουν το βάρος του 1kg, και άρα για τα νέα μήκη δοκιμάζαμε εκ νέου την αντοχή τους για να βρούμε την μικρότερη δυνατή διάμετρο όπως στο Σχήμα 5-9. Ακολούθως από το [16] επιλέγαμε τον σωλήνα ανθρακονήματος (fiber tube) με βάση την νέα διάμετρο, και από εκεί την νέα σχέση βάρους ανά μήκος ανθρακονήματος. Ακολουθήσαμε αυτή την κυκλική διαδικασία μέχρις ότου οι κινητήρες μπορούσαν πλέον να ανταπεξέλθουν με βάση τις δυνατότητές τους και να υπερνικήσουν τις ροπές από τον μοχλοβραχίονα που δημιουργείται όταν το πόδι είναι διπλωμένο. Ουσιαστικά ακολουθήσαμε την ακόλουθη διαδικασία.

$$\frac{M}{L} \rightarrow L \xrightarrow{\text{αντοχή}\,\&[16]} r_2 \,\&\, r_1 \xrightarrow{[16]} \frac{M}{L} \tag{5-24}$$

Παρακάτω φαίνονται, τα αντίστοιχα διαγράμματα, βλ. Σχήμα 5-10 - Σχήμα 5-13, στα οποία βλέπουμε την εξέλιξη της ροπής με τον χρόνο και την απόκριση της θέσης των αρθρώσεων για τις δύο περιπτώσεις που εξετάσαμε.

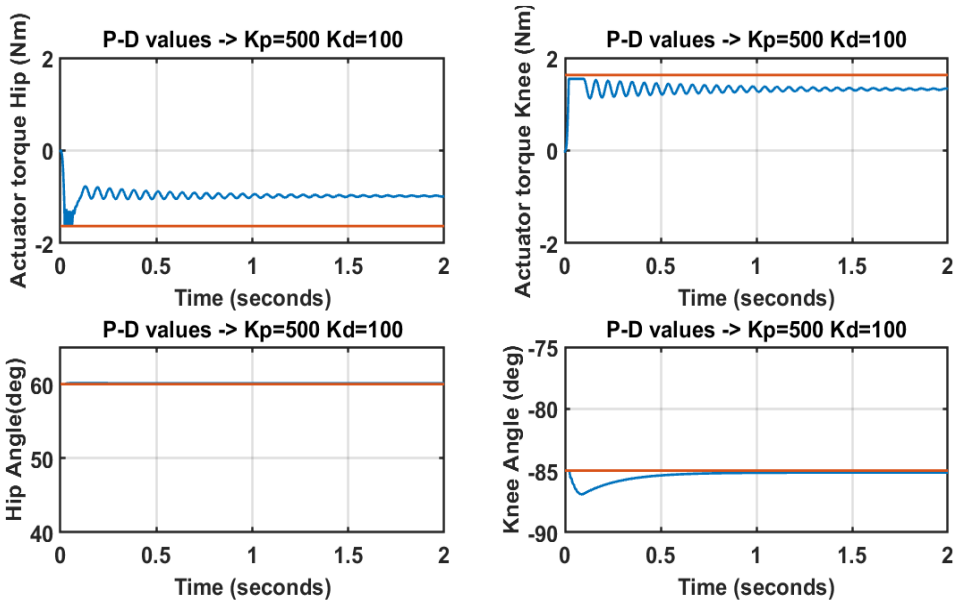
5.4.1 Περίπτωση 1η – Ακίνητο και Διπλωμένο

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση είχαμε ότι η αρχική θέση ταυτίζεται με την επιθυμητή θέση, βλ. Σχήμα 5-10. Τα μήκη θα μπορούσαν να έχουν βγει και μεγαλύτερα αλλά θα μπορούσε το πόδι να είναι ευσταθές μόνο για αυτή την περίπτωση που το ρομπότ βρίσκεται στην επιθυμητή θέση εξ' αρχής και δεν προσπαθεί να κάνει κάτι άλλο.



Σχήμα 5-10. Το πόδι ισορροπεί σε αυτή την θέση 60 μοίρες για το ισχίο και 85 για το γόνατο.

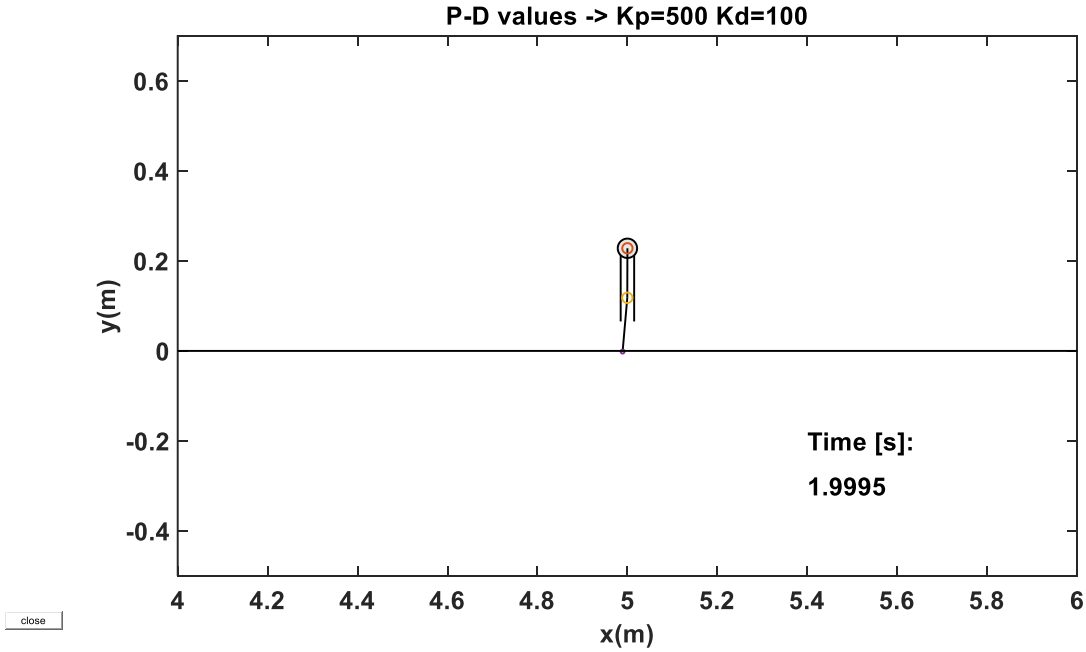
Οι ροπές στις αρθρώσεις και οι αποκρίσεις θέσης είναι οι ακόλουθες στο Σχήμα 5-11.



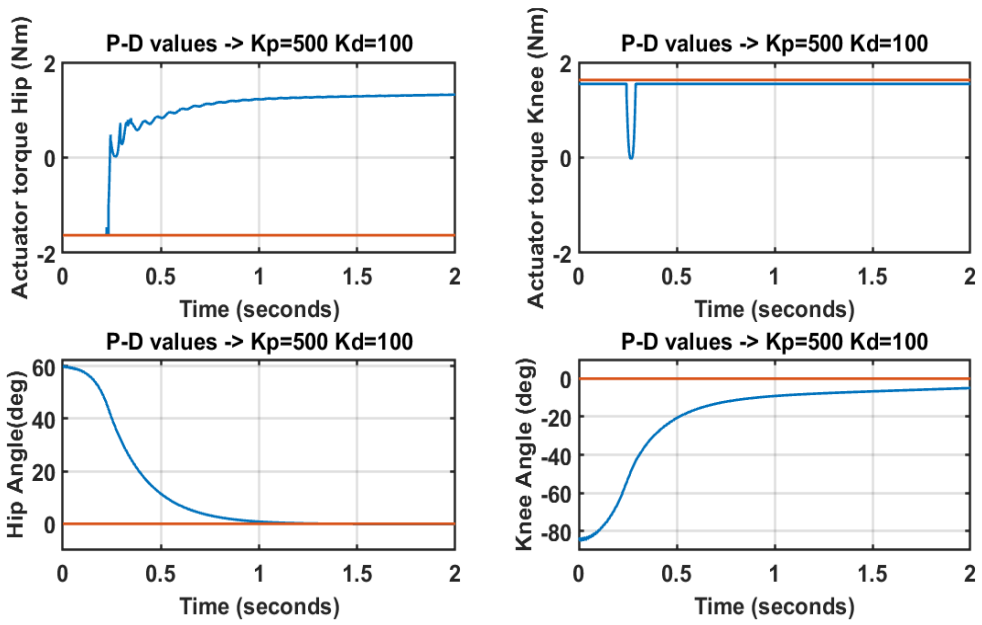
Σχήμα 5-11. Ανάπτυξη ροπών στις δύο αρθρώσεις.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα βλέπουμε ότι στο αρθρώσεις αναπτύσσονται δυνάμεις που αποσβέσουν, για την άρθρωση στο ισχίο γύρω στο 1Nm ενώ για την άρθρωση στο γόνατο γύρω στο 1.4Nm. Παρατηρούμε ότι η δεν είναι μέγιστες τιμές των ροπών στις αρθρώσεις καθώς θα πρέπει να υπάρχει επιπλέον ροπή και δυνατότητα από τους κινητήρες να υπερνικήσουν τις ροπές από τον μοχλοβραχίονα που δημιουργείται στην διπλωμένη θέση και να σηκώσουν το πόδι.

5.4.2 Περίπτωση 2η – Όρθια θέση από Διπλωμένο



Σχήμα 5-12. Το μονόποδο ρομπότ με αυτή τα κατασκευαστικά μεγέθη έχει την δυνατότητα να ανέβει και να σηκώσει το βάρος του 1Kg που ζυγίζει το σώμα.



Σχήμα 5-13. Ανάπτυξη ροπών στις δύο αρθρώσεις κατά την άνοδο του ποδιού από την χαμηλή στην υψηλή θέση.

Παρατηρούμε, στο Σχήμα 5-13, ότι προκειμένου το ρομπότ να ανέβει από την χαμηλή θέση στην υψηλή οι ροπές στις αρθρώσεις είναι μέγιστες και συγκεκριμένα στο ισχίο είναι στα -1.588Nm ενώ στο γόνατο είναι 1.492Nm. Επίσης στο γόνατο αφού ανέβει, το πόδι η απαίτηση ροπής αλλάζει κατεύθυνση. Τέλος οι ροπές στο τέλος παραμένουν υψηλές, λόγω του μόνιμου σφάλματος που έχουμε από τις βαρυτικές δυνάμεις και την τριβή. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόκριση της ροπής είναι ακαριαία μέγιστες, γιατί δεν έχουμε εισάγει την ηλεκτρική απόκριση του κινητήρα και γιατί έχουμε επιλέξει πολύ υψηλά κέρδη ελέγχου. Ο Πίνακας 5-5 παρουσιάζει το μέγιστο μήκος ποδιών, όπως προέκυψε από την ανάλυση, που μπορεί να έχει το μονόποδο ρομπότ για να σηκώνει βάρος 1kg και τα συναφή χαρακτηριστικά μεγέθη μάζας και αδράνειας.

Τέλος αν το ρομπότ θέλει να κάνει κάποιο άλμα τότε θα πρέπει οι διαστάσεις να μειωθούν κι άλλο επειδή αν δουλεύουν οι κινητήρες στο μέγιστο συνεχές ρεύμα δεν θα έχουμε άλλα θερμικά περιθώρια για να κάνει το πόδι ένα μεγαλύτερο άλμα.

Πίνακας 5-5. Κατασκευαστικές παράμετροι του ποδιού.

Κατασκευαστικά - παράμετροι	Τιμές
Μάζα Σώματος ($M_{σωμ.}$)	1 kg
Μάζα 1ου συνδέσμου (m_1)	0.0994 kg
Μάζα 2ου συνδέσμου (m_2)	0.0570 kg
Ροπή Αδράνεια 1ου συνδέσμου(I_1)	0.0005335 kgm^2
Ροπή Αδράνεια 2ου συνδέσμου (I_2)	0.0004067 kgm^2
Μήκος 1ου συνδέσμου (l_1)	0.11m
Μήκος 2ου συνδέσμου (l_2)	0.12m

Παρατηρούμε ότι από τα παραπάνω αποτελέσματα ότι η ροπή τελικά που δημιουργείται δεν δίνει μεγάλα περιθώρια για μεγάλα πόδια και ως εκ τούτου ίσως η χρήση κάποια μικρής μείωσης θα ήταν βοηθητική προκειμένου και να έχουμε μεγαλύτερες επιδόσεις ροπής και να μειώσουμε το ρεύμα που διαρρέει τους κινητήρες αλλά και να έχουμε κρατήσει τα θετικά οφέλη όπως την χαμηλή μηχανική εμπέδηση και την ακριβή ιδιοδεκτική αίσθηση της δύναμης που αναπτύσσεται.

6 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας ήταν αρχικά να δούμε μέσω προσομοίωσης κατά πόσο η απευθείας οδήγησης μέθοδος επενέργησης μπορεί να εφαρμοστεί σε ρομπότ με πόδια και αν τελικά η ροπή που παράγεται είναι αρκετή. Για τον σκοπό αυτό εστιάσαμε στους κινητήρες χωρίς ψήκτρες και συγκεκριμένα στους outrunners αφού σχεδιαστικά παράγουν την μέγιστη ροπή. Μελετήσαμε αυτούς θεωρητικά, ενώ ένα μεγάλο μέρος της εργασίας αναλώθηκε στην πειραματική εξακρίβωση των διαφορών παραμέτρων των κινητήρων αυτών όπως των ηλεκτρικών, των μηχανικών αλλά και των θερμικών. Τέλος θέλαμε να μελετήσουμε θεωρητικά και ποιοτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων μεθόδων επενέργησης των τετράποδων ρομπότ.

Έτσι λοιπόν μέσω των παραμέτρων που βρήκαμε από τις πειραματικές διαδικασίες που αναφέραμε στο Κεφάλαιο 4 και την προσομοίωση του Κεφαλαίου 5, παρά το γεγονός ότι η ροπή που παράγουν αυτοί οι κινητήρες είναι μεγαλύτερη από άλλους ίδιας ισχύος, με απευθείας οδήγηση το πόδι του ρομπότ, με βάρος σώματος 1 Kg, θα είναι σχετικά μικρό, το οποίο επαληθεύει και τον λόγο για τον οποίο το ρομπότ Minitaur του UPenn που είδαμε στο 1^{ο} Κεφάλαιο είναι σχετικά μικρό. Είδαμε ότι το μήκος του ενός συνδέσμου είναι 11 εκατοστά και του άλλου 12. Μπορούμε να έχουμε ένα καλύτερο μέτρο σύγκρισης αν σκεφτούμε ότι οι κινητήρες έχουν εξωτερική διάμετρο 8.6 εκατοστά. Βέβαια και οι δύο κινητήρες θα τοποθετηθούν στο ισχίο του ποδιού, ενώ το συνολικό μήκος του ποδιού όταν και οι δύο αρθρώσεις βρίσκονται στις μηδέν μοίρες είναι 23 εκατοστά πράγμα το οποίο συνεπάγεται ότι κατασκευαστικά δεν θα έχουμε κάποιο περιορισμό.

Επίσης είδαμε ότι προκειμένου να στηρίζεται αυτό το βάρος μέσω του ποδιού οι κινητήρες θα πρέπει να λειτουργούν κοντά στην μέγιστη συνεχή ροπή γεγονός οποίο δεν αφήνει πολλά θερμικά περιθώρια και διαφορετικές κινήσεις π.χ. για κάποιο άλμα από την στάσιμη θέση. Ως εκ τούτου χρειάζεται καλή θερμική διαχείριση του κινητήρα πράγμα το οποίο φυσικά διευκολύνεται μέσω του θερμικού μοντέλου του κινητήρα που εξάγαμε στο Κεφάλαιο 4.

Από όλα τα παραπάνω φυσικά καταλήγουμε ότι ίσως η χρήση μίας μικρής μείωσης μέσω πλανητικού συστήματος θα είχε πολλά οφέλη διατηρώντας τα θετικά χαρακτηριστικά της απευθείας οδήγησης, αφού θα έδινε την δυνατότητα κατασκευής ακόμα μεγαλύτερου ποδιού λόγω των μεγαλύτερων ροπών εξόδου καθώς επίσης και την δυνατότητα να μην καταπονείται ο κινητήρας θερμικά όσο καταπονείται στην απευθείας οδήγηση έχοντας μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση σε όλο το σύστημα.

Τέλος μέσω αυτής της εργασίας είδαμε ότι η χρήση διαφόρων μεθόδων για την εξακρίβωση των ηλεκτρικών, μηχανικών και θερμικών (ονομαστικό ρεύμα) παραμέτρων είναι αρκετά αξιόπιστες, αφού η χρήση διαφορετικών μεθόδων για την εξακρίβωση ίδιων παραμέτρων οδηγούσε στα ίδια ή σε πολύ κοντινά αποτελέσματα. Έτσι μέσω αυτών εξαγάγαμε το απαραίτητο μοντέλο για τους κινητήρες χωρίς ψήκτρες που χρησιμοποιήσαμε.

6.2 Μελλοντική Εργασία

Όσον αφορά τη μελλοντική εργασία, αρχικά θα μπορούσε η προσομοίωση να συνεχιστεί ώστε π.χ. το πόδι να κάνει επαναλαμβανόμενα άλματα και με βάση τα θερμικά όρια να εξετάσουμε αν μπορεί να είναι αυτό το μήκος του ποδιού ή θα πρέπει να μειωθεί. Η μελέτη που έγινε ήταν σε στατική θερμική καταπόνηση του κινητήρα και ως εκ τούτου αν θέλουμε να έχουμε ένα μονόποδο ρομπότ το οποίο κάνει συνεχή άλματα περιοδικά χωρίς να βρίσκεται σε στατική θέση, τότε αν η RMS τιμή του ρεύματος που απαιτείται για αυτή την κίνηση βρίσκεται μέσα στα θερμικά όρια, το πόδι ίσως δεν χρειαστεί να μειωθεί σε μήκος. Αν όμως το ρομπότ βρίσκεται αρχικά σε στάσιμη θέση και πρέπει να έχει τη δυνατότητα να κάνει ένα άλμα για να υπερπηδήσει ένα εμπόδιο, τότε θα πρέπει να εξετάσουμε αν έχει περιθώριο ώστε να μπορεί να τραβήξει το ρεύμα που απαιτείται για να κάνει αυτό το άλμα και αναλόγως να κρίνουμε για τα μήκη του ποδιού.

Επίσης θα μπορούσαμε να προχωρήσουμε στην υλοποίηση του ποδιού με βάση τα υλικά και τα μήκη που βρέθηκαν ώστε να εξετάσουμε στην πράξη τις δυνατότητες αυτών των κινητήρων εκμεταλλευόμενοι τα πειραματικά χαρακτηριστικά που βρέθηκαν και τα χαρακτηριστικά μέσω της προσομοίωσης. Επιπλέον θα μπορούσαμε να υλοποιήσουμε τις διάφορες μεθόδους επενέργησης που αναφέραμε στο Κεφάλαιο 2 όπως για παράδειγμα το SEA ή το GM ή και QDD προκειμένου να ερευνήσουμε πειραματικά τις δύο κυριότερες παραμέτρους για επιτυχή αποτελέσματα μεταβλητής ενδοτικότητας (virtual compliance) όπως το εύρος ζώνης και την ιδιοδεκτική αίσθηση της δύναμης και να επαληθεύσουμε τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αναφέραμε στο Κεφάλαιο 2 για αυτές τις μεθόδους. Επίσης αυτές τις μεθόδους θα μπορούσαμε να τις εξετάσουμε και πειραματικά πάνω στο υλοποιημένο μονόποδο ρομπότ και μέσω αυτού να δούμε χρήσιμα συμπεράσματα. Βέβαια, θα πρέπει αυτές οι μέθοδοι επενέργησης να προσφέρονται στη συναρμολόγηση και την αποσυναρμολόγηση.

Τελειώνοντας θα μπορούσαμε να εφαρμόσουμε αλγορίθμους για virtual leg compliance χωρίς όμως την χρήση αισθητήρα δύναμης, αλλά η εξακρίβωση της δύναμης να γίνεται μέσω των ιδιοδεκτικών χαρακτηριστικών των μεθόδων επενέργησης που έχουμε αναφέρει και να εξετάσουμε ποια τελικά από τις μεθόδους προσφέρει καλύτερη υλοποίηση των αλγορίθμων αφού τελικός σκοπός και λόγος που μελετώνται όλα είναι για την επίτευξη ενός επιτυχημένου αλγορίθμου που θα προσφέρει επιθυμητά αποτελέσματα μεταβαλλόμενης ενδοτικότητας.

Τέλος για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος θα μπορούσαμε να εξετάσουμε το ενδεχόμενο της αναγεννητικής πέδησης και να δούμε πόσο επί τις εκατό θα αυξηθεί η ενεργειακή απόδοση του μηχανισμού του ποδιού καθώς και να την συγκρίνουμε με την ενεργειακή απόδοση χρησιμοποιώντας παθητικά στοιχεία ελαστικότητας ή και με διατάξεις που χρησιμοποιούν τον συνδυασμό τους.

7 Βιβλιογραφία

[1] Allegro Microsystems - Hall-Effect IC Applications Guide.

[2] H. Asada and K. Youcef-Toumi, Direct-Drive Robots: Theory and Practice. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1987.

[3] T. Boaventura1, G. A. Medrano-Cerda, C. Semini, J. Buchli and D.G. Caldwell “Stability and Performance of the Compliance Controller of the Quadruped Robot HyQ”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS), Tokyo, Japan,* November 2013, pp. 1458-1464.

[4] Boston Dynamics [Online]. Available: bostondynamics.com

[5] Boston Dynamics, Atlas, The Next Generation. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=rVlhMGQgDkY

[6] Boston Dynamics Introducing SpotMini [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=tf7IEVTDjng

[7] W. Bosworth, S. Kim and N. Hogan, "The MIT super mini cheetah: A small, low-cost quadrupedal robot for dynamic locomotion," *2015 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, West Lafayette, IN, 2015, pp. 1-8.

[8] B. Brown and G. Zeglin, "The bow leg hopping robot," Proceedings. *1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Cat. No.98CH36146), Leuven, 1998, pp. 781-786 vol.1.

[9] Brushless motors - how they work and what the numbers mean

[10] Patrick L. Chapman, Timothy Skvarenina, “The Power Electronic Handbook – PART III: Permanent-Magnet Synchronous Machine Drives”, Industrial Electronics Series, 2002

[11] S. Claudio; B. Victor, B., Thiago, F., Marco, B., Jonas “Is Active Impedance the Key to a Breakthrough for Legged Robots?”, *Symposium of. Robotics Research (ISRR)*, 2013, pp 3-19

[12] Colton, S., Design and Prototyping Methods for Brushless Motors and Motor Control, Bachelor Thesis, MIT, Dept. of Mechanical Engineering, 2010

[13] Dallas., S., “A Method for Designing High Performance Two-Segment Legs for Running Quadruped Robots”, Diploma Thesis, NTUA, School of Mechanical Engineering, June 2017

[14] Direct-quadrature-zero transformation [Online]. Available: - https://en.wikipedia.org/wiki/Direct-quadrature-zero_transformation

[15] J. M. Duperret, G. D. Kenneally, J. L. Pusey, and D. E. Koditschek. "Towards a Comparative Measure of Legged Agility," *Experimental Robotics: The 14th International Symposium on Experimental Robotics*, 2016, pp. 3 – 16.

[16] Easy components., [Online]. Available: http://www.easycomposites.co.uk/#!/cured-carbon-fibre-products/carbon-fibre-tube/roll-wrapped-carbon-fibre-tube

[17] S. D. Eppinger and W. P. Seering, “Three dynamic problems in robot force control”, *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 8, pp. 751-758,Dec.1992.

[18] ESC electronic speed controller with Arduino ALL EXPLAINED, [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=8LXPcJD6hEA

[19] Flir - IR Thermography - How It Works | Techni-Tool

[20] S. Ford, D. Rollinson, A. Willig, and H. Choset. "Online Calibration of a Compact Series Elastic Actuator." *IEEE ACC*, Portland, OR, 2014, pp. 3329-3334.

[21] K. Galloway, G. Haynes, B. Ilhan, A. Johnson, R. Knopf, G. Lynch, B. Plotnick, M. White, and D. Koditschek. "X-RHex: A Highly Mobile Hexapedal Robot for Sensorimotor Tasks," Technical Report, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, 2010.

[22] K. Galloway. "Passive Variable Compliance for Dynamic Legged Robots." Doctoral Thesis, University of Pennsylvania, Dept. of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, 2010.

[23] "Google owned Schaft unveils new bipedal robot." [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=iyZE0psQsX0

[24] J. Grimes. "ATRIAS 1.0 & 2.0 - Enabling Agile Biped Locomotion with a Template-Driven Approach to Robot Design." Master's Thesis, School of Mechanical, Industrial and Manufacturing Engineering, Oregon State University, 2013

[25] Dr. Hanselman, D., "Brushless Permanent Magnet Motor Design", University of Maine, Magna Physics Publishing, 2nd Edition, 2006

[26] G. C. Haynes, J. Pusey, R. Knopf, A. M. Johnson, and D. E. Koditschek, Laboratory on legs: an architecture for adjustable morphology with legged robots, in Unmanned Systems Technology XIV. R. E. Karlsen, D. W. Gage, C. M. Shoemaker, and G. R. Gerhart, Eds., vol. 8387. SPIE, 2012, p. 83870W.

[27] N. Hogan, "Impedance control: An approach to manipulation: Part II – Implementation," ASME, Transactions, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 107*, 1985, pp. 8–16.

[28] H. Horn, D. Wood, K Korane. "Planetary gears A review of basic design criteria and new options for sizing." [Online]. Available: http://machinedesign.com/mechanical-drives/planetarygears-review-basic-design-criteria-and-new-options-sizing

[29] How to flash SimonK and enable comp_pwm, [Online]. Available: http://dronehitech.com/en/how-to-flash-simonk-enable-comp_pwm/

[30] C. Hubicki, J. Grimes, M. Jones, D. Renjewski, A. Sprowitz, A. Abate, And J. Hurst. "ATRIAS: Design and Validation of a Tether-free 3D-capable Spring-Mass Bipedal Robot." *The International Journal of Robotics Research.* June 10, 2016, pp. 1497 - 1521.

[31] Hughes, A. and Drury, B., "Electric Motors and Drives – Fundamentals, Types, and Applications," Elsevier, 4th Edition, 2013

[32] J. Hurst. "The Role and Implementation of Compliance in Legged Locomotion." Doctoral Thesis, Carnegie Mellon, Robotics Institute, 2008..

[33] M. Hutter. "StarlETH & Co. Design and Control of Legged Robots with Compliant Actuation." Doctoral Thesis, ETH, Dept. of Mechanical Engineering, 2013.

[34] Kalouche, S., "Design for 3D Agility and Virtual Compliance using Proprioceptive Force Control in Dynamic Legged Robots," Master Thesis, Robotics Institute, School of Computer Science, August 2016

[35] G. Kenneally, A. De and D. E. Koditschek, "Design Principles for a Family of Direct-Drive Legged Robots," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 900-907, July 2016.

[36] S. Latscha *et al*., "Design of a Hybrid Exploration Robot for Air and Land Deployment (H.E.R.A.L.D) for urban search and rescue applications," *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, IL, 2014, pp. 1868-1873.

[37] M. T. Mason, “Compliance and force control for computer - controlled manipulators,” Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, vol. 11, no. 6, pp. 418 –432, june 1981.

[38] T. H. Massie and J. K. Salisbury, “The PHANTOM haptic interface: A device for probing virtual objects,” in Proc. ASME Dyn. Syst. Control Division, vol. 55, no. 1, 1994, pp. 295–300.

[39] Maxon, “Avago Encoder HEDL 5540”.

[40] Maxon, “Maxon DC motor and Maxon EC motor Key information”

[41] Maxon, “Multi-pole EC motor: commutation - Maxon Motor”

[42] Maxon [Online]. Available: https://www.maxonmotor.com/Katalog_neu/eshop/Downloads/CMS_Downloads/maxon_academy/E_Learning/Thermal_Calculations/Start_Thermal_Calculations.htm

[43] J. McKenzie, "Design of Robotic Quadruped Legs," Master’s Thesis, MIT, Dept. of Mechanical Engineering, 2012.

[44] Microsemi, “Field Oriented Control of Permanent Magnet Synchronous Motors User’s Guide”

[45] J., L., Kirtley, Jr., “Permanent Magnet “Brushless DC” Motors”, MIT course,

[46] NXP semiconductors, “3-Phase BLDC Sensorless Control with MQX RTOS Using the K60N512”

[47] NXP semiconductors, “BLDC Motor Control with Hal Sensors Based on FRDM-KE02Z, AN47706”

[48] NXP semiconductors, “PMSM Electrical Parameters measurement”

[49] NXP semiconductors, “Space Vector Modulation”, https://community.nxp.com/thread/466420

[50] Dal Y. Ohm, “Dynamic Model of PM Synchronous Motors”, Drivetech, Inc., Blacksburg, Virginia, www.drivetechinc.com

[51] Open Source Prosthetic Leg, with Elliott Rouse, [Online]. Available: http://robohub.org/open-source-prosthetic-leg/?utm_source=feedburner&utm_medium=email&utm_campaign=Feed%3A+robotspodcast+%28Robots+-+The+Podcast+for+News+and+Views+on+Robotics%29

[52] Shimizu Ohta, “Temperature Classes of Electrical Insulators”, Three Bond Technical New, December 1, 1985

[53] Παπαδόπουλος, Ε., “Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας”, Εκδόσεις Φούντας, 2010.

[54] Ε., Παυλόπουλος,. “Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης της μεθόδου της θερμογραφίας”, Πτυχιακή Εργασία, Α.Ε.Ι Πειραιά ΤΤ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2016

[55] M. Piccoli, S. Revzen and M. Yim, "SEAL Pack versatile, portable, and rapidly deployable SEa, air, and land vehicle," *2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, Linkoping, 2013, pp. 1-6.

[56] Polydorou P. and Control System Lab – Legged Robots, “Direct Drive Actuation,” [Online]. Available: https://bitbucket.org/account/user/csl_legged/projects/DDA

[57] G. A. Pratt and M. M. Williamson, "Series elastic actuators," *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, Pittsburgh, PA, 1995, pp. 399-406 vol.1

[58] J. Pratt, C. Chew, A. Torres, P. Dilworth, and G. Pratt, “Virtual model control: An intuitive approach for bipedal locomotion,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 20, no. 2, pp. 129– 143, 2001.

[59] PWM, OneShot125, OneShot42 and Multishot comparison https://quadmeup.com/pwm-oneshot125-oneshot42-and-multishot-comparison/

[60] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, and R. Playter, Bigdog, “the rough- terrain quadruped robot,” *Proceedings of the 17th International Federation of Automation Control (IFAC)*. April 2008.

[61] M. Raibert, “Legged robots that balance.”, Series Artificial Intelligence, MIT Press Cambridge, MA, 1986.

[62] M. Raibert, "Trotting, pacing and bounding by a quadruped robot," *Journal of Biomechanics*, vol. 23, no. 1, 1990, pp. 79-81.

[63] Roboteq, “Field Oriented Control (FOC) Made Ultra Simple”, [Online]. Available: https://www.roboteq.com/index.php/applications/100-how-to/359-field-oriented-control-foc-made-ultra-simple

[64] D. Rollinson. "Control and Design of Snake Robots." Doctoral Thesis, Carnegie Mellon, School of Computer Science, University, 2014.

[65] Sand Flea Jumping Robot. Boston Dynamics. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=6b4ZZQkcNEo

[66] A. Schepelmann, M. Taylor, H. Geyer. "Development of a Testbed for Robotic Neuromuscular Controllers," *Robotics Systems and Science*, MIT Press, 2012.

[67] M. Schmidt and M. Fischer, " Morphological integration in mammalian limb proportions: Dissociation between function and development.," *Evolution,* vol. 63, no. 3, 2009, pp. 749-766

[68] C. Semini. "HyQ - Design and Development of a Hydraulically Actuated Quadruped Robot." Doctoral Thesis, Italian Institute of Technology and University of Genoa, Dept. of Advanced Robotics, April 2010.

[69] S. Seok, A. Wang, D. Otten, and S. Kim, “Actuator design for high force proprioceptive control in fast legged locomotion,” *in Proc. IEEE Int.Conf. Intell. Robots Syst*., 2012 pp. 1970–1975.

[70] S. Seok *et al*., "Design Principles for Energy-Efficient Legged Locomotion and Implementation on the MIT Cheetah Robot," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 3, pp. 1117-1129, June 2015.

[71] S. Stipetic, M. Kovačić, Z. Hanic and M. Vražić, "Measurement of Excitation Winding Temperature on Synchronous Generator in Rotation Using Infrared Thermography," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 5, pp. 2288-2298, May 2012

[72] Structure of the IPM (interior permanent magnet) motor: http://www.hamaco-ind.com/motor_technology/index.html

[73] T – motor U8: [Online]. Available: http://store-en.tmotor.com/goods.php?id=323

[74] T – motor AIR 40: [Online]. Available: http://store-en.tmotor.com/goods.php?id=368

[75] T. Tanaka, S. Hirose. "Development of Leg-Wheel Hybrid Quadruped "AirHopper" Design of Powerful Light-weight Leg with Wheel." 2008 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008, Nice, France, pp. 3890-3895.

[76] Texas Instruments, “AM26LS32Ax, AM26LS33Ax Quadruple Differential Line Receivers.”

[77] Texas Instruments, “DRV8301 – 69M”, http://www.ti.com/tool/DRV8301-69M-KIT

[78] Texas Instruments, “InstaSPIN-FOC and InstaSPIN-MOTION – User’s Guide”

[79] Texas Instruments, “Sensorless Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors”

[80] Texas Instruments, “Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors.”

[81] W. Townsend, "The Effect of Transmission Design on Force-Controlled Manipulator Performance." Doctoral Thesis, MIT, Dept. of Mechanical Engineering, April 1988.

[82] I., Todić, M., Miloš, M., Pavišić, “Position and Speed Control of Electromechanical Actuator for Aerospace Applications,” *Tehnicki Vjesnik*, October 2013, pp 853 – 860.

[83] Tomasello, G., “Advanced BLDC Motor Drive and Control”, Presentation, Technology Tour 2017

[84] A. Tsiokanosa, E. Kellisb, A. Jamurtasa, and S. Kellisc, “Passive bipedal running, The relationship between jumping performance and isokinetic strength of hip and knee extensors and ankle plantar exors”, vol. 10, pp. 107115, 2002.

[85] J. Urata, Y. Nakanishi, K. Okada, and M. Inaba, “Design of high torque and high-speed leg module for high power humanoid”, in Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2010, pp. 4497 4502.

[86] J. Urata, T. Hirose, Y. Namiki, Y. Nakanishi, I. Mizuuchi and M. Inaba, "Thermal control of electrical motors for high-power humanoid robots," *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, 2008, pp. 2047-2052.

[87] P. M. Wensing, A. Wang, S. Seok, D. Otten, J. Lang and S. Kim, "Proprioceptive Actuator Design in the MIT Cheetah: Impact Mitigation and High-Bandwidth Physical Interaction for Dynamic Legged Robots," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 3, pp. 509-522, June 2017.

[88] D. Whitney, "Historical perspective and state of the art in robot force control," *Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1985, pp. 262-268.

[89] J. P. Whitney, Tianyao Chen, J. Mars and J. K. Hodgins, "A hybrid hydrostatic transmission and human-safe haptic telepresence robot," *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, 2016, pp. 690-695.

[90] B. H. Wilcox, "ATHLETE: A cargo-handling vehicle for solar system exploration," *2011 Aerospace Conference*, Big Sky, MT, 2011, pp. 1-8.

[91] M. A. Woodward and M. Sitti, "Design of a miniature integrated multi-modal jumping and gliding robot," *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, 2011, pp. 556-561.

[92] G. Wyeth. "Control Issues for Velocity Sourced Series Elastic Actuators." Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation 2006.

[93] G. Zeglin. "The Bow Legged Hopping Robot" Doctoral Thesis, Carnegie Mellon University, Robotic Institute,1999.

8 Παράρτημα

8.1 Θεωρία

8.1.1 Μετατροπή Clark & Park

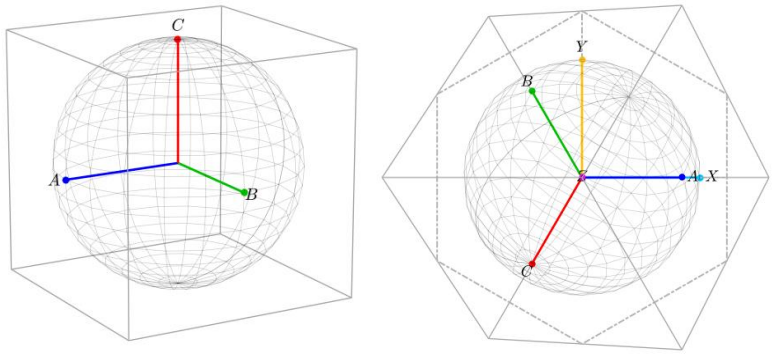
Επειδή τα μεγέθη μεταβάλλονται με τον χρόνο και μελετώνται σαν φασιδείκτες που περιστρέφονται, βλ. Κεφάλαιο 3, είναι σύνηθες στην μελέτη των τριφασικών συστημάτων, τα μεγέθη αυτά να μελετώνται σε περιστρεφόμενα συστήματα συνταγμένων και να αντιμετωπίζονται ως σταθερά μεγέθη. Η ανάλυση αυτή βασίζεται στην μετατροπή του Clark και την μετατροπή Park. Οι αναλύσεις αυτές βασίζονται στο γεγονός πως τα ρεύματα σε ένα τριφασικό σύστημα βρίσκονται σε ισορροπία, δηλαδή πως λόγω το νόμου του Kirchhoff ισχύει:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \tag{8-1}$$

όπου i_a, i_b, i_c, είναι τα ρεύματα των τριών φάσεων a, b, c ενός κινητήρα χωρίς ψήκτρες.

Γενικά στην ηλεκτρολογία, τα στοιχεία ενός τριφασικού συστήματος αναλύονται πάνω σε ένα δισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων, [14]. Όμως αν τα στοιχεία του τριφασικού συστήματος μεταβάλλονταν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και δεν ίσχυε η Εξ. (8-1), τότε θα ήταν από ορισμό ορθογώνια μεταξύ τους και θα δομούσαν ένα τρισδιάστατο σύστημα, [14]. Λόγω όμως της Εξ. (8-1), τα τρία ρεύματα δεν είναι ανεξάρτητα και ως εκ τούτου η ανάλυση γίνεται σε δισδιάστατο σύστημα πάνω σε επίπεδο που ορίζεται από αυτή την εξίσωση. Το δισδιάστατο σύστημα είναι ουσιαστικά η προβολή του τρισδιάστατου συστήματος, με μοναδιαία διανύσματα τα τρία ρεύματα, σε αυτό το επίπεδο, βλ. Σχήμα 8-1α και Σχήμα 8-2. Το διάνυσμα I_s που ορίζεται από την Εξ. (8-2) και που έχει σαν συνιστώσες κάθε ένα από τα ρεύματα των φάσεων, θα βρίσκεται πάντα πάνω σε αυτό το επίπεδο λόγω ότι τα επιμέρους ρεύματα συνδέονται με την Εξ. (8-1), βλ. Σχήμα 8-2.

$$I_s = i_a \hat{i}_a + i_b \hat{i}_b + i_c \hat{i}_c \tag{8-2}$$

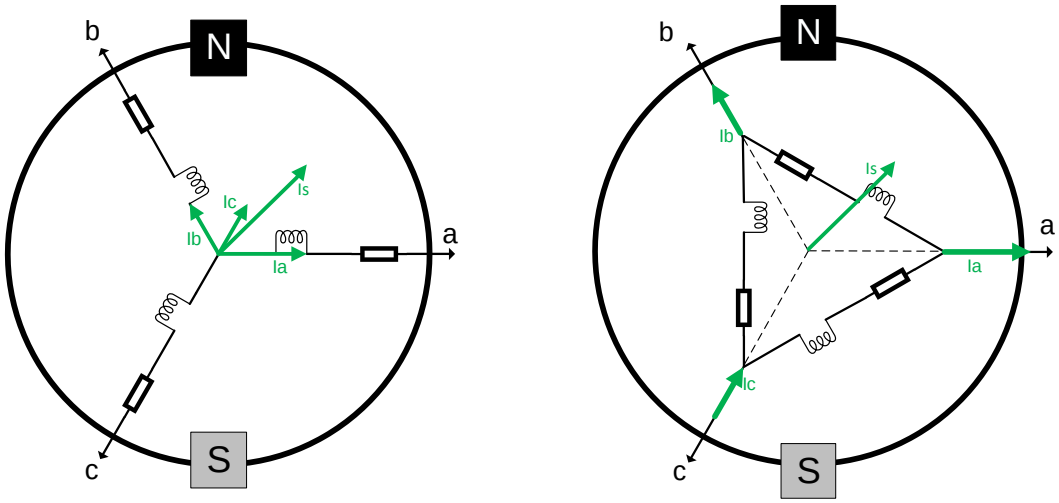


(α) (β)

Σχήμα 8-1. (α) Τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων. (β) Προβολή στο επίπεδο του συστήματος συντεταγμένων μετά τον μετασχηματισμό Clark & Park, [14].

Στο Σχήμα 8-2, βλέπουμε την προβολή του τρισδιάστατου συστήματος συντεταγμένων στο επίπεδο που ορίζεται από την Εξ. (8-1) και το οποίο θεωρούμε ως επίπεδο του στάτη του κινητήρα. Επίσης

βλέπουμε και τα αντίστοιχα ρεύματα αλλά και τους τρεις άξονες (α,b,c) όπως φαίνονται και στο Σχήμα 8-1β.



(α) **(β)**

Σχήμα 8-2. Κινητήρας σύγχρονος με δύο μόνιμους μαγνήτες, δηλαδή η πιο απλή περίπτωση κινητήρα και το σταθερό τρισδιάστατο σύστημα αξόνων όπου προβάλλεται στο επίπεδο και κάθε άξονας αντιστοιχεί σε κάθε ακροδέκτη του τριφασικού συστήματος. (α) Κινητήρας με σύνδεση αστέρα. (β) Κινητήρας με σύνδεση τριγώνου.

Στο Σχήμα 8-2, παρατηρούμε ότι κάθε φάση διαρρέεται από το δικό της ρεύμα και έχουμε σχεδιάσει την περίπτωση όπου το ρεύμα I_a είναι μέγιστο και θετικό ενώ τα ρεύματα I_b και I_c είναι μικρότερα και τέτοια ώστε να ικανοποιείται η Εξ. (8-1). Σημειώνουμε ότι προβάλλονται και οι δύο περιπτώσεις σύνδεσης των πηνίων στο στάτη (α-αστέρα και β-τριγώνου) αφού η ανάλυση που ακολουθεί ισχύει και για τα δύο περιπτώσεις.

Κύριος στόχος της μετατροπής Clark είναι να περιστρέψει το σύστημα «abc», βλ. Σχήμα 8-1, ή Σχήμα 8-2, έτσι ώστε στο νέο σύστημα συντεταγμένων «αβο», οι άξονες α και β να είναι ορθογώνιοι και να κείνται στο επίπεδο που περιγράφεται από την Εξ. (8-1) και ο άξονας «ο» να είναι κάθετος σε αυτό, βλ. [14] και Σχήμα 8-3. Επειδή όμως, το συνισταμένο διάνυσμα του ρεύματος I_s από την Εξ. (8-2), ανήκει πάνω σε αυτό το επίπεδο, θα έχει πλέον δύο συνιστώσες στο σύστημα «αβο» αντί για τρεις όπως έχει στο σύστημα «abc», γεγονός που κάνει ήδη την ανάλυση πιο απλή.

Ο πίνακας του μετασχηματισμού Clark είναι ο ακόλουθος:

$$T_{CLARKE} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{8-3}$$

Εφαρμόζοντας τον πίνακα αυτό στο σύστημα «abc» προκύπτει τελικά για τα ρεύματα ότι:

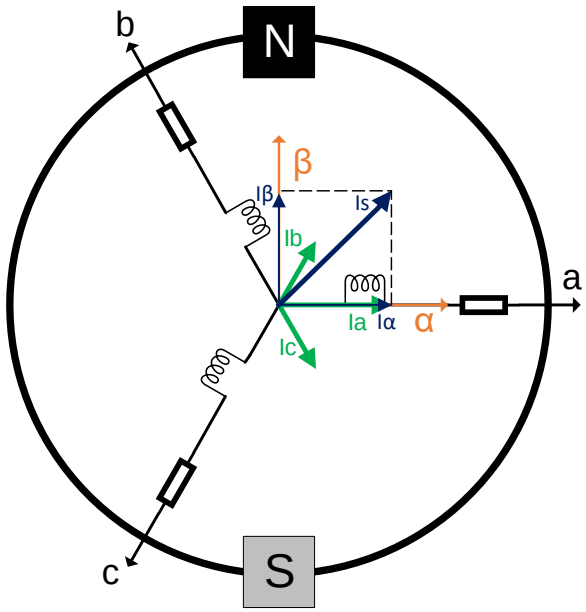
$$\begin{Bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{Bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{Bmatrix} \tag{8-4}$$

όπου i_α, i_β, i_o είναι τα ρεύματα στους άξονες αβο. Η Εξ. (8-4) αποτελεί εξίσωση μετασχηματισμού συστήματος συντεταγμένων. Για την σχέση των συνιστωσών ρευμάτων στο σύστημα «αβο» με τις συνιστώσες των ρευμάτων στο «abc», λαμβάνοντας υπόψιν και το γεγονός πως τα τρία μεγέθη δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, βλ. Εξ. (8-1), ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} i_\alpha &= i_a \\ i_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + 2i_b) \end{aligned} \tag{8-5}$$

Δηλαδή i_o=0, και άρα σε αντιστοιχία με την Εξ. (3-26) ισχύει πως:

$$\begin{aligned} i_\alpha &= I\sin(\omega t) \\ i_\beta &= I\sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \tag{8-6}$$



Σχήμα 8-3. Κάτοψη πάνω στο επίπεδο αβ που προκύπτει με την μετατροπή Clark. Το ίδιο διάνυσμα αναλύεται στα σε δύο επιμέρους συνιστώσες πλέον που είναι μεγαλύτερες σε μέγεθος από τις επιμέρους συνιστώσες του τρισδιάστατου σταθερού συστήματος συντεταγμένων «abc.

Στο νέο σύστημα οι δύο συνιστώσες μεταβάλλονται πάλι με τον χρόνο και έχουν διαφορά φάσης πλέον 90 ηλεκτρικές μοίρες. Άρα το συνιστάμενο ρεύμα I_s, που πλέον έχει συνιστώσες τα ρεύματα i_α και i_β, είναι σταθερού μεγέθους όπως είναι προφανές και περιστρέφεται, διαγράφοντας κύκλο. Η ταχύτητα περιστροφής είναι η συχνότητα μεταβολής των ρευμάτων i_α και i_β, και είναι ουσιαστικά η συχνότητα με την οποία τροφοδοτείται ο κινητήρας ή αλλιώς η συχνότητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου. Τελικός σκοπός μας όμως, είναι να μελετήσουμε τα μεγέθη και τις συνιστώσες του ρεύματος σαν σταθερά μεγέθη. Για τον σκοπό αυτό θα θέλαμε ένα σύστημα συντεταγμένων όπως το προηγούμενο, που είναι δηλαδή ορθογώνιο πάνω στο επίπεδο όπου κείνται το συνιστάμενο ρεύμα I_s αλλά να περιστρέφεται με την γωνιακή ταχύτητα που περιστρέφεται και το διάνυσμα. Έτσι ως προς αυτό το σύστημα, το συνισταμένο διάνυσμα και οι συνιστώσες του θα είναι σταθερά.

Αυτό προκύπτει αν ορίσουμε το σύστημα συντεταγμένων «dqo» το οποίο περιστρέφεται με ταχύτητα ίση με την ηλεκτρική ταχύτητα περιστροφής του διανύσματος του ρεύματος. Ως εκ τούτου αυτό το σύστημα μπορεί να αρχίζει από οποιοδήποτε σημείο του δρομέα αλλά για λόγους ευκολίας, που θα δούμε παρακάτω, επιλέγουμε να έχουμε τον έναν άξονα (**direct axis**) στην διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τους μόνιμους μαγνήτες και τον άλλο άξονα (**quadrature axis**) κάθετο στον direct axis και στραμμένο κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες, βλ. Σχήμα 8-4. Αν ο αριθμός των πόλων του κινητήρα είναι μεγαλύτερος από δύο και είναι πχ τέσσερις τότε η γωνία που είναι στραμμένος ο quadrature axis από τον direct axis είναι 45 μηχανικές μοίρες και 90 ηλεκτρικές. Για τον μετασχηματισμό χρησιμοποιούμε τον πίνακα μετασχηματισμού του Park που είναι ουσιαστικά η μετασχηματισμός συστήματος συντεταγμένων για περιστροφή ως προς έναν άξονα κατά γωνία θ και είναι αυτός που φαίνεται παρακάτω.

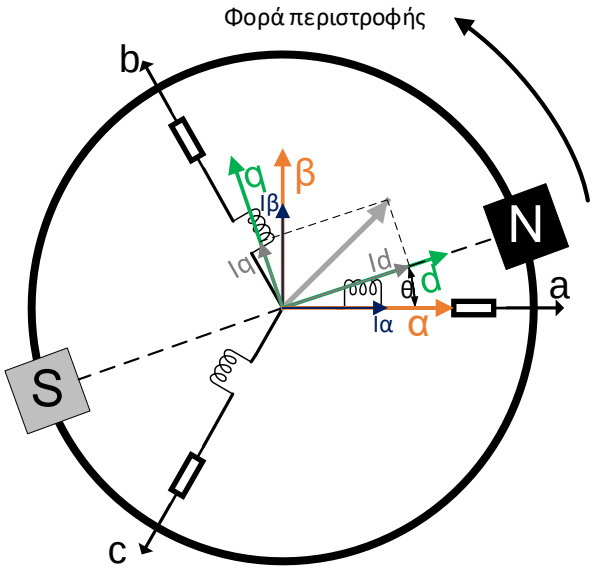
$$T_{PARK} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8-7}$$

άρα ο συνολικός πίνακας μετατροπής από το σύστημα «abc» στο σύστημα «dqo» είναι:

$$T_{CP} = T_{PARK} T_{CLARK} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{8-8}$$

Στο Σχήμα 8-4, φαίνεται χαρακτηριστικά η μεταφορά από το σταθερό σύστημα συντεταγμένων «αβ» στο κινούμενο σύστημα «dq» που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ίση με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα. Επίσης από την μετατροπή Park, ισχύει η Εξ. (8-9) που συνδέει τα ρεύματα στο σύστημα «dq» με τα ρεύματα στο σύστημα «αβ».

$$\begin{aligned} I_d &= i_a \cos(\theta_{el}) - i_\beta \sin(\theta_{el}) \\ I_q &= i_a \sin(\theta_{el}) + i_\beta \cos(\theta_{el}) \end{aligned} \tag{8-9}$$



Σχήμα 8-4. Προβολή πάνω στο επίπεδο «αβ» που προκύπτει από τον μετασχηματισμό Clark αλλά και το σύστημα συντεταγμένων «dq» που προκύπτει από τον μετασχηματισμό Park. Παρατηρούμε ότι ο direct άξονας είναι στην διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου – διεύθυνση των μαγνητών και ο quadrature (κάθετος) άξονας είναι στραμμένος κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες. Επειδή ο κινητήρας είναι διπολικός οι μηχανικές με τις ηλεκτρικές μοίρες ταυτίζονται.

8.1.2 Μοντελοποίηση κινητήρα χωρίς ψήκτρες για ημιτονοειδή τροφοδοσία

Επίσης, όπως ισχύει και για τα ρεύματα έτσι και για την πεπλεγμένη ροή **από τους μόνιμους μαγνήτες** σε κάθε φάση του κινητήρα, ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} \lambda_{ma} &= \lambda_m \cos(\omega_{el} t) \\ \lambda_{mb} &= \lambda_m \cos(\omega_{el} t + \frac{2\pi}{3}) \\ \lambda_{mc} &= \lambda_m \cos(\omega_{el} t + \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \tag{8-10}$$

Καθώς περιστρέφεται ο δρομέας, διέρχεται είτε βόρειος είτε νότιος μαγνητικός πόλος απέναντι από την κάθε φάση και η πεπλεγμένη ροή μεταβάλλεται. Στην προκειμένη περίπτωση θεωρούμε ότι μεταβάλλεται ημιτονοειδώς, αφού μελετάμε τους PMSM κινητήρες που αναπτύσσουν ημιτονοειδή ΑΗΕΔ και η οποία είναι παράγωγος της πεπλεγμένης ροής από τους μόνιμους μαγνήτες. Γενικά όμως για την πεπλεγμένη ροή που διαρρέει κάθε φάση, πρέπει να λάβουμε υπόψιν εκτός από και την πεπλεγμένη ροή των μόνιμων μαγνητών, την πεπλεγμένη ροή που δημιουργεί το ρεύμα των ίδιων των πηνίων για το φαινόμενο της αυτεπαγωγής αλλά και την πεπλεγμένη ροή που δημιουργείται από τα γειτονικά πηνία λόγω της αλληλεπαγωγής. Έτσι έχουμε ότι για την πεπλεγμένη ροή κάθε φάσης ότι ισχύει, [50]:

$$\begin{Bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ab} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \lambda_{ma} \\ \lambda_{mb} \\ \lambda_{mc} \end{Bmatrix} \tag{8-11}$$

Όπου τα μεγέθη L_{ab}, L_{ac}, L_{bc} είναι οι συντελεστές αλληλεπαγωγής του συστήματος και θεωρούμε ότι είναι ίδια από την μία φάση στην άλλη, δηλαδή ισχύει πως ο πίνακας στην Εξ. (8-11) είναι συμμετρικός. Εν γένει οι συντελεστές αυτοί μεταβάλλονται με την θέση του δρομέα αλλά για τους κινητήρες με λείους πόλους (non- salient), δηλαδή τους κινητήρες που έχουν τους μαγνήτες στην επιφάνεια του δρομέα, θεωρούμε πως δεν μεταβάλλονται και ως εκ τούτου δεν δημιουργούν παρασιτικά στοιχεία ροπής όπως περιγράφεται στην Εξ. (3-23). Μία πιο συνοπτική μορφή της παραπάνω εξίσωσης είναι η Εξ. (8-12) όπου έχει γραφτεί σε μορφή διανυσμάτων και πινάκων:

$$\boldsymbol{\lambda}_{\mathbf{ph}} = \mathbf{L}_{\mathbf{ph}}\mathbf{I}_{\mathbf{ph}} + \boldsymbol{\lambda}_{\mathbf{m}} \tag{8-12}$$

Αν επιβάλλουμε τον μετασχηματισμό των Clark και Park για την πεπλεγμένη ροή θα έχουμε πως οι εξισώσεις στο σύστημα συντεταγμένων d-q που περιγράψαμε παραπάνω θα είναι.

$$\boldsymbol{\lambda}_{\mathbf{dq}} = \mathbf{L}_{\mathbf{dq}}\mathbf{I}_{\mathbf{dq}} + \boldsymbol{\lambda}_{\mathbf{R}} \tag{8-13}$$

στην οποία ισχύει ότι:

$$\mathbf{L}_{\mathbf{dq}} = \mathbf{T}_{\mathbf{CP}}\mathbf{L}_{\mathbf{ph}}\mathbf{T}_{\mathbf{CP}}^{-1} \tag{8-14}$$

Επειδή έχουμε επιλέξει όπως αναφέραμε προηγουμένως, ο direct άξονας του συστήματος συντεταγμένων να είναι στην διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, ώστε η ανάλυση να γίνει πιο εύκολη και απλή. Ισχύει, για το σύστημα «dqo», η Εξ. (8-15) για την μαγνητική ροή που προέρχεται από τους μόνιμους μαγνήτες:

$$\lambda_R = \begin{bmatrix} \lambda_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{8-15}$$

Η επιλογή του περιστρεφόμενου συστήματος συντεταγμένων έγινε με σκοπό την απλοποίηση της ανάλυσης. Στην Εξ. (8-15) πλέον το στοιχείο λ_f είναι σταθερό στο σύστημα αυτό και εκφράζει την μαγνητική ροή που προέρχεται μόνο από τους μαγνήτες και προκύπτει από την λύση του μαγνητικού κυκλώματος, βλ. Σχήμα 3-13. Τέλος για τον πίνακα L_{dq} έχουμε πως:

$$L_{dq} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_o \end{bmatrix} \tag{8-16}$$

Στα στοιχεία του πίνακα στην Εξ. (8-16) σε αντίθεση με τον πίνακα της Εξ. (8-11), θεωρούμε πως δεν υπάρχουν στοιχεία αλληλεπαγωγής, επειδή οι δύο άξονες d και q είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους ως ορθογώνιοι. Γενικά οι ορισμοί για την επαγωγή direct και επαγωγή quadrature, σύμφωνα με το, [45] είναι η ακόλουθη:

Επαγωγή στον direct άξονα: Είναι η επαγωγή σε μία από τις φάσεις του κινητήρα, όταν ο δρομέας είναι ευθυγραμμισμένος με τον «άξονα» αυτής της φάσης. Με το ευθυγραμμισμένος εννοούμε ότι ο δρομέας είναι ηλεκτρομαγνητικά κλειδωμένος και ταυτόχρονα επενεργούμε αυτή την φάση με το μέγιστο ρεύμα, βλ. Κεφάλαιο 4. Τότε σε αυτή την περίπτωση λέμε ότι είναι ευθυγραμμισμένος/

Επαγωγή στον quadrature άξονα: Είναι η επαγωγή μίας από τις φάσεις του κινητήρα όταν ο δρομέας είναι στραμμένος κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες από τον «άξονα» αυτής της φάσης, δηλαδή 90 ηλεκτρικές μοίρες στραμμένος από την ευθυγράμμιση με αυτόν τον άξονα, βλέπε Κεφάλαιο 4.

Οι εξισώσεις κάθε φάσης γράφονται σύμφωνα με την Εξ. (3-25), όπως στην Εξ. (8-17), όπου είναι η πτώση τάσης λόγω της αντίστασης και η αναπτυσσόμενη τάση λόγω αυτεπαγωγής – αλληλεπαγωγής και μαγνητικής ροής από τους μόνιμους μαγνήτες.

$$\begin{aligned} v_a &= R_a i_a + \frac{d\lambda_\alpha}{dt} \\ v_b &= R_b i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \\ v_c &= R_c i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \end{aligned} \tag{8-17}$$

Μετά την μετατροπή Clark – Park όμως, πίνακας μετασχηματισμού, βλ. Εξ. (8-8) τελικά έχουμε ότι:

$$\begin{aligned} V_{dq} &= T_{CP} V_{ph} \Leftrightarrow \\ V_{dq} &= R T_{CP} I_{ph} + T_{CP} \frac{d\lambda_{ph}}{dt} \Leftrightarrow \\ V_{dq} &= R I_{dq} + T_{CP} \frac{d(T_{CP}^{-1}\lambda_{dq})}{dt} \Leftrightarrow \\ V_{dq} &= R I_{dq} + \frac{d\lambda_{dq}}{dt} + T_{CP} \frac{dT_{CP}^{-1}}{dt} \lambda_{dq} \end{aligned} \tag{8-18}$$

Ο τρίτος όρος στην Εξ. (8.18) ονομάζεται «ταχύτητα τάσης (**speed voltage**)» και είναι ίσος, μετα από αρκετές πράξεις, με [45]:

$$T_{CP} \frac{dT_{CP}^{-1}}{dt} \lambda_{dq} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta}{dt} & 0 \\ \frac{d\theta}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{8-19}$$

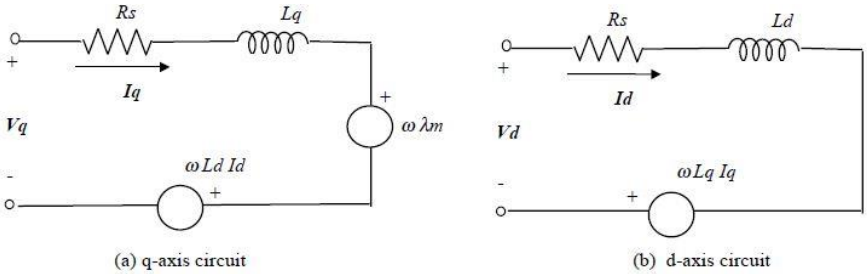
Άρα έχουμε τελικά ότι:

$$\begin{aligned} V_d &= R I_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_{el}\lambda_q \\ V_q &= R I_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_{el}\lambda_d \end{aligned} \tag{8-20}$$

όπου V_d και V_q είναι η εφαρμοζόμενη τάση στον direct και στον quadrature άξονα, λ_d και λ_q η πεπλεγμένη ροή στους αντίστοιχους άξονες και ω_{el} η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Η Εξ. (8-20) είναι η βασική εξίσωση με την οποία μελετάται ένας σύγχρονος κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες χρησιμοποιώντας σταθερά μεγέθη. Σε Εξ. (8-20) αν αντικαταστήσουμε τα μεγέθη από την Εξ. (8-13) έχουμε τις παρακάτω εξισώσεις.

$$V_d = (R + L_d \frac{d()}{dt})I_d - \omega_{el} L_q I_q$$
$$V_q = (R + L_q \frac{d()}{dt})I_q + \omega_{el} L_d I_d + \omega_{el} \lambda_f \quad (8\text{-}21)$$

όπου L_d και L_q η αυτεπαγωγή στον direct και στον quadrature άξονα. Οι Εξ. (8-20) και (8-21) αποτελούν θεμελιώδεις εξισώσεις περιγραφής των κινητήρων αυτών και με βάση αυτές μελετώνται συναρτήσεις μεταφοράς του κινητήρα για διάφορους ελέγχους, [10], [82]. Στο Σχήμα 8-5, απεικονίζεται το αντιστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα του κινητήρα.



Σχήμα 8-5. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες, [50].

Τέλος έχουμε πως η ισχύς που τροφοδοτείται στον κινητήρα είναι:

$$P_{in} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (8\text{-}22)$$

ή διαφορετικά στο σύστημα «dq» είναι:

$$P_{in} = \frac{3}{2}(V_q I_q + V_d I_d) \quad (8\text{-}23)$$

Από τις Εξ. (8-20) ή (8-21), που είναι οι αντίστοιχες Εξ. (3-25) στο σύστημα «dq», έχουμε ότι η ενέργεια που προσδίδεται σε κάθε φάση του κινητήρα διαμοιράζεται στην αντίσταση της φάσης, στη απορρόφηση και στην εκπομπή της μαγνητικής ενέργειας και στην απορρόφηση ενέργειας από την ΑΗΕΔ, η οποία είναι το τμήμα της ισχύς που μετατρέπεται σε μηχανική ισχύς. Σύμφωνα με αυτά λοιπόν η ισχύς που μετατρέπεται σε μηχανική ισχύς είναι:

$$P_{out} = \frac{3}{2}(E_q I_q + E_d I_d) \Rightarrow$$
$$P_{out} = \frac{3}{2}(\omega_{el} \lambda_d I_d - \omega_{el} \lambda_q I_q) = \mathrm{T}\omega_{mech} \quad (8\text{-}24)$$

όπου E_d και E_q η ΑΗΕΔ στον direct και στον quadrature άξονα. Αντικαθιστώντας πάλι τα μεγέθη από την Εξ. (8-13) και συνδέοντας την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα με την μηχανική γωνιακή ταχύτητα μέσω του αριθμού των πόλων θα έχουμε πως ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση.

$$T = \frac{3}{2}\frac{N_m}{2}(\lambda_f I_q + (L_d - L_q) I_q I_d) \quad (8\text{-}25)$$

Το 3/2 είναι χαρακτηριστικός αριθμός των τριφασικών συστημάτων. Αν ο αριθμός των φάσεων ήταν γενικά q τότε όσον αφορά την ροπή θα ίσχυε η εξίσωση, [45].

$$T = \frac{q}{2}\frac{N_m}{2}(\lambda_f I_q + (L_d - L_q)I_q I_d) \tag{8-26}$$

Γενικά αξίζει να σημειωθεί πως για τους συντελεστές επαγωγής ισχύει είτε πως $L_q=L_d$ ή $L_q>L_d$. Η πρώτη περίπτωση είναι όταν οι μαγνήτες είναι στην επιφάνεια του δρομέα – περίπτωση μη έκτυπων πόλων (surface mounted rotor - non salient motor ή surface permanent magnet SPM) και στην οποία η επαγωγή δεν είναι συνάρτηση της θέσης, όπως έχουμε πει και υπάρχει απόλυτη ακτινική συμμετρία. Η δεύτερη περίπτωση είναι όταν οι μαγνήτες στον δρομέα είναι φυτευτοί – περίπτωση έκτυπων πόλων - (buried magnet rotors – salient motor ή interior permanent magnet IPM). Αν ο κινητήρας ανήκει στην πρώτη περίπτωση, τότε επειδή ισχύει $L_q=L_d$, η ροπή δίνεται από την εξίσωση:

$$T = \frac{3}{2}\frac{N_m}{2}(\lambda_f I_q) = \frac{3}{2}K_\Omega I_q \tag{8-27}$$

όπου K_Ω είναι η σταθερά ταχύτητας κάθε φάσης όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Βέβαια όπως είδαμε στον έλεγχο πεδίου επιθυμούμε η συνιστώσα του συνολικού ρεύματος που αντιστοιχεί στον άξονα d, βλ. Σχήμα 3-38, να είναι μηδέν και άρα καταλήγουμε στον ίδιο τύπο για την ροπή.

8.1.3 Εύρος ζώνης συστήματος

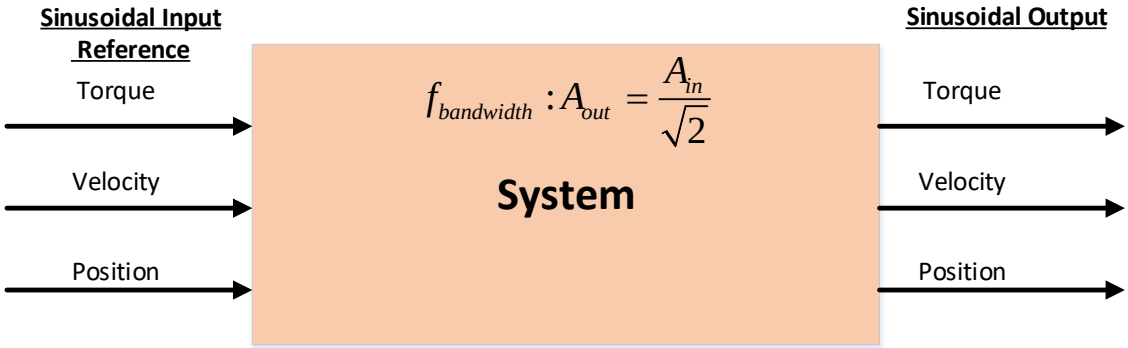
Ως εύρος ζώνης **(bandwidth),** για την ακρίβεια **servo bandwidth** ενός συστήματος, βλ. Σχήμα 8-6, ονομάζουμε την μέγιστη «ανιχνεύσιμη ημιτονοειδή συχνότητα πλάτους A» και ορίζεται στο σημείο όπου το σήμα εξόδου ίδιας συχνότητας έχει πλάτος $A/(2)^{(1/2)}$. Γενικά το servo bandwidth μπορεί να οριστεί ως η ικανότητα του servo να ακολουθήσει γρήγορες αλλαγές στην επιβαλλόμενη είσοδο. Αυτή η είσοδος π.χ. στην περίπτωση των κινητήρων μπορεί να είναι μία μεταβαλλόμενη εντολή ροπής, μία μεταβαλλόμενη εντολή θέσης ή και μία μεταβαλλόμενη εντολής ταχύτητας. Αν θεωρήσουμε ότι ο κινητήρας χαρακτηρίζεται από μία συνάρτηση μεταφοράς που περιλαμβάνει την απόκριση του ηλεκτρικού και του μηχανικού μέρους με το πρώτο φυσικά να είναι πολύ πιο γρήγορο τότε ανάλογα με το είδος της εντολής, αυτή η συνάρτηση μεταφοράς είναι διαφορετική π.χ. η συνάρτηση μεταφοράς σε έλεγχο ταχύτητας από έλεγχο θέσης διαφέρει απλά ως προς τον ελεύθερο ολοκληρωτή. Επίσης αν ο κινητήρας είναι χωρίς κιβώτιο ή είναι με κιβώτιο σε σειρά με ελατήριο τότε η έξοδος και η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος είναι διαφορετική σε κάθε περίπτωση.

Έτσι προκειμένου να εξετάσουμε το εύρος ζώνης μεταξύ διαφορετικών μεθόδων επενέργησης θα πρέπει να εξεταστεί προφανώς στην ίδια μεταβαλλόμενη εντολή η οποία στην περίπτωση ρομποτικών συστημάτων καλό είναι να είναι εντολή ροπής ή θέσης, Προφανώς όταν έχουμε χάρη οδοντών, δηλαδή κενό μεταξύ των οδοντών, το σύστημα επενεργητής και μειωτήρας εμφανίζει μικρότερο εύρος ζώνης αφού σε πολύ υψίσυχνα μεταβαλλόμενη ροπή, η χάρη οδοντών δεν θα επιτρέπει να περάσει αυτή η ροπή μέσα από τον μειωτήρα αφού πριν ακουμπήσει ο ένας οδόντας τον άλλο η εντολή ροπής θα έχει μεταβληθεί και η 1η βαθμίδα του μειωτήρα θα αλλάξει κατεύθυνση κοκ. Τελικά δεν θα μεταφέρει την δύναμη στο επόμενο γρανάζι και η ροπή εξόδου θα είναι ελάχιστη. Αν τώρα τοποθετηθεί και ελατήριο σε σειρά αν αυτό είναι μαλακό λειτουργεί ως ένα χαμηλοπερατό φίλτρο. Έτσι αναμένουμε η μέθοδος επενέργησης DD απευθείας οδήγησης να εμφανίζει το υψηλότερο εύρος ζώνης. Τέλος αν δοθεί εντολή ροπής τότε η συνάρτηση μεταφοράς θα περιλαμβάνει μόνο το ηλεκτρικό κομμάτι πόσο γρήγορα ανταποκρίνεται ο κινητήρας στην εντολή ρεύματος, δηλαδή πόσο γρήγορα αποκρίνεται το ρεύμα, ενώ

αν ως εντολή έχει δοθεί εντολή θέσης τότε στην συνάρτηση μεταφοράς περιλαμβάνεται και η αδράνεια του και η τριβή του κινητήρα και η ιξώδης τριβή αφού ισχύει η Εξ. (8-28) για τον κινητήρα.

$$\begin{aligned} \tau_{motor} &= J\dot{\omega} + B\omega \Rightarrow \\ \omega_{mech} &= \frac{\tau_{motor}}{(Js+B)} \Rightarrow \\ p_{mech} &= \frac{1}{s}\frac{\tau_{motor}}{(Js+B)} \end{aligned} \tag{8-28}$$

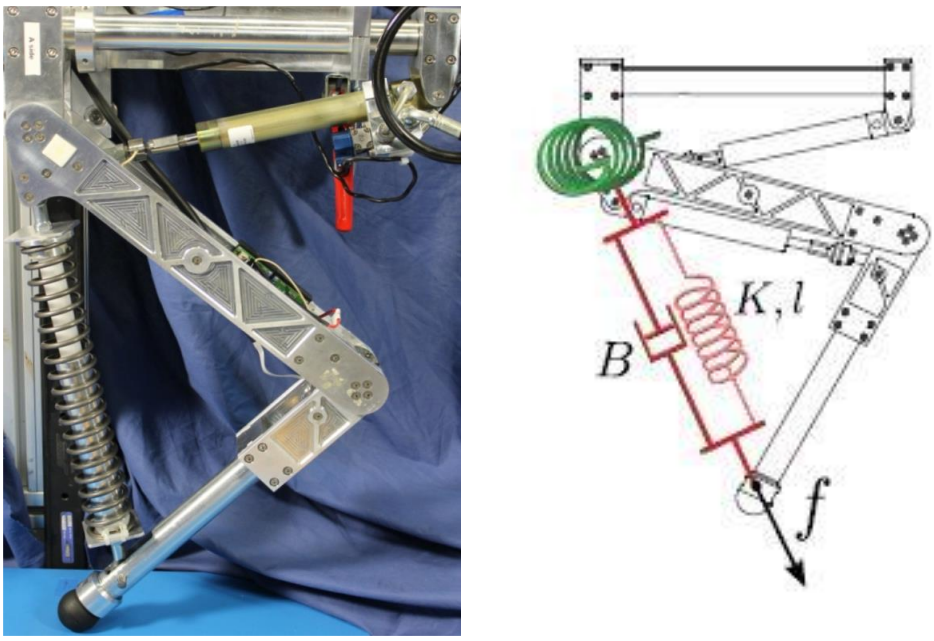
Όπου βλέπουμε ότι η θέση επηρεάζεται από την ροπή αδράνειας και την ιξώδη τριβή.



Σχήμα 8-6. Συγκεκριμένη είσοδο (ροπής, ταχύτητας, θέσης για μηχανικό σύστημα) και μετρώντας την έξοδο βρίσκουμε το εύρος ζώνης.

8.1.4 Virtual Leg Compliance

Ουσιαστικά σε αυτή την περίπτωση προσομοιώνουμε με αυτήν την τεχνική το μηχανισμό του ποδιού με ένα ελατήριο και αποσβεστήρα που συνδέει το ισχίο με το πέλμα, βλ. Σχήμα 8-7.



Σχήμα 8-7. Απεικόνιση λογικής Virtual Leg Compliance, [3].

Ουσιαστικά προσπαθούμε να ελέγξουμε τις ροπές στις αρθρώσεις με τέτοιο τρόπο, χρησιμοποιώντας την Ιακωβιανή, έτσι ώστε σε συχνότητα kHz το πόδι να παράγει δυνάμεις με το έδαφος οι οποίες θα ήταν οι δυνάμεις που θα αναπτύσσονταν αν το σώμα του ποδιού είχε συνδεθεί με ένα ελατήριο και αποσβεστήρα με το έδαφος. Αν θεωρήσουμε ότι κατά την επαφή με το έδαφος το πόδι του ρομπότ παράγει την παρακάτω δύναμη

$$F = [0\ 0\ \ f_z\ \ 0\ 0\ 0] \tag{8-29}$$

Δηλαδή ότι παράγεται μόνο δύναμη ως προς τον άξονα z τότε έχουμε ότι η δύναμη αυτή θα πρέπει να είναι της μορφής:

$$f_z = k_s(z_{fdb} - z_{cmd}) + k_d(\dot{z}_{fdb} - \dot{z}_{cmd}) \tag{8-30}$$

όπου fz είναι η κάθετη δύναμη που παράγεται από το πόδι και προσπαθεί να ομοιάσει τη συμπεριφορά ελατηρίου και αποσβεστήρα, ks είναι η εικονική σταθερά του ελατηρίου [N/m], kd είναι η εικονική σταθερά του αποσβεστήρα [Ns/m] και zcmd, zfdb είναι η εντολή και η ανάδραση της θέσης στον z άξονα. Γενικά η εντολή ταχύτητας στον z άξονα θεωρείται ίση με μηδέν.

Μόλις η δύναμη που απαιτείται υπολογισθεί, επιλέγοντας οποιοδήποτε επιθυμητό συνδυασμό των δύο κερδών ελατηρίου και αποσβεστήρα, τότε οι ροπές των αρθρώσεων που απαιτούνται για να παραχθεί αυτή η δύναμη υπολογίζονται κάθε στιγμή μέσω της Ιακωβιανής και της εξίσωσης.

$$\tau = J^{\tau} F \tag{8-31}$$

Συγκεκριμένα η Εξ. (8-31) ισχύει με ακρίβεια στην περίπτωση που έχουμε ένα στατικό πρόβλημα, δηλαδή στην περίπτωση που το πόδι του ρομπότ δεν μπορεί να κινηθεί. Στην περίπτωση που το πόδι κινείται όμως και εμπλέκονται τα δυναμικά φαινόμενα της κίνησης του ποδιού τότε ισχύει η Εξ. (5-18). Γενικά ο τρόπος αυτός ελέγχου ονομάζεται Impedance control και χρησιμοποιείται ευρέως στην επιστημονική περιοχή των haptics. Γενικά στα haptics τα παθητικά στοιχεία αδράνειας και οι τριβές μπορεί να είναι «επιβλαβής» για την ακριβή αναπαραγωγή των επιθυμητών δυνάμεων στο τελικό σημείο δράσης και για αυτό τον λόγο είναι απαραίτητη η σχεδίαση να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να διευκολύνεται η διέλευση των δυνάμεων μέσα από τον μηχανισμό «transparency» μειώνοντας τα δυναμικά φαινόμενα και έτσι να μην χρειάζεται η χρήση ενός αισθητήρα δύναμης στο τελικό σημείο δράσης. Με αυτό τον τρόπο εξαλείφουμε φαινόμενα αστάθειας που προκαλούνται από μη μοντελοποιημένες συμπεριφορές (modes) μεταξύ του επενεργητή δύναμης και του αισθητήρα δύναμης, [17], [69].

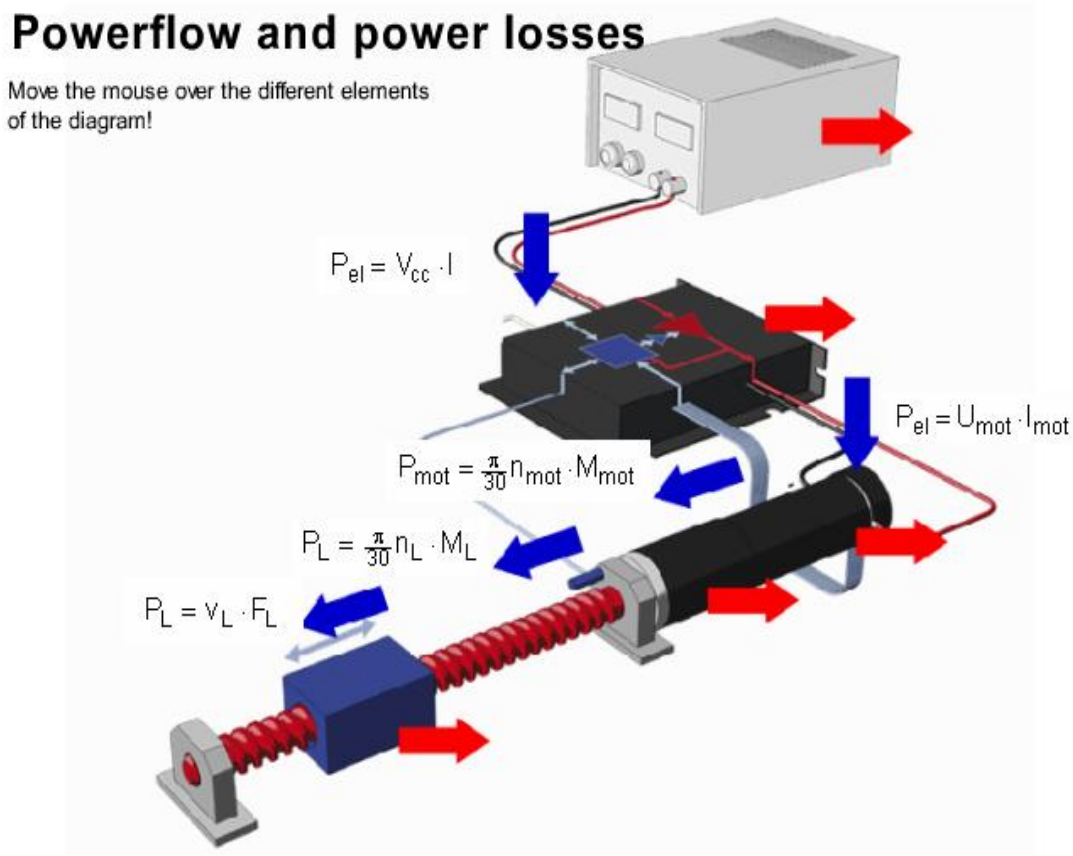
Όπως είπαμε σκοπός μας είναι στο σχεδιασμό να μειώσουμε την ροπή αδράνειας και την μάζα του ποδιού. Επίσης μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι δυνάμεις Coriolis δεν είναι πολύ σημαντικές και μπορούν να αμεληθούν. Επιπλέον οι δυνάμεις από τους επενεργητές είναι πολύ μεγαλύτερες από τις δυνάμεις βαρύτητας. Όλοι αυτοί οι λόγοι, και για χαμηλές ταχύτητες, οδηγούν στο ότι η Εξ. (5-18) μπορεί να γραφτεί.

$$\tau \simeq J^{\tau} F_{ext} + F_c q \tag{8-32}$$

Έτσι και στην περίπτωση που το ρομπότ είναι σε κίνηση μπορούν να υπολογιστούν οι απαραίτητες δυνάμεις. Έτσι ο νόμος ελέγχου γίνεται πιο απλός και αν μοντελοποιηθούν και οι τριβές τότε αυτές μπορούνε να εισαχθούν ως διαταραχή.

8.1.5 Θερμική ανάλυση κινητήρων

Αν θέλαμε να δούμε την συνολική κατανάλωση θερμότητας σε ένα σύστημα που περιλαμβάνει τροφοδοσία, ελεγκτή για την οδήγηση τριφασικού κινητήρα όπως είναι ένας κινητήρας χωρίς ψήκτρες, κινητήρας και μηχανικό φορτίο τότε το Σχήμα 8-8, θα ήταν πολύ χαρακτηριστικό. Σε αυτό αν και βλέπουμε έναν μονοφασικό brushed κινητήρα της MAXON, οι αρχές για την παραγωγή θερμότητας ενός τριφασικού κινητήρα είναι οι ίδιες, [42].

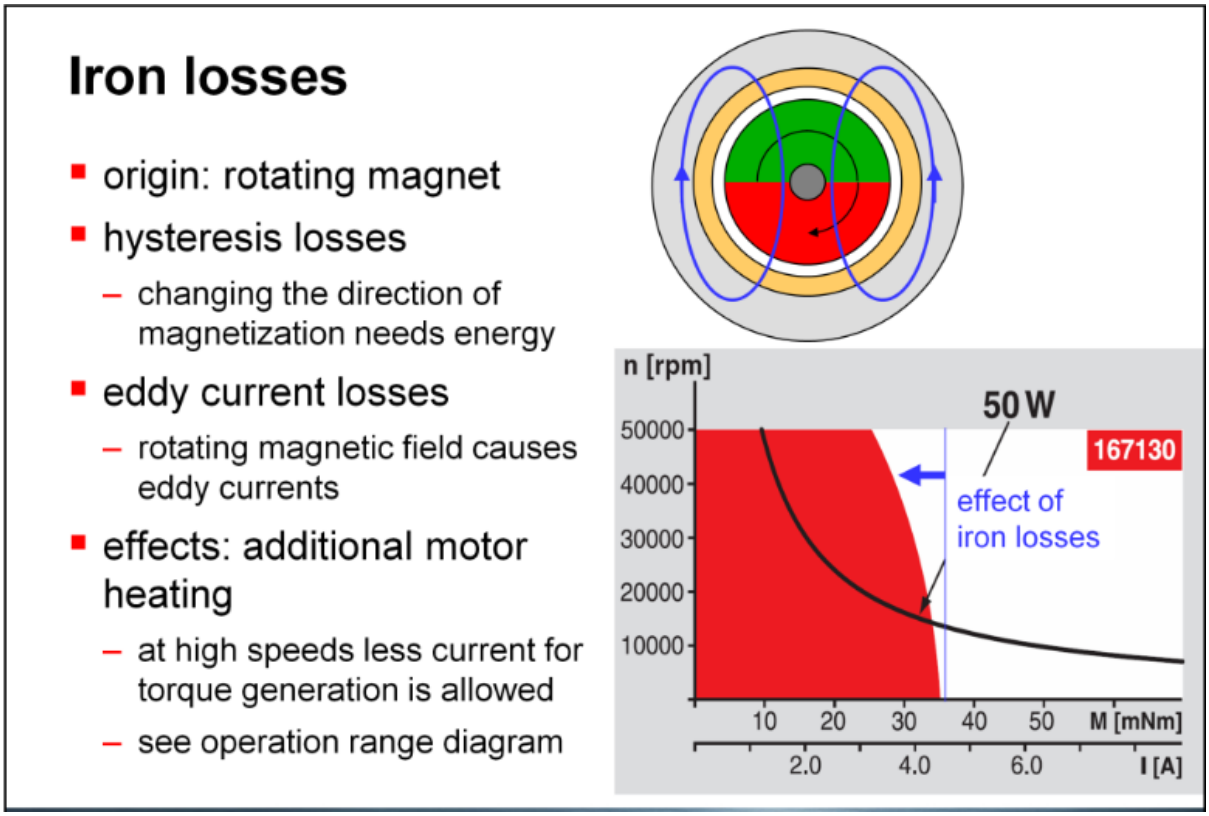


Σχήμα 8-8. Ροή απωλειών ενέργειας σε ένα σύστημα που περιλαμβάνει τροφοδοσία, ελεγκτή, κινητήρα, κιβώτιο, [42].

Γενικά οι απώλειες θερμότητας κατανέμονται στις εξής γενικές κατηγορίες όπως φαίνονται και στο Σχήμα 8-8, [42]. Αρχικά έχουμε τις απώλειες στην **τροφοδοσία** όπου περιλαμβάνει ποικίλες απώλειες στα ηλεκτρονικά από τα οποία αποτελείται. Στην συνέχεια έχουμε απώλειες στον **ελεγκτή:** Απώλειες ενέργειας κυρίως της συνεχούς λειτουργίας των Mosfets ως διακόπτες (switching losses in MOSFETs)**.** Απόδοση ≅ 90%.

Οι σημαντικότερες απώλειες βέβαια είναι **απώλειες ενέργειας στον ηλεκτρικό κινητήρα.** Στις απώλειες στον ηλεκτρικό κινητήρα έχουμε αρχικά τις λεγόμενες **απώλειες Joule (Joule Losses)** που οφείλονται στην αντίσταση των τυλιγμάτων και τις **απώλειες σιδήρου (Iron Losses),** οι οποίες περιλαμβάνουν τις **απώλειες Υστέρησης (Hysteresis Losses)** και τις **απώλειες δινορρευμάτων (Eddy Losses)**. Οι απώλειες Υστέρησης είναι εξαρτώμενες από την ταχύτητα του δρομέα και μπορούν να μοντελοποιηθούν σαν μία επιπλέον σταθερή ροπή τριβής, [41].

Όσον αφορά τις απώλειες δινορρευμάτων, το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί την εμφάνιση τάσης στο υλικό και κατά συνέπεια οι τάσεις αυτές προκαλούν ρεύματα στο εσωτερικό του υλικού τα οποία γίνονται θερμότητα. Οι συγκεκριμένες απώλειες είναι συνάρτηση του τετραγώνου της ταχύτητας και μπορούν να μοντελοποιηθούν ως ροπή τριβής, εξαρτώμενης από την ταχύτητα. **Στις υψηλές ταχύτητες οι απώλειες αυτού του τύπου κυριαρχούν με αποτέλεσμα η θεωρητικά κάθετη καμπύλη συνεχούς λειτουργίας να μεταφέρεται σε μικρότερες ροπές, βλ. Σχήμα 8-9.**

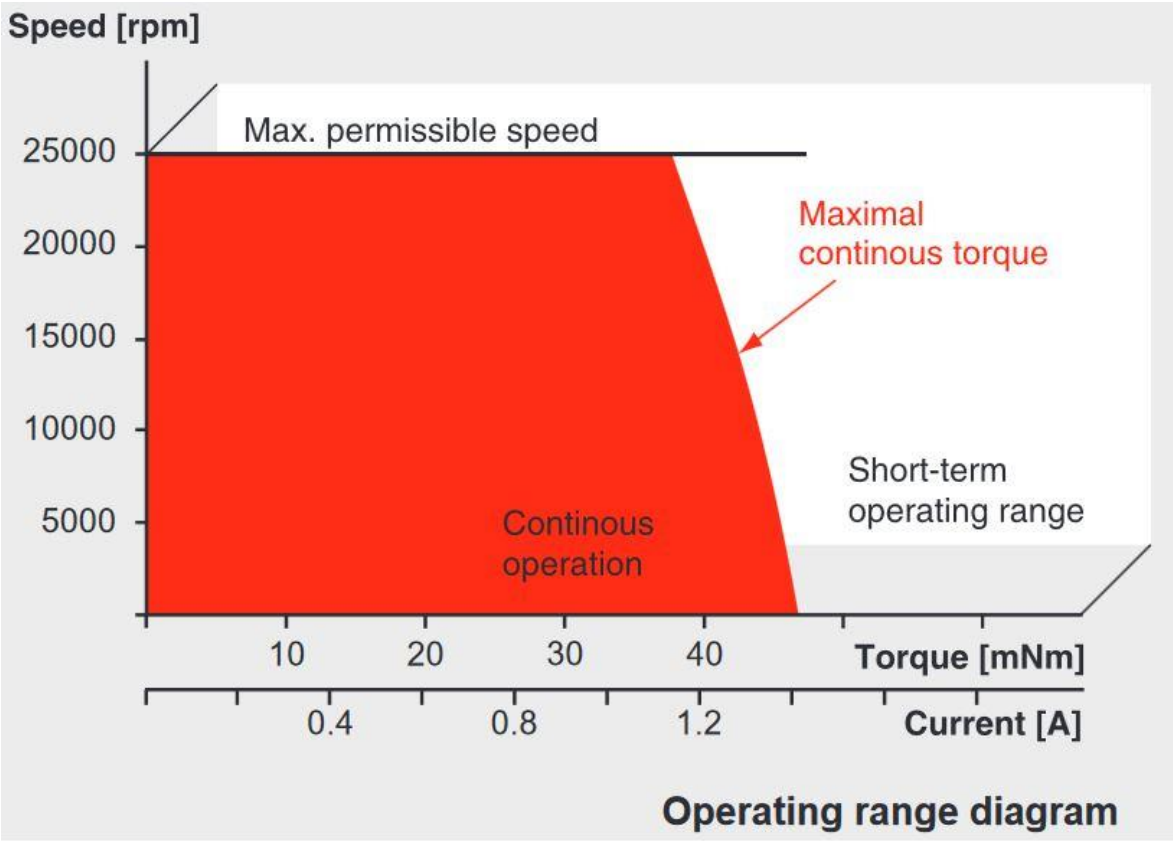


Σχήμα 8-9. Οι απώλειες σιδήρου περιλαμβάνουν διάφορες επιμέρους απώλειες, [41].

Τέλος έχουμε τις **απώλειες στο φορτίο.** Οι απώλειες αυτού του είδους περιλαμβάνουν τις απώλειες **τριβής κιβωτίου – ρουλεμάν,** όπου γενικά στις ρομποτικές εφαρμογές είναι υψηλής τεχνολογίας μειώνοντας κατά κόρον τις απώλειες σε αυτά, έχοντας υψηλό βαθμό απόδοσης καθώς και την **τριβή φορτίου** οποιασδήποτε φύσεως (τριβή Coulomb-ιξώδης τριβή).

Εκτός από τα αίτια που προκαλούν την αύξηση της θερμοκρασίας σε έναν κινητήρα, σημαντικό είναι να εστιάσουμε και το ενδιαφέρον μας στην συμπεριφορά του κινητήρα όταν αυτός θερμαίνεται, και τις χαρακτηριστικές περιοχές λειτουργίας. Όπως μπορούμε να δούμε και από το Σχήμα 8-10, οι περιοχές λειτουργίας του κινητήρα είναι οι εξής, [40].

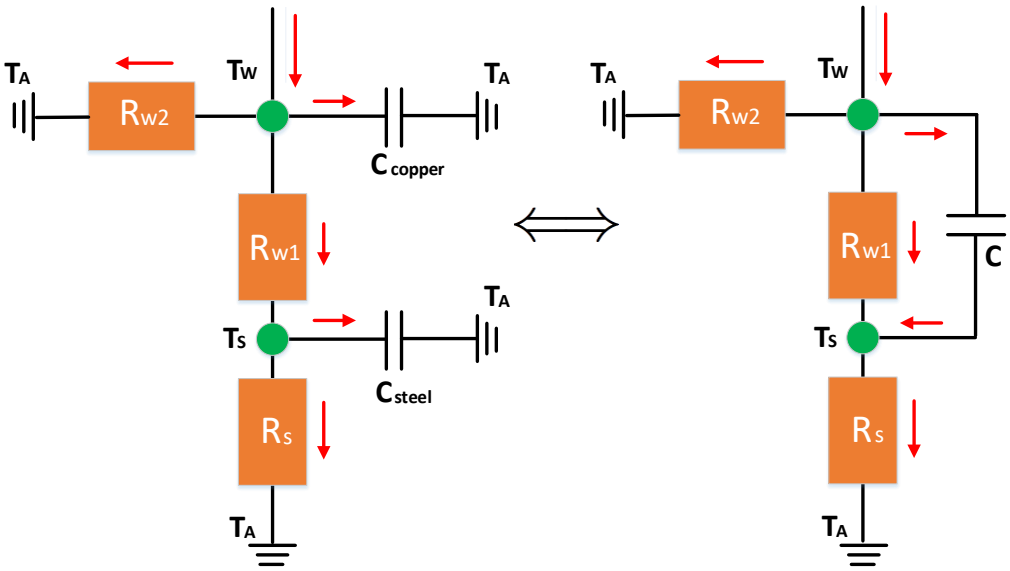
Έχουμε αρχικά την **περιοχή μόνιμης λειτουργίας**. Η περιοχή αυτή περιορίζεται από την **γραμμή μέγιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας** και από την **γραμμή μέγιστης συνεχούς ροπής** του κινητήρα. Σημεία λειτουργίας του κινητήρα, μέσα σε αυτή την περιοχή δεν ανεβάζουν την θερμοκρασία πάνω από την μέγιστη επιτρεπτή και ούτε προκαλούν φθορά στα δομικά του στοιχεία όπως ρουλεμάν με αποτέλεσμα να επιτρέπουν μία μακρά διάρκεια ζωής του κινητήρα.



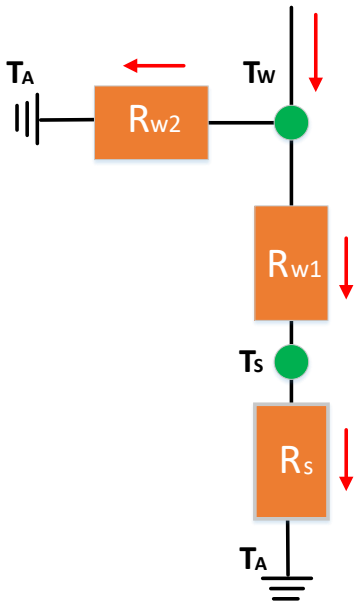
Σχήμα 8-10. Χαρακτηριστικές περιοχές λειτουργίας του κινητήρα, [40].

Η περιοχή μόνιμης λειτουργίας ορίζεται από το **όριο μέγιστης συνεχούς ροπής**. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως στους κινητήρες έχουμε τις απώλειες Joule και τις απώλειες σιδήρου (Hysteresis & Eddy current) που μετατρέπονται σε θερμότητα. Αρχικά, όπως αναφέρουμε και στο Κεφάλαιο 4 ένας μέρος αυτής της θερμότητας απορροφάται από τον κινητήρα λόγω της θερμοχωρητικότητάς του (θερμοχωρητικότητα χαλκού και θερμοχωρητικότητα χάλυβα), ένας μέρος μεταφέρεται από τα τυλίγματα στον στάτη και από τον στάτη στο περιβάλλον ενώ αν ο κινητήρας είναι ανοικτός, περίπτωση T-motor U8 και τα τυλίγματα έρχονται σε επαφή με το περιβάλλον, ένα τρίτο μέρος της θερμότητας κατευθύνεται κατευθείαν από τα τυλίγματα στο περιβάλλον, βλ. Σχήμα 8-11. Κάποια στιγμή βέβαια η θερμοκρασία του κινητήρα φτάνει μία μέγιστη τιμή και το θερμικό κύκλωμα βρίσκεται σε ισορροπία, βλ. Σχήμα 8-12.

Στην περίπτωση αυτή η θερμότητα που παράγεται από τον κινητήρα, ρέει κατευθείαν προς στο περιβάλλον ενώ η θερμοκρασία του κινητήρα παραμένει σταθερή. Η τιμή της σταθερής αυτής θερμοκρασίας είναι ανάλογη του ρεύματός του. Το ονομαστικό ρεύμα (**nominal current**) δηλαδή το μέγιστο συνεχές ρεύμα που ρέει στα καλώδια του κινητήρα αντιστοιχεί στην μέγιστη σταθερή θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει ο κινητήρας και δεν πρέπει να ξεπερνά την θερμοκρασία στην οποία η μόνωση των τυλιγμάτων του καταστρέφεται. Τέλος το ονομαστικό ρεύμα μέσω της σταθερά ροπής αντιστοιχίζεται σε **ονομαστική ροπή (nominal torque)**, μέγεθος που αποτελεί ένα από τα ποιο χαρακτηριστικά μεγέθη του κινητήρα το οποίο όπως είδαμε περιορίζει την περιοχή σταθερής λειτουργίας του κινητήρα. Φυσικά το όριο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας επηρεάζεται και από την **θερμοκρασία αναφοράς (ambient temperature)**. Στην περίπτωση που ο κινητήρας κινείται τότε το ρεύμα και συνάμα και η ροπή μικραίνει λόγω της έντονης επίδρασης των δινορρευμάτων.



Σχήμα 8-11. Θερμικό κύκλωμα κατά την μεταβατική περίοδο όπου η θερμοκρασία του κινητήρα αυξάνει. Θερμικό κύκλωμα κατά την θερμική ισορροπία του συστήματος.



Σχήμα 8-12. Θερμικό κύκλωμα κατά την θερμική ισορροπία του συστήματος.

Το ονομαστικό ρεύμα επηρεάζεται από την θερμοκρασία δωματίου και από την έδραση του κινητήρα. Μαθηματικά αυτό εκφράζεται από τις Εξ. (8-33) και (8-34), [42].

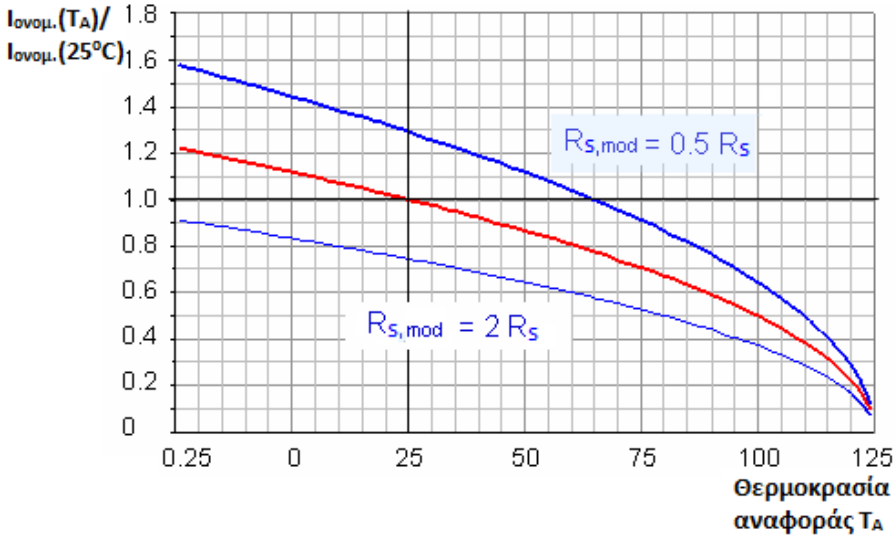
$$I_N(T_A) = I_N(25^o C)\sqrt{\frac{T_{\max} - T_A}{T_{\max} - 25^o C}} \tag{8-33}$$

$$I_N(T_A) = I_N(25^o C)\sqrt{\frac{T_{\max} - T_A}{T_{\max} - 25^o C}\frac{R_{w1} + R_s}{R_{w1} + R_{s,\mathrm{mod}}}} \tag{8-34}$$

Όπου R_S είναι η θερμική αντίσταση από τον δρομέα στο περιβάλλον σε κανονικές συνθήκες έδρασης του κινητήρα και $R_{S2,mod}$ αποτελεί την θερμική αντίσταση από τον δρομέα στο περιβάλλον, λαμβάνοντας υπόψιν τις νέες συνθήκες έδρασης και υπολογίζεται από την Εξ. (8-35), [42].

$$R_{s,\mathrm{mod}} = \Delta T_s \frac{1 - a_{Cu} R_w P}{P(1 + a_{Cu} \Delta T)_s} \tag{8-35}$$

Όπου ΔT_s είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του δρομέα και του περιβάλλοντος, R_w η θερμική αντίσταση μεταξύ των τυλιγμάτων και του ρότορα, P η θερμική ισχύς και a_{Cu} ο συντελεστής θερμικής αντίστασης. Στο Σχήμα 8-13, βλέπουμε ουσιαστικά την μεταβολή του ονομαστικού ρεύματος των κινητήρων,



Σχήμα 8-13. Μεταβολή της θερμικής αντίστασης από τον στάτη προς το περιβάλλον σε συνάρτηση με τον τρόπο πρόσδεσης και την εφαρμογή του κινητήρα.

Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι οι παραπάνω τύποι για την θερμική αντίσταση αμελούν την άμεση μετάδοση θερμότητας από τα τυλίγματα στο περιβάλλον [42], χωρίς όμως μεγάλες αλλαγές στην περίπτωση που ληφθούν.

Επίσης έχουμε το **όριο μέγιστης ταχύτητας του κινητήρα** [40], το οποίο περιορίζεται κυρίως από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, όπως ο αριθμός των πόλων ο οποίος σε outrunner κινητήρες με μεγάλη ακτίνα και μικρό μήκος είναι αρκετά μεγάλος (42 για T- motor U8), η αντοχή και το όριο ζωής των ρουλεμάν του κινητήρα αφού σε υψηλές ταχύτητες έχουμε την εμφάνιση έντονων ταλαντώσεων, η ικανότητα του ελεγκτή να παράγει υψίσυχνα ρεύματα εφόσον η σχέση που συνδέει την ταχύτητα του κινητήρα με την συχνότητα του ρεύματος που τροφοδοτείται σε αυτόν από τον ελεγκτή καθορίζεται από την Εξ. (8-36) και άρα όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα του δρομέα τόσο υψηλότερη πρέπει να είναι και η ηλεκτρική συχνότητα τροφοδοσίας:

$$f_{el} = \frac{n_{mech}(\#of\ poles)}{60}(Hz) \tag{8-36}$$

Τέλος, στο συγκεκριμένο όριο, εκτός από τα κατασκευαστικά, υπάρχουν περιορισμοί που αφορούν στην εφαρμοζόμενη τάση, αφού η ΑΗΕΔ είναι ανάλογη της ταχύτητας και άρα από ένα σημείο ταχύτητας και πάνω, η ΑΗΕΔ είναι μεγαλύτερη από την εφαρμοζόμενη τάση και το ρεύμα μειώνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται η εφαρμοζόμενη ροπή και άρα οι στροφές του κινητήρα.

Τελειώνοντας έχουμε την **περιοχή λειτουργίας μικρής διάρκειας**. Η περιοχή συνεχούς λειτουργίας μας δείχνει σε ποιο σημείο ο κινητήρας μας εργάζεται με ασφάλεια. Αυτό όμως δεν σημαίνει

ότι ο κινητήρας δεν μπορεί να εργασθεί και σε υψηλότερα ρεύματα εφόσον βέβαια η θερμοκρασία δεν ξεπεράσει την κρίσιμη θερμοκρασία συνεχούς λειτουργίας. Ο χρόνος για τον οποίο λειτουργεί κινητήρας στην περιοχή μικρής διάρκειας, όπως είδαμε και στη πειραματική μελέτη του Κεφαλαίου 4, όταν εφαρμόσαμε ρεύματα των 15A και 17A, εξαρτάται άμεσα από το γρήγορο πόλο της συνάρτησης μεταφοράς, βλ. Εξ. (4-18). Αυτό ισχύει εντονότερα στο **Short term operation** που αναλύουμε παρακάτω.

Στην περιοχή αυτή μπορεί να γίνονται δύο ειδών λειτουργίες, [42].

1. On – Off operation

Σε αυτή την λειτουργία το πόσο ρεύμα επιτρέπεται να τραβήξει ο κινητήρας για λειτουργία πάνω από το ονομαστικό ρεύμα, εξαρτάται από τον χρόνο που θα τραβήξει αυτό το ρεύμα, t_{on}, αλλά και από τον χρόνο που ο κινητήρας ηρεμεί, t_{off}. Άρα επηρεάζεται από τον συνολικό χρόνο – περίοδος της κυκλικής διαδικασίας η οποία είναι $t=t_{on} + t_{off}$. Στην λειτουργία αυτή, η διαχείριση του κινητήρα είναι ίδια με την διαχείριση στην συνεχή λειτουργία, με την διαφορά μόνο ότι η τιμή του συνεχούς ρεύματος αντικαθίσταται από την RMS τιμή της. Γι' αυτή ισχύει ότι:

$$I_{RMS} = I_{on}\sqrt{\frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}} \le I_{N,T_A} \tag{8-37}$$

η οποία με βάση την Εξ. (8-33) για το ονομαστικό ρεύμα, οδηγεί στην παρακάτω εξίσωση:

$$I_{on} \le I_{N,T_A}\sqrt{\frac{T_{\max} - T_A}{T_{\max} - 25^o\,C}\frac{t_{on} + t_{off}}{t_{on}}} \tag{8-38}$$

2. Short – term operation

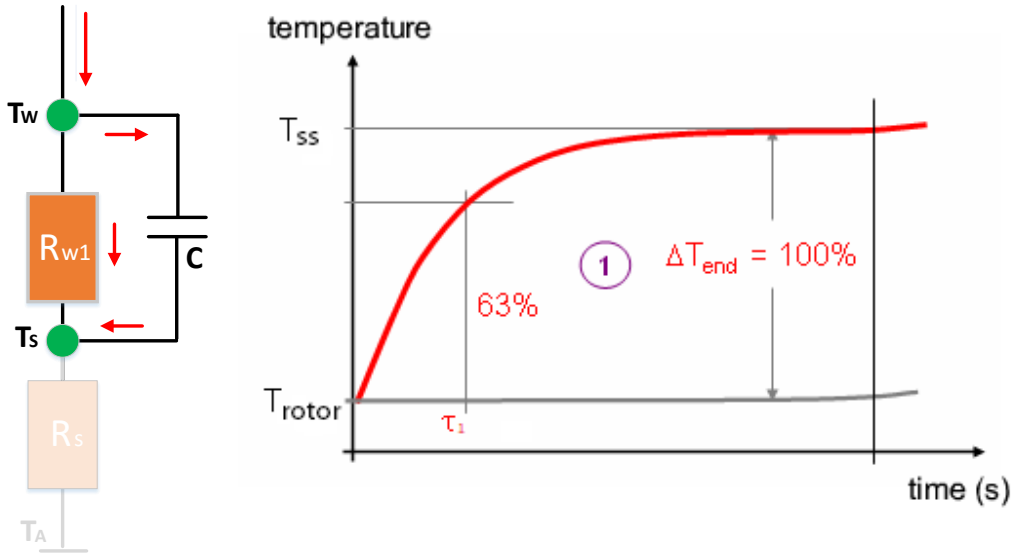
Γενικά ένας κινητήρας εργάζεται στην περιοχή συνεχούς λειτουργίας ή εργάζεται σε έναν τύπο λειτουργίας όπου παρουσιάζεται περιοδικότητα, όπως για παράδειγμα στην on-off λειτουργία που περιγράψαμε προηγουμένως ή στην λειτουργία που εμφανίζουν οι κινητήρες των ρομπότ με πόδια. Κάποιες φορές όμως ένας κινητήρας μπορεί να χρειαστεί να λειτουργήσει πολύ πάνω από το ονομαστικό ρεύμα, για μία μόνο φορά και ακαριαία όπως για παράδειγμα όταν το πόδι ενός τετράποδου ρομπότ έχει κολλήσει σε ένα εμπόδιο και χρειάζεται να ξεκολλήσει. Ως εκ τούτου αν έχει ισορροπήσει σε μία συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας και κάποια στιγμή τραβήξει πολύ μεγάλο ρεύμα, τότε αυτή η λειτουργία ονομάζεται λειτουργία μικρής διάρκειας (**Short term operation**). Η λειτουργία αυτή, επειδή θεωρείται ακαριαία, και τα τυλίγματα αυξάνουν θερμοκρασία ταχύρρυθμα, βλ. Σχήμα 4-32 και Σχήμα 4-34, ο χρόνος που θα διαρκέσει η υπερφόρτωση του κινητήρα με ρεύμα επηρεάζεται πάρα πολύ από το μέγεθος του γρήγορου πόλου του συστήματος $2^{ης}$ τάξης, βλ. Κεφάλαιο 4 και Εξ. (4-18), και ένας εμπειρικός κανόνας (rule of thumb) για τον χρόνο που ένας κινητήρας μπορεί να υπερβεί το ονομαστικό ρεύμα, είναι ο αυτός που αναγράφει ο Πίνακας 8-1, [42]. Λόγω των προηγουμένων η θερμοκρασία του στάτη θεωρείται ότι δεν μεταβάλλεται πολύ, σχεδόν σταθερή και άρα θα μπορούσαμε αν πούμε ότι το ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα είναι αυτό που παρουσιάζεται στο Σχήμα 8-14α, στο οποίο βλέπουμε ότι το τμήμα μετά τον στάτη το αμελούμε.

Πίνακας 8-1. Χρόνος και συντελεστής υπερφόρτωσης του κινητήρα ως προς ρεύμα.

t_{on}/τ_1	I/I_N	K
∞	1	<1
5	2	1
0.6	3	1.5
0.3	4	2

Όπου τ_1 είναι η είναι ο γρήγορος πόλος του συστήματος της θερμικής απόκρισης του κινητήρα, όπως την ορίσαμε προηγουμένως και K ονομάζεται **συντελεστής υπερφόρτωσης (overload factor)** και ορίζεται ως ακολούθως.

$$K = \frac{I}{I_N}\sqrt{\frac{T_{\max} - 25}{T_{\max} - T_S}\frac{R_{th1}}{R_{th1} + R_{th2}}} \tag{8-39}$$



(α) (β)

Σχήμα 8-14. (α) Μοντελοποίηση ως σύστημα πρώτης τάξης, [42]. (β) Απόκριση της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων T_W. Θεωρούμε η υπερφόρτωση του κινητήρα με υπέρμετρο ρεύμα γίνεται πολύ γρήγορα και αυτό οδηγεί σε απόκριση συστήματος 1ης τάξης, το κομμάτι του θερμικού κυκλώματος από τον δρομέα στο περιβάλλον να παραμένει ανεπηρέαστο και σε σταθερή θερμοκρασία, [42].

Η θερμοκρασία των τυλιγμάτων ακολουθεί την πορεία όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-14, με βάση την εξίσωση:

$$\Delta T(t) = \Delta T_{end}\left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right] \tag{8-40}$$

Γενικά σε εφαρμογές απευθείας οδήγησης όπου δεν υπάρχει η συμβολή του κιβωτίου στην ροπή, οι κινητήρες εργάζονται σε περιοχές λειτουργίες κοντά στο όριο συνεχούς ρεύματος προκειμένου να παράγουν μεγάλη ροπή (μη αποδοτική περιοχή λειτουργίας) και άρα η διαχείριση της θερμικής συμπεριφοράς παίζει μεγάλο ρόλο. Αν θέλαμε να κάνουμε μία συντηρητική εκτίμηση, χωρίς να λάβουμε υπόψιν τις απώλειες ενέργειας προς το περιβάλλον και υποθέσουμε ότι όλη η θερμική ενέργεια που

παράγεται από τον κινητήρα απορροφάται από τα τυλίγματα, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι ο χρόνος που χρειάζεται ο κινητήρας να αυξήσει την θερμοκρασία κατά 100 βαθμούς, δίνεται από την Εξ. (8-41), βλ. [12], [34].

$$t = \frac{100C}{3I^2R}$$
$$C = m_{steel}c_{steel} + m_{copper}c_{copper} \tag{8-41}$$

όπου η C είναι η συνολική θερμοχωρητικότητα του συστήματος, m_{steel} και m_{copper} η μάζα του χάλυβα (δρομέας) και η μάζα του χαλκού (τυλίγματα) αντίστοιχα, c_{steel} και c_{copper} οι ειδικές θερμοχωρητικότητες του χάλυβα και του χαλκού ενώ R η αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη. Από τα παραπάνω προκύπτει και ότι ο χρόνος είναι ανάλογος της θερμοχωρητικότητας του συστήματος και αυτή με την σειρά της είναι ανάλογη της μάζας του κινητήρα και άρα όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα τόσο αυξάνεται η απόδοση των κινητήρων ως προς την θερμοκρασία.

$$c_{steel} = 460\frac{kJ}{kgK} \quad \& \quad c_{copper} = 380\frac{kJ}{kgK} \tag{8-42}$$

Μία μέθοδος που παρουσιάζει αρκετή ακρίβεια για τη διαχείριση της θερμικής συμπεριφοράς είναι να χρησιμοποιηθεί ένας PID controller [86] στο μοντέλο 3 αντιστάσεων, βλ. Σχήμα 8-11 και Σχήμα 8-12. Ουσιαστικά χρησιμοποιώντας ένα θερμοστοιχείο ως ανατροφοδότηση για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας στο κέλυφος του κινητήρα είναι δυνατόν μέσω του θερμικού μοντέλου των Εξ. (4-16), να εκτιμάται η θερμοκρασία των τυλιγμάτων. Με την μέθοδο αυτή εξασφαλίζεται συνεχής υπολογισμός της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων του κινητήρα και κατά συνέπεια αποτελεσματική διαχείριση της θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα.

Μία άλλη μέθοδος είναι αυτή που χρησιμοποιεί την RMS τιμή του ρεύματος εκμεταλλευόμενοι το ότι οι εφαρμογές τετράποδων ρομπότ παρουσιάζουν περιοδικές κινήσεις. Ουσιαστικά η μέθοδος αυτή αποτελεί γενίκευση της μεθόδου **on – off λειτουργίας**, που είδαμε προηγουμένως. Στις εφαρμογές αυτές το ρεύμα παρουσιάζει μία περιοδικότητα, περνώντας το ονομαστικό ρεύμα σε αυτό τον κύκλο περιοδικότητας όχι μία αλλά και παραπάνω φορές, εξασφαλίζοντας όμως, ότι η RMS τιμή, τελικά δεν είναι μεγαλύτερη από την από την ονομαστική τιμή του ρεύματος, [69].

Ουσιαστικά έχουμε την παρακάτω εξίσωση που αποτελεί γενίκευση της Εξ. (8-37):

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\sum_{j=1}^{n} i_j^2 dt_j} \le I_N \tag{8-43}$$

όπου $T = \sum_{j=1}^{n} dt_j^2$ είναι η περίοδος που μετράται η RMS τιμή και dt_j ο χρόνος για τον οποίο υφίστανται το ρεύμα i_j. Λύνοντας την Εξ. (8-43) ως προς την επόμενη τιμή ρεύματος προκύπτει η Εξ. (8-44). Εάν η τιμή του ρεύματος είναι μικρότερη ή ίση με την τιμή που προκύπτει από την Εξ. (8-44), τότε η διάταξη ελέγχου θα μπορεί να στείλει αυτήν την εντολή ειδάλλως θα περιορίζεται στην τιμή που προκύπτει, [34].

$$\left|I_{j+1}\right|_{\max} = \sqrt{\frac{1}{dt_{j+1}}(I_{const}^2 T - \sum_{j=1}^{n} i_j^2 dt_j)} \tag{8-44}$$

Οι μέθοδοι με τις οποίες ελέγχουμε την υπερφόρτωση των κινητήρων, είναι απαραίτητες σε ρομπότ με πόδια, όταν αυτά βρίσκονται σε καταστάσεις τρεξίματος και πηδήματος, στις οποίες το

ρομπότ δέχεται μεγάλες κρούσεις και άρα αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις, με μικρό συνήθως **ποσοστό χρόνου** από τον συνολικό κύκλο κίνησης 20%, [69]. Πλέον μέσω του **ελέγχου ρεύματος (current control)** και των θερμικών μοντέλων μπορεί να εκτιμηθεί η θερμοκρασία των τυλιγμάτων και ο κινητήρας να παράγει υψηλότερη ισχύ από αυτή που προτείνει ο κατασκευαστής του κινητήρα. Το βασικότερο μέτρο για το πόσο χρόνο μπορεί ένας κινητήρας να δουλέψει στην περιοχή πέρα από την μέγιστη συνεχή λειτουργία είναι η θερμική σταθερά.

Τέλος στη βιβλιογραφία έχουν υπάρξει διάφορες προσπάθειες για την αύξηση του ορίου λειτουργίας των κινητήρων και ένα παράδειγμα είναι χρησιμοποιώντας ενεργά στοιχεία για την ψύξη του κινητήρα με την χρήση ανεμιστήρα ή κυκλωμάτων νερού όπως έχει γίνει με το ρομπότ HRP3La-JSK, [85]. Το HRP3La-JSK χρησιμοποιεί **custom διάταξη οδήγησης,** με μέγιστο συνεχές όριο ρεύματος**,** 80A, τροφοδοτούμενη με πυκνωτή 100V (9kg) και η οποία ψύχεται μέσω ειδικής διάταξης με υγρό. Επίσης χρησιμοποιεί **κινητήρα MAXON 200W,** ο οποίος φτάνει μέγιστο ρεύμα, λόγω της διάταξης ψύξης, τα 138Amps (19 φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα), διατηρώντας όμως την θερμοκρασία της μόνωσης των τυλιγμάτων του κινητήρα σε επιτρεπτά όρια. Έτσι αν ένας κινητήρας περιορίζεται μόνο θερμικά και οι μαγνήτες θεωρητικά δεν έρχονται σε κορεσμό, τότε μέσω της ψύξης μπορεί να αυξηθεί κατά πολύ η μέγιστη συνεχής ροπή – λειτουργία του κινητήρα. Τέλος έχουμε δει και στον έλεγχο πεδίου το ρεύμα που δεν συνεισφέρει στην ροπή παρά μόνο στην παραγωγή θερμότητας μηδενίζεται τελείως κάνοντας το σύστημα πιο αποδοτικό.

8.2 Προσδιορισμός Παραμέτρων - Επιπλέον Μέθοδοι

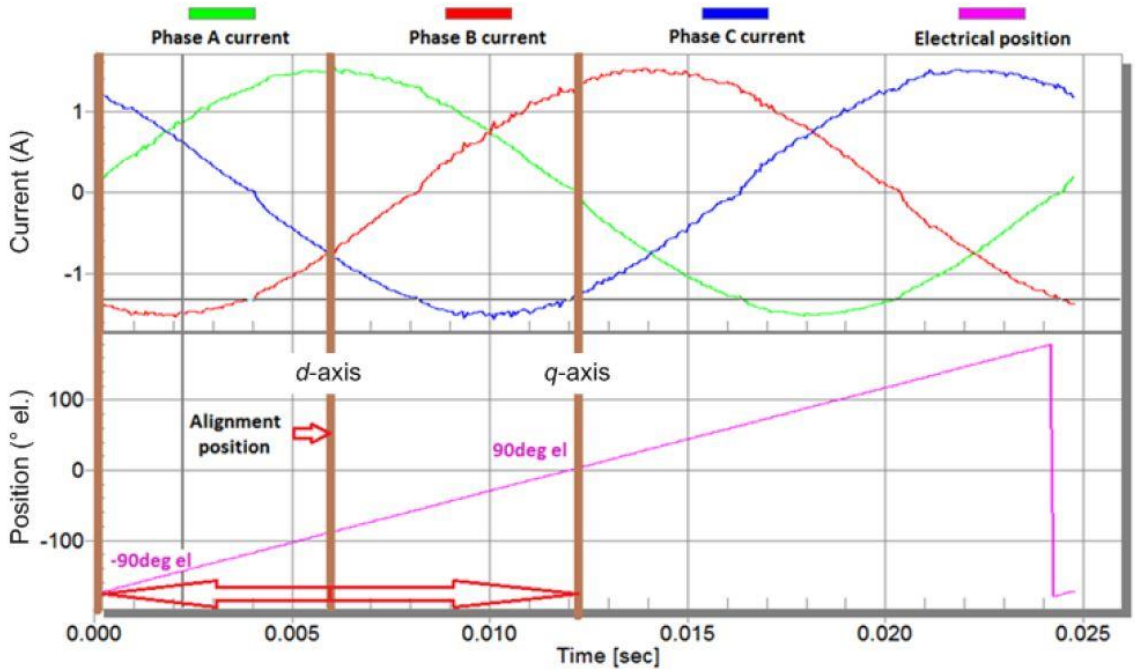
8.2.1 Μέτρηση αντίστασης και αυτεπαγωγής

Μέθοδος 3η - Τροφοδοτικό και Παλμογράφος

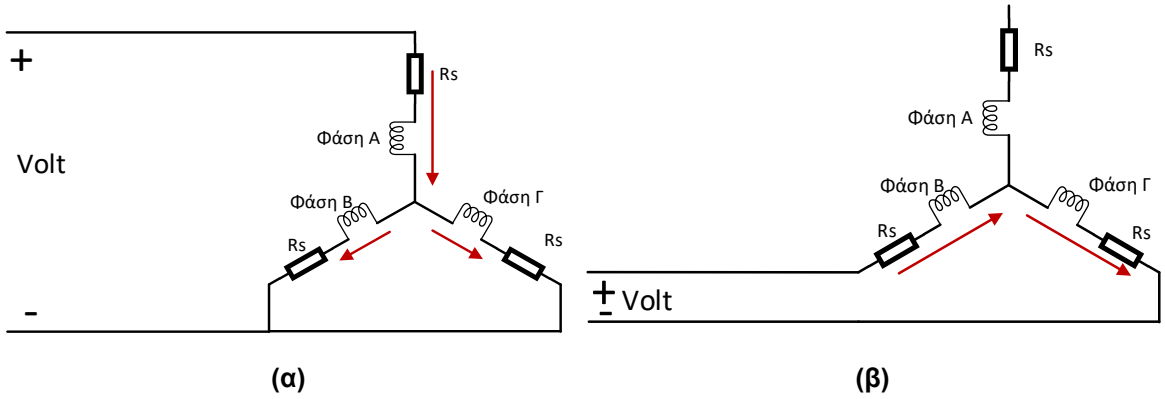
Αν βέβαια δεν υπάρχουν ειδικοί ελεγκτές σαν αυτόν της Texas Instruments για τον οποίο μιλήσαμε προηγουμένως και ο οποίος έχει ενσωματωμένο μικροελεγκτή που μπορεί να προγραμματιστεί κατάλληλα προκειμένου να γίνει ταυτοποίηση του κινητήρα ή δεν υπάρχει RLC meter τότε κάποιος, θα μπορούσε και πάλι να υπολογίσει την αυτεπαγωγή του κινητήρα, χρησιμοποιώντας ένα τροφοδοτικό και ένα παλμογράφο για την καταγραφή του ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα, χρειάζεται να ακολουθήσει μία διαδικασία σαν αυτή που ακολουθείται στο [48] ή στο [83] όπου η ανάλυση γίνεται για σύνδεση αστέρα, βλ. Σχήμα 8-16, αλλά ισχύει και για σύνδεση τριγώνου, βλ. Σχήμα 8-17.

Στην περίπτωση της σύνδεσης αστέρα, κατά την μέτρηση ο κινητήρας είναι ακίνητος και επενεργούμε κατάλληλα σε συγκεκριμένους ακροδέκτες του κινητήρα προκειμένου να επενεργήσουμε τις φάσεις, όπως φαίνονται στο Σχήμα 8-16, ενώ ο δρομέας αυτού είναι ηλεκτρομαγνητικά κλειδωμένος και ακίνητος. Όταν επενεργούμε στη φάση Α του κινητήρα, βλ. Σχήμα 8-15, ο δρομέας κλειδώνει σε μία θέση και ο direct άξονας είναι ευθυγραμμισμένος με την φάση Α. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε το μέγεθος L_d. Βλέπουμε στο Σχήμα 8-16, ότι για να ευθυγραμμιστεί ο direct άξονας με την φάση Α πρέπει να επενεργούμε με τον θετικό πόλο του τροφοδοτικού στον κατάλληλο ακροδέκτη ώστε από την φάση Α, να έχουμε το περισσότερο ρεύμα και από την φάση Β και Γ, λόγω της ισορροπίας ρευμάτων του κινητήρα, βλ. Εξ. (8-1), να έχουμε τα ρεύματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-15. Από το Σχήμα 8-15, βλέπουμε επίσης, ότι για να πετύχουμε ευθυγράμμιση της φάσης Α με τον quadrature άξονα και να

υπολογίσουμε το μέγεθος L_q πρέπει να δημιουργήσουμε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που να είναι στραμμένο κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες από την ευθυγράμμιση με τον direct άξονα, διατηρώντας όμως τον δρομέα στην ίδια θέση με πριν. Για να το πετύχουμε αυτό, βλ. Σχήμα 8-15, το ρεύμα στην φάση Β πρέπει να είναι θετικό, στην φάση Γ αρνητικό ενώ η φάση Α να μην διαρρέεται από ρεύμα. Αυτό επιτυγχάνεται με το τροφοδοτικό τοποθετώντας τον θετικό πόλο, στον ακροδέκτη της φάσης Β και τον αρνητικό πόλο στον ακροδέκτη της φάση Γ, βλ. Σχήμα 8-16β.



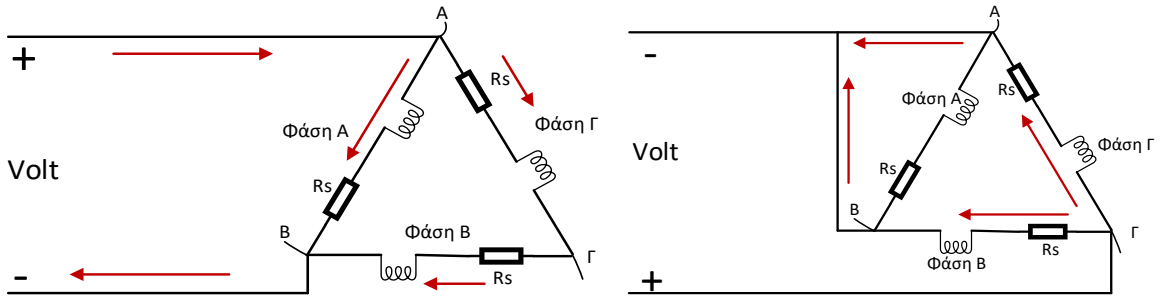
Σχήμα 8-15. Επενέργηση των φάσεων ενός κινητήρα χωρίς ψήκτρες για ευθυγράμμιση του direct/quadrature άξονα με μία από τις φάσεις του, εν προκειμένου της φάσης Α, [48].



Σχήμα 8-16. Το ηλεκτρικό κύκλωμα του κινητήρα για διάταξη αστέρα. (α) Έχουμε ευθυγράμμιση του direct άξονα με την Α φάση. (β) Ευθυγράμμιση μετά από 90 ηλεκτρικές μοίρες με τον quadrature άξονα.

Αν τώρα η διάταξη των φάσεων του κινητήρα δεν είναι αστέρα, αλλά τριγώνου όπως στην περίπτωση των κινητήρων T-motor U8, προκειμένου να πετύχουμε ευθυγράμμιση του direct άξονα και του quadrature άξονα με την φάση Α, θα πρέπει να λειτουργήσουμε με τον ίδιο γνώμονα που λειτουργήσαμε στην σύνδεση αστέρα, και να ακολουθήσουμε το Σχήμα 8-15. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε την αυτεπαγωγή Ld και την αυτεπαγωγή Lq αντίστοιχα, αρκεί απλά να συνδέσουμε διαφορετικά τον θετικό

και τον αρνητικό πόλο του τροφοδοτικού με τους αντίστοιχους ακροδέκτες του κινητήρα, βλ. Σχήμα 8-17.



(α) (β)

Σχήμα 8-17. Το ηλεκτρικό κύκλωμα του κινητήρα για διάταξη τριγώνου. (α) Έχουμε ευθυγράμμιση του direct άξονα με την Α φάση. (β) Ευθυγράμμιση μετά από 90 ηλεκτρικές μοίρες με τον quadrature άξονα.

Στο Σχήμα 8-17, βλέπουμε ότι, για να πετύχουμε ευθυγράμμιση του direct άξονα με την φάση Α, θα πρέπει να έχουμε στον θετικό πόλο τον ακροδέκτη Α και στον αρνητικό πόλο τον ακροδέκτη Β, ενώ τον ακροδέκτη Γ να μην τον συνδέσουμε. Επίσης, για να πετύχουμε ευθυγράμμιση της φάσης Α με τον quadrature άξονα, η φάση αυτή δεν πρέπει να διαρρέεται από ρεύμα και θα πρέπει να συνδέσουμε τον θετικό πόλο του τροφοδοτικού στον ακροδέκτη Γ και τον αρνητικό πόλο του τροφοδοτικού στους ακροδέκτες Α και Β ταυτόχρονα.

Τέλος ανεξάρτητα από το γεγονός αν έχουμε σύνδεση αστέρα ή τριγώνου, δημιουργώντας αυτά τα κυκλώματα και συνδέοντας το τροφοδοτικό, είναι σαν να έχουμε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα RL όπου έχουμε την απόκριση του ρεύματος σε βηματική είσοδο. Η εξίσωση του RL κυκλώματος είναι η κλασική εξίσωση απόκρισης συστήματος πρώτης τάξης και ουσιαστικά είναι η Εξ. (8-45), που προκύπτει από τις Εξ. (3-33) του κινητήρα αν αμελήσουμε τους όρους που συνδέονται με την ταχύτητα του δρομέα και την ΑΗΕΔ. Έτσι η απόκριση είναι η εξής εξίσωση:

$$i(t) = \frac{V}{R_{equiv}}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \tag{8-45}$$

Όπου τ είναι η χρονική σταθερά της απόκρισης και ισούται με:

$$\tau = \frac{L_{equiv}}{R_{equiv}} \tag{8-46}$$

Η μεταβλητή L_{equiv} και R_{equiv} είναι ουσιαστικά η ισοδύναμη αυτεπαγωγή και αντίσταση που προκύπτει από το κύκλωμα και στην περίπτωση που έχουμε ευθυγράμμιση της φάσης Α με τον direct άξονα είναι ίση με, βλ. Σχήμα 8-16α και Σχήμα 8-17α:

$$\begin{aligned} L_{equiv} &= \frac{3}{2}L_{ph} = \frac{3}{2}L_d \quad (\gamma\iota\alpha\ \alpha\sigma\tau\acute{\varepsilon}\rho\alpha) \ \ \& \ \ L_{equiv} = \frac{2}{3}L_{ph} = \frac{2}{3}L_d \quad (\gamma\iota\alpha\ \tau\rho\acute{\iota}\gamma\omega\nu o) \\ R_{equiv} &= \frac{3}{2}R_{ph} \quad (\gamma\iota\alpha\ \alpha\sigma\tau\acute{\varepsilon}\rho\alpha) \ \ \& \ \ R_{equiv} = \frac{2}{3}R_{ph} \quad (\gamma\iota\alpha\ \tau\rho\acute{\iota}\gamma\omega\nu o) \end{aligned} \tag{8-47}$$

Ενώ για τον quadrature άξονα είναι, βλ. Σχήμα 8-16β και Σχήμα 8-17β:

$$L_{equiv} = 2L_{ph} = 2L_q \quad (\gamma\iota\alpha\ \alpha\sigma\tau\acute{\varepsilon}\rho\alpha) \ \ \& \ \ L_{equiv} = \frac{1}{2}L_{ph} = \frac{1}{2}L_q \quad (\gamma\iota\alpha\ \tau\rho\acute{\iota}\gamma\omega\nu o)$$
$$R_{equiv} = 2R_{ph} \qquad (\gamma\iota\alpha\ \alpha\sigma\tau\acute{\varepsilon}\rho\alpha) \ \ \& \ \ R_{equiv} = \frac{1}{2}R_{ph} \qquad (\gamma\iota\alpha\ \tau\rho\acute{\iota}\gamma\omega\nu o) \tag{8-48}$$

Έτσι ανάλογα με την συνδεσμολογία που έχουμε μπορούμε να υπολογίσουμε τα μεγέθη της αντίστασης και της επαγωγής κάθε φάσης, [48]. Τέλος αν γνωρίζουμε εξ' αρχής την αντίσταση και την επαγωγή τότε αν εργαστούμε αντίστροφα με τον παραπάνω τρόπο μπορούμε να βρούμε **αν έχουμε σύνδεση αστέρα ή τριγώνου.**

8.2.2 Μέτρηση ΑΗΕΔ – τεχνητός κοινός κόμβος

Αν ένας κινητήρας με τρεις φάσεις και σύνδεση αστέρα, που όμως δεν έχει ακροδέκτη για το ουδέτερο σημείο, αν κατά την μέτρηση της ΑΗΕΔ θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε ένα τεχνητό ουδέτερο σημείο μπορούμε να το κάνουμε αν συνδέαμε τρεις αντιστάσεις σε σύνδεση αστέρα και ως τάση αναφορά για την μέτρηση από τον παλμογράφο είχαμε τον κεντρικό κόμβο της σύνδεσης αστέρα των αντιστάσεων. Παρακάτω μπορούμε να δούμε επίσης την συνδεσμολογία με τις αντιστάσεις. Φυσικά και στον κινητήρα με σύνδεση αστέρα μπορεί κάποιος να μετρήσει την τάση κάθε φάσης χωρίς να χρησιμοποιήσει κοινό κόμβο, απλά συνδέοντας ανά δύο ακροδέκτες και προκειμένου να βρεθεί η τάση φάση θα πρέπει να διαιρέσει με τον χαρακτηριστικό αριθμό $\sqrt{3}$, αφού η τάση γραμμής είναι μεγαλύτερη κατά $\sqrt{3}$ από την τάση φάσης.

(α) **(β)**

Σχήμα 8-18. (α) Συνδεσμολογία αστέρα με αντιστάσεις. (β) Η γείωση από το τους ακροδέκτες τοποθετείται στον κοινό κόμβο της σύνδεσης.

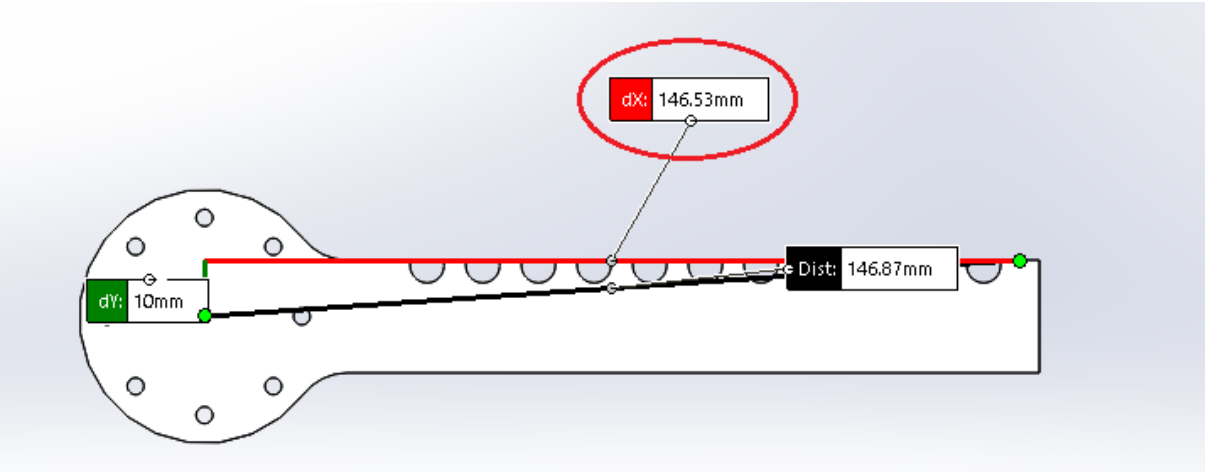
8.2.3 Μέτρηση σταθεράς ροπής

Μέθοδος 2η – Μοχλός και Ζυγαριά

Τη σταθερά ροπής του κινητήρα κάποιος, μπορεί κανείς να την υπολογίσει χρησιμοποιώντας μία διάταξη σαν και αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 8-22, όπου έχουμε συνδέσει ένα μοχλό στον κινητήρα και ασκούμε μία συγκεκριμένη ροπή στην ζυγαριά, την οποία υπολογίζουμε από την δύναμη που καταγράφει αυτή. Σε αυτές τις διατάξεις όμως προκειμένου να βρούμε την ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα πρέπει να έχουμε την ισορροπία ροπών από την οποία ισχύει ότι:

$$T_{H/M} + T_{\delta o\kappa o\acute{\upsilon}} = T_{\zeta\upsilon\gamma\alpha\rho\iota\acute{\alpha}\varsigma} + T_{\sigma\tau.\tau\rho\iota\beta\acute{\omega}\nu} \quad (8\text{-}49)$$

στην οποία βλέπουμε ότι για να μετρήσουμε την ηλεκτρομαγνητική ροπή $T_{H/M}$ και άρα την σταθερά ροπής του κινητήρα θα πρέπει να γνωρίζουμε, την ροπή της δοκού $T_{\delta o\kappa o\acute{\upsilon}}$ (γνωστή), το κέντρο μάζας προκύπτει από το CAD στο οποίο σχεδιάστηκε, βλ. Σχήμα 8-19, την ροπή εξόδου $T_{\zeta\upsilon\gamma\alpha\rho\iota\acute{\alpha}\varsigma}$ (ένδειξή της ζυγαριάς) και την ροπή των στατικών τριβών $T_{\sigma\tau.\tau\rho\iota\beta\acute{\omega}\nu}$.

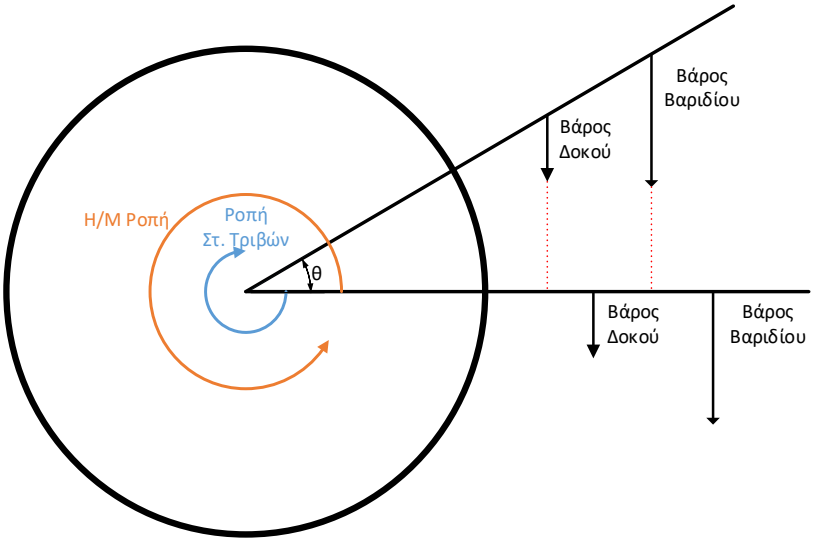


Σχήμα 8-19. Το κέντρο βάρος της δοκού υπολογισμένο στο CAD Solidworks.

Η τελευταία θα πρέπει να βρεθεί με πείραμα που περιγράφεται παρακάτω, ειδάλλως με αυτό το πείραμα κάποιος μπορεί συνδέσει το ρεύμα αναφοράς Iq με την ροπή εξόδου, συμπεριλαμβανομένου και των απωλειών.

Μέθοδος 3η – Μοχλός και βαράκια

Επίσης εκτός από ζυγαριά για τον προσδιορισμό της ροπής εξόδου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για το πείραμα, βαράκια, βλ. Σχήμα 8-23. Ουσιαστικά σε αυτό το πείραμα ο μοχλός έχει ειδικές διαμορφώσεις από τα 40mm στα 150mm με βήμα 10mm, και σε αυτά τοποθετούνται τα βαράκια, ασκώντας κάθετη δύναμη, βλ. Σχήμα 8-20. Στην αρχή του πειράματος έχοντας τοποθετήσει κάποια βαράκια, με τον κινητήρα σε λειτουργία, ο μοχλός ισορροπεί στην οριζόντια θέση. Εν συνεχεία, χωρίς κάτι να αλλάξει μετακινούμε τον μοχλό προς τα πάνω χειροκίνητα και τον αφήνουμε σε διάφορες θέσεις ενώ εκείνος συνεχίζει να ισορροπεί. Αυτό δεν θα έπρεπε να μας παραξενεύει παρόλο που η ροπή αντίστασης (ροπή βαριδιών και ροπή δοκού) στην επιβαλλόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή από τον κινητήρα μικραίνει, το καθαρό μήκος της άσκησης της ροπής για το ίδιο βάρος γίνεται πιο μικρό, βλ. Σχήμα 8-20, αφού αυξάνει η στατική τριβή. Αυτό όμως ισχύει μέχρι ένα σημείο όπου η στατική τριβή έχει φτάσει την μέγιστη τιμή της και δεν μπορεί να αυξηθεί άλλο και ως εκ τούτου ο κινητήρας αρχίζει να κινείται. Τέλος για να υπολογίσουμε την ροπή από το βαρίδι και την δοκό χρειαζόμαστε μόνο την γωνιακή θέση θ, την οποία υπολογίζουμε από τον αισθητήρα θέσης.



Σχήμα 8-20. Διάγραμμα δυνάμεων και ροπών κατά την ισορροπία στο πείραμα με τα βαράκια.

Στο σημείο εκκίνησης ισχύει η Εξ.(8-50):

$$T_{H/M} - T_{\text{Μέγιστη}-\text{στ.τριβών}} = T_{\beta\alpha\rho\iota\delta\acute{\iota}ou} + T_{\delta o\kappa o\acute{\upsilon}} \tag{8-50}$$

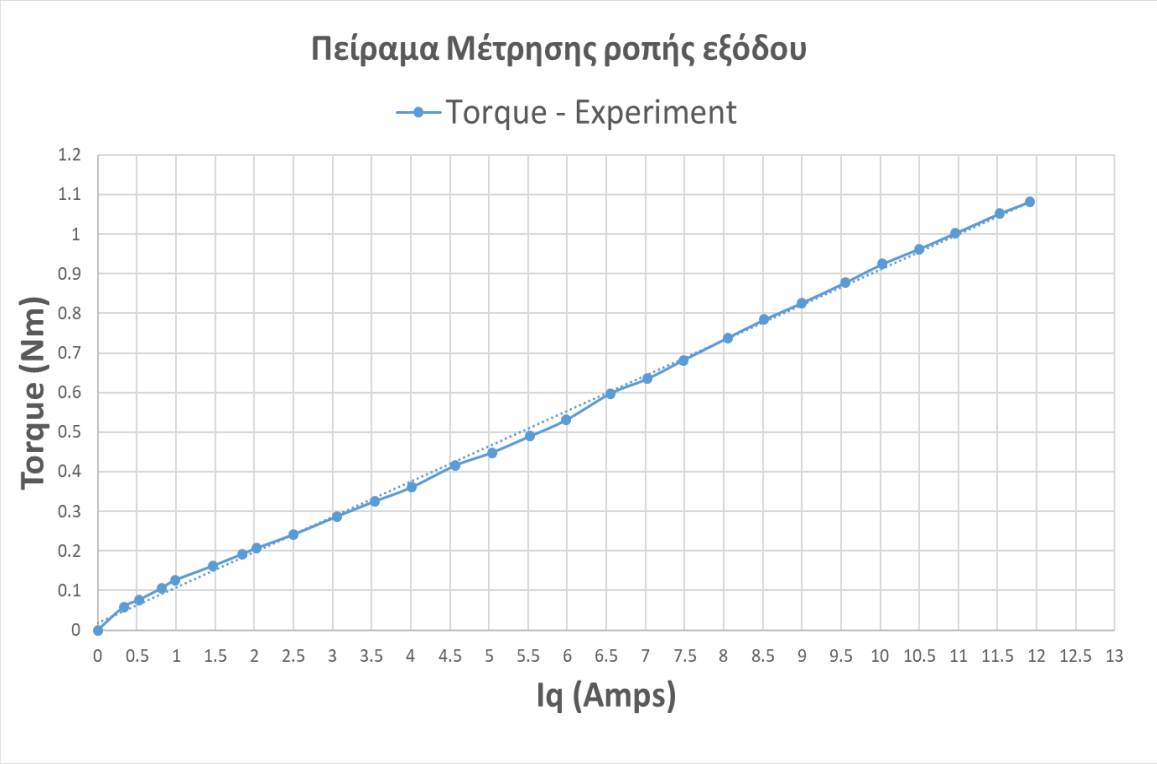
όπου $T_{\beta\alpha\rho\iota\delta\acute{\iota}ou}$ είναι η ροπή του βαριδίου. Αν γνωρίζουμε την μέγιστη στατική, μπορούμε να βρούμε την ηλεκτρομαγνητική ροπή, ειδάλλως κάποιος με αυτό το πείραμα βρίσκει την ροπή εξόδου σε συνάρτηση με το ρεύμα.

Γενικά σε αυτές τις δύο μεθόδους εστιάσαμε πιο πολύ στα ποιοτικά συμπεράσματα. Στο Σχήμα 8-21, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροπής εξόδου, ηλεκτρομαγνητικής ροπής συν τις στατικές τριβές, ως προς το ρεύμα Iq για τον κινητήρα U8 KV100. Σε αυτό βλέπουμε την σχεδόν γραμμική σχέση που υπάρχει μεταξύ της ροπής εξόδου του κινητήρα και του ρεύματος. Όσον αφορά τα αριθμητικά συμπεράσματα όμως σε αυτά παρουσιάστηκαν προβλήματα κατά την μέτρηση της ροπής, κυρίως στην ακρίβεια μέτρηση της δύναμης από την ζυγαριά, για την μέθοδο της ζυγαριάς και της γωνία που άρχιζε να κινείται ο κινητήρας στην περίπτωση των βαρδιών. Με αυτές τις μεθόδους πρέπει να γνωρίζουμε επίσης και την στατική τριβή του κινητήρα, η οποία είναι διαφορετική από θέση σε θέση του δρομέα και στην περίπτωση της μεθόδου με το βαρίδι εξαρτάται από το ίδιο βάρος του βαριδίου και την κάθετη δύναμη αντίδρασης που προκαλεί στα στοιχεία κύλισης του ρουλμάν του κινητήρα.

Παρ' όλα αυτά, αν σε περίπτωση που δεν υπάρχει παλμογράφος η μία άλλη μηχανή προκειμένου, η μια να εργάζεται ως γεννήτρια και η άλλη ως κινητήρας και ως εκ τούτου, δεν υπάρχει η δυνατότητα να πραγματοποιηθεί η 1η μέθοδος, βλ. Κεφάλαιο 4, με την οποία υπολογίζουμε την σταθερά ροπής του κινητήρα, τότε με αυτές τις δύο μεθόδους μπορούμε να έχουμε μία προσεγγιστική σχέση μεταξύ του ρεύματος και της ροπής που εξέρχεται. Τελικά, προέκυψε ο Πίνακας 8-2, από τον οποίο φαίνεται ότι οι τιμές σταθεράς ροπής, με τις συγκεκριμένες μεθόδους ήταν μικρότερες.

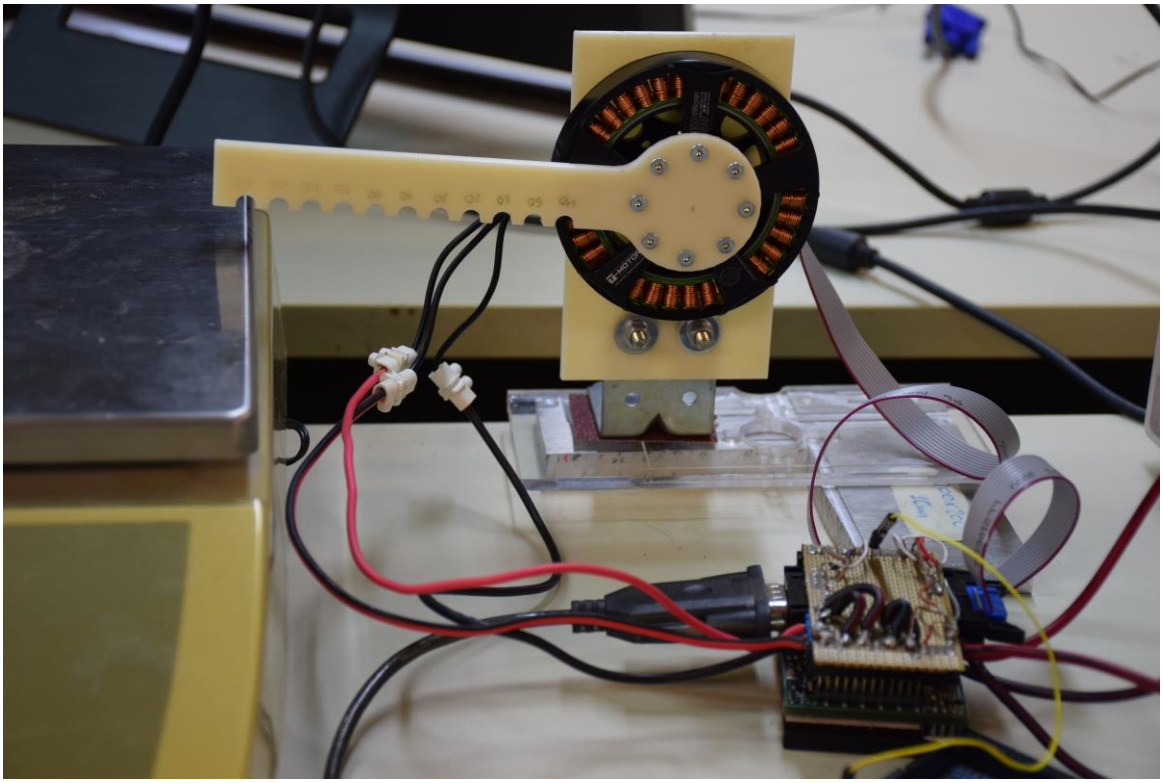
Πίνακας 8-2. Σταθερά ροπής κινητήρα (Μέθοδος 2η – 3η).

Τύπος Κινητήρα	T-motor U8KV100	T-motor U8KV135
Kt(Nm/Amps)	0.101	0.98

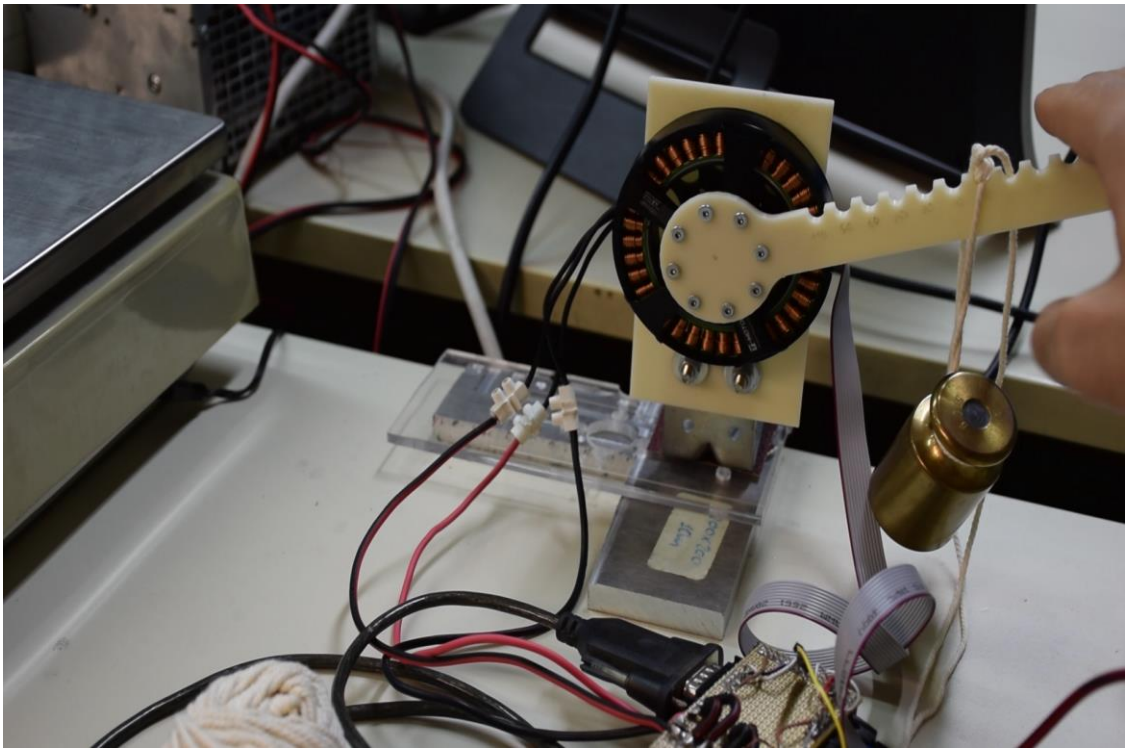


Σχήμα 8-21. Στο πείραμα αυτό μετρήθηκε η ροπή εξόδου του κινητήρα σε συνάρτηση με το ρεύμα. Παρατηρούμε την γραμμική συμπεριφορά του κινητήρα. Φυσικά στην μέτρηση της ροπής εδώ συμπεριλαμβάνονται και οι στατικές τριβές.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες και από τα δύο πειράματα που πραγματοποιήθηκαν.



Σχήμα 8-22. Πειραματική διάταξη ροπής μέσω ζυγαριάς.

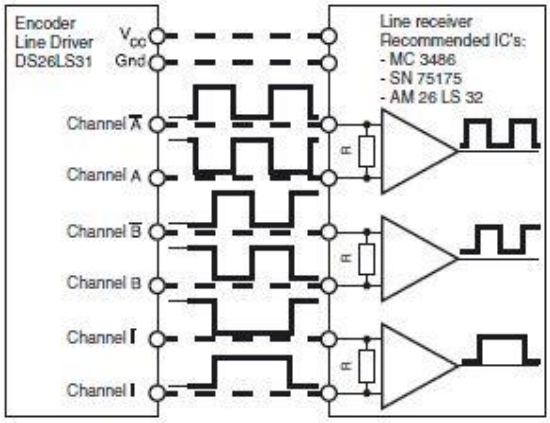


Σχήμα 8-23. Πειραματική διάταξη ροπής με την χρήση βαριδιών.

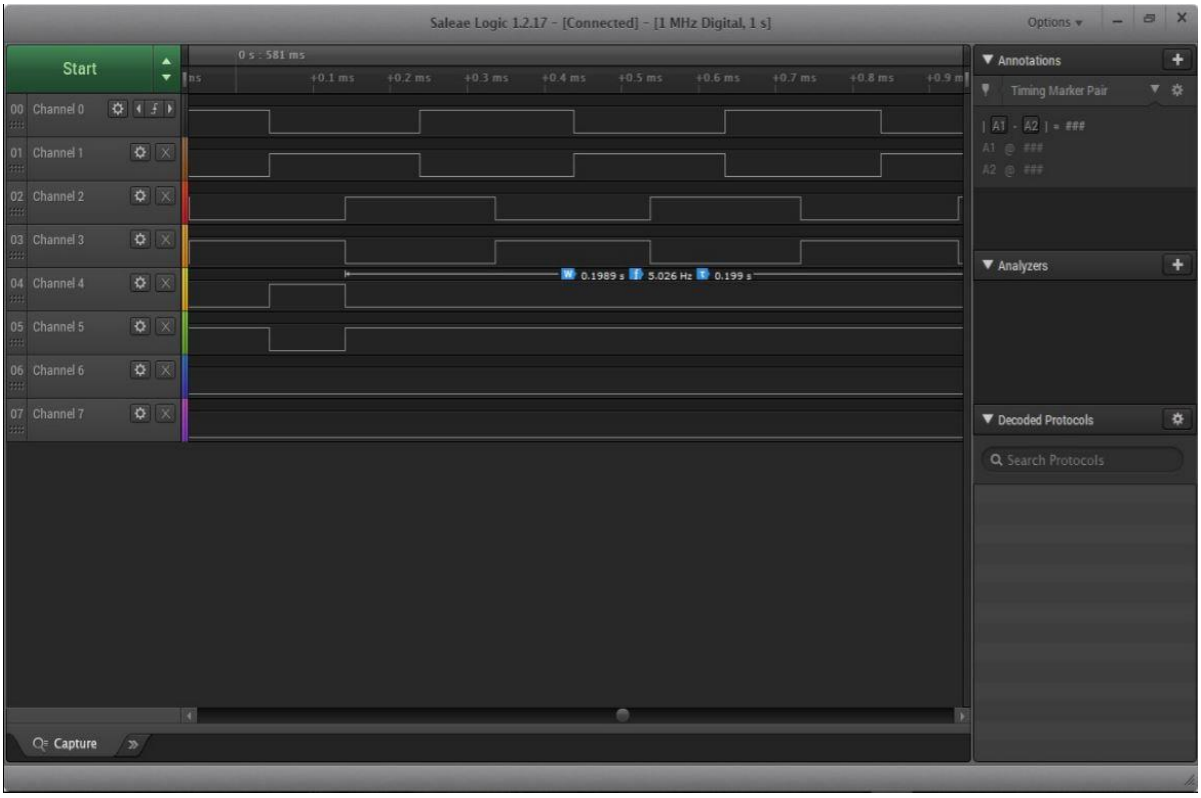
8.3 Hardware

8.3.1 Αισθητήρας θέσης και ταχύτητας

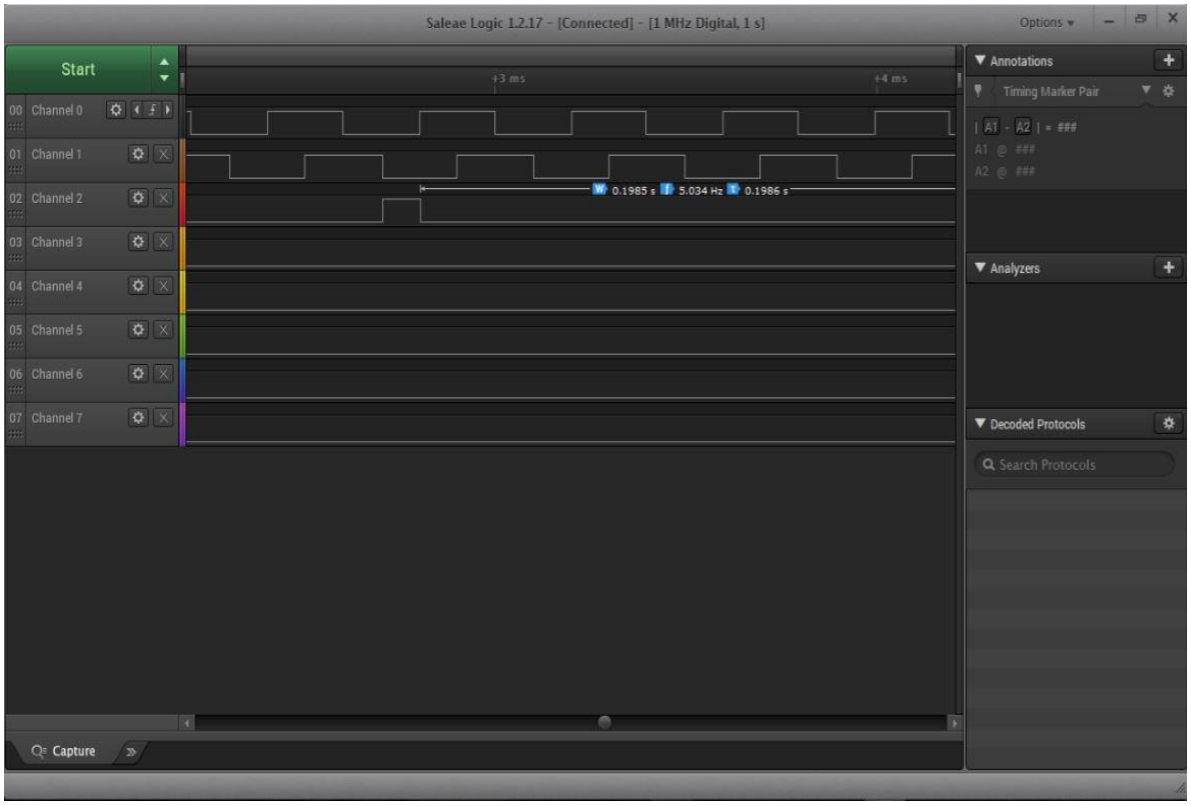
Η μέτρηση της ταχύτητας ή της θέσης σε διάφορα από τα πειράματα, έγινε μέσω του οπτικού κωδικοποιητή που είναι προσδεμένος στον δρομέα του κινητήρα. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας θέσης είναι της εταιρείας AVAGO και το μοντέλο είναι το HEDL 5640 A13. Παράγει 500 counts ανά περιστροφή και είναι quadrature δηλαδή παράγει και τα δύο σήματα A,B. Επίσης είναι differential – διαφορικός αφού εκτός από τα σήματα A,B,I παράγει και τα αντίθετά τους για την απομόνωση του ηλεκτρικού θορύβου, βλ. Σχήμα 8-24.



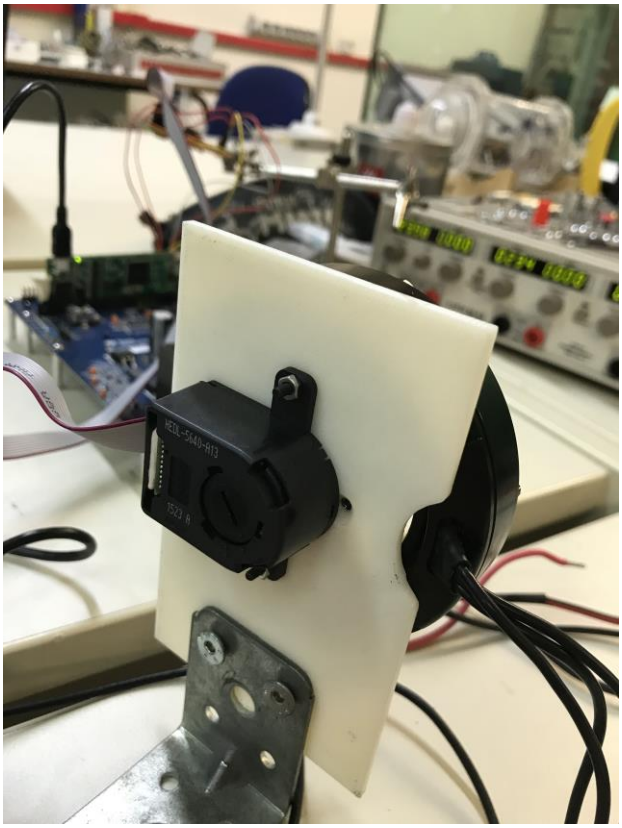
Σχήμα 8-24. Στη μέση της εικόνας είναι το διαφορικό σήμα που εξέρχεται από τον encoder και τα έξι κανάλια. Τα σήματα αυτά, σε περίπτωση που χρειαζόμαστε μονά σήματα και όχι διαφορικά περνούν από το line receiver, αποσβένοντας τον ηλεκτρικό θόρυβο, [39].



Σχήμα 8-25. Εικόνα από το σήμα του encoder χρησιμοποιώντας τον ψηφιακό παλμογράφο digital analyzer.

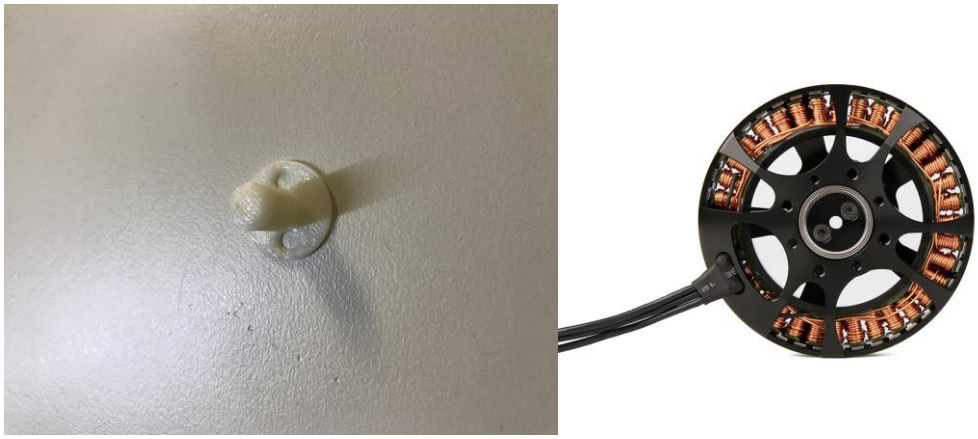


Σχήμα 8-26. Εικόνα από το σήμα του encoder μετά το line receiver χρησιμοποιώντας τον ψηφιακό παλμογράφο digital analyzer.



Σχήμα 8-27. Ο encoder HEDL 5640 A13 προσδεμένος στον κινητήρα για καταγραφή της θέσης του δρομέα. Η βάση στην οποία στηρίζεται ο κινητήρας είναι φτιαγμένη στον 3D printer του εργαστηρίου.

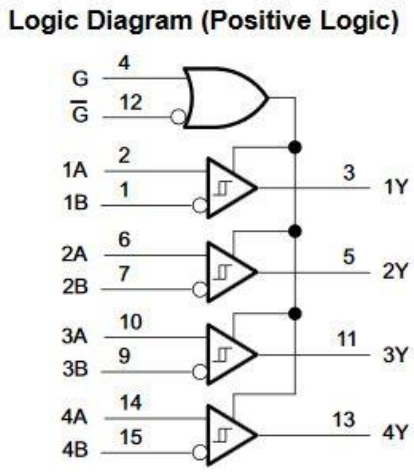
Προκειμένου να γίνει η σύνδεση του Encoder με τον κινητήρα, χρησιμοποιήσαμε τον άξονα που φαίνεται στο Σχήμα 8-28, και κατασκευάστηκε στον 3D printer.



Σχήμα 8-28. Άξονας ο οποίος συναρμολογείται στο πίσω μέρος του κινητήρα και στρέφει το εσωτερικό του encoder.

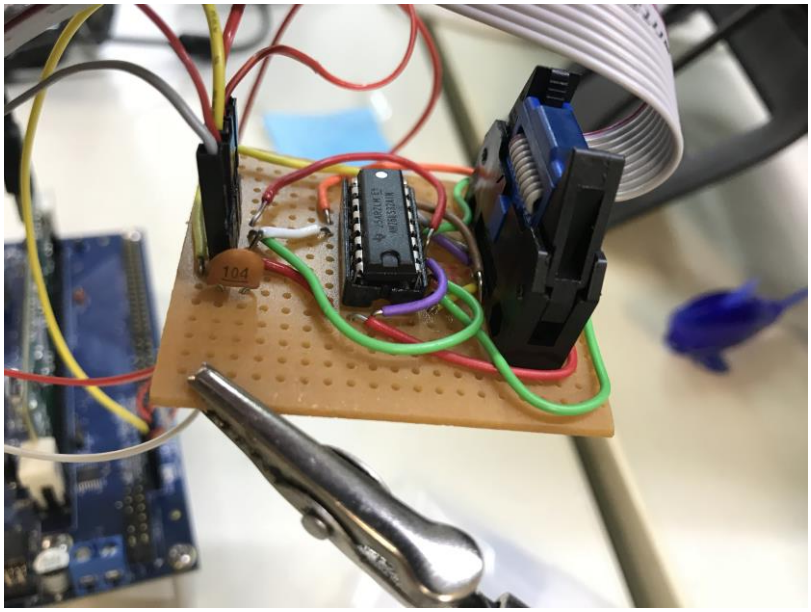
Η επεξεργασία του σήματος του encoder γίνεται στο board της Texas – Instruments DRV8301 – 69M, βλ. Σχήμα 4-8, αφού μέσω αυτού και του γραφικού περιβάλλοντος του Code-Composer μετράμε την ταχύτητα και την θέση. Το συγκεκριμένο board όμως δεν δέχεται το διαφορικό σήμα από τον encoder A^+, A^-, B^+, B^-, I^+, I^-, αλλά το μονό σήμα A, B, I και ως εκ τούτου η χρήση ενός line-receiver, βλ. Σχήμα 8-30 και Σχήμα 8-31, είναι απαραίτητη. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε τον line receiver AM26LS32, [76].Θα μπορούσε κανείς να τοποθετήσει μόνο τα A+, B+, I+ από τον encoder κατευθείαν αλλά έτσι δεν

θα μπορούσε να απομονωθεί ο έντονος θόρυβος και δεν θα κατάφερνε να διαβάσει σωστά το board το σήμα από τον encoder.

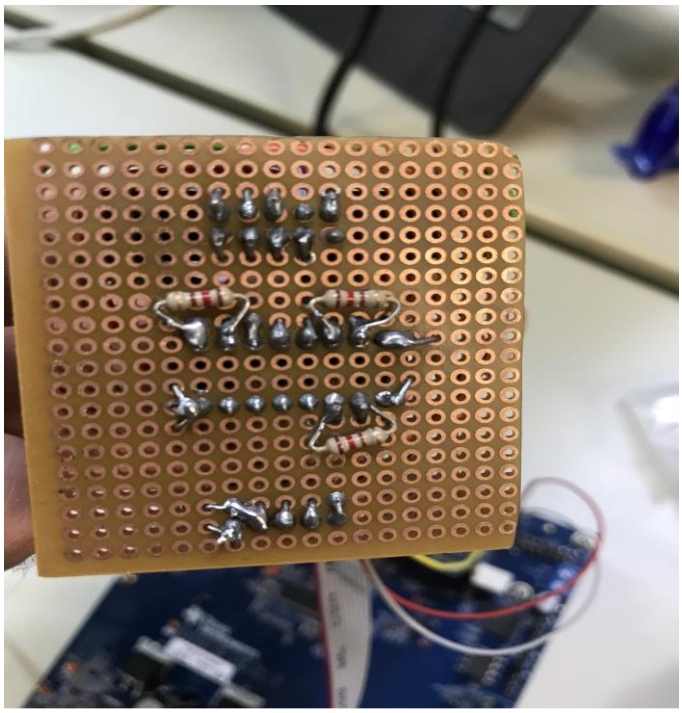


Σχήμα 8-29. Λογικό διάγραμμα line receiver.

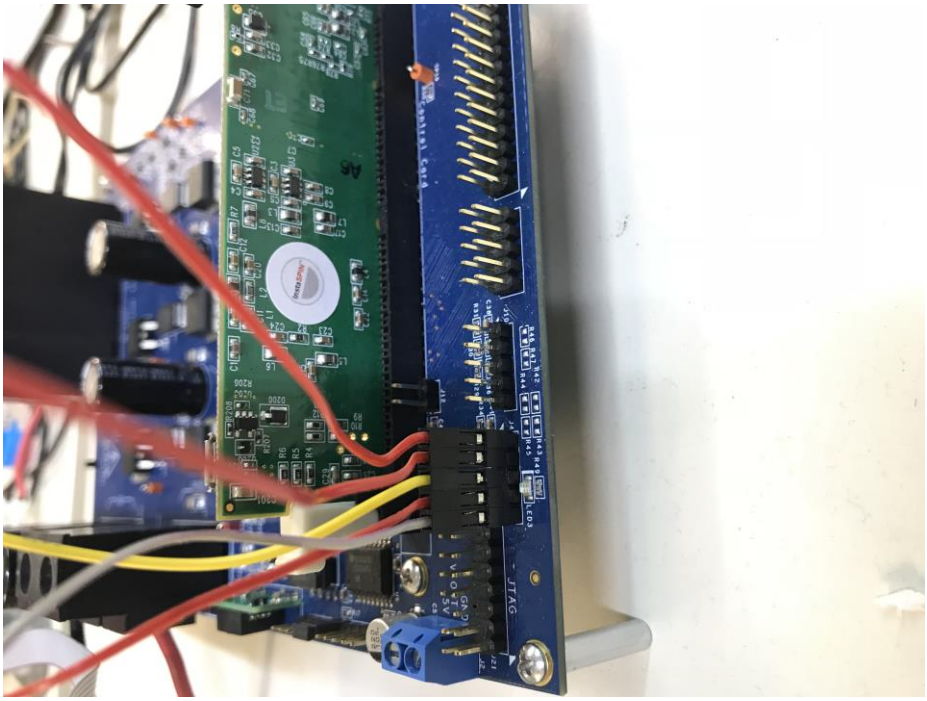
Το διάγραμμα στο Σχήμα 8-29, αποτελεί το ηλεκτρικό κύκλωμα του τσιπ AM26LS32 που απεικονίζεται στο Σχήμα 8-30. Ουσιαστικά στο διάγραμμα, όπου βλέπουμε A, τοποθετούμε το + από τα σήματα A, B, I του Encoder, ενώ όπου βλέπουμε B τοποθετούμε τα – σήματα. Το Y ουσιαστικά συμβολίζει το σήμα εξόδου από κάθε λογική πύλη. Προσοχή, αν συνδέσουμε ανάποδα τα + και – σήματα του Encoder με τα A και B του λογικού διαγράμματος στο Σχήμα 8-29, τότε θα έχουμε το αντίθετο αποτελέσματα στο σήμα εξόδου. Το σύμβολο G είναι απλά το σήμα, για την ενεργοποίηση του line receiver. Επειδή θέλουμε το κύκλωμα, μονίμως ενεργό το συνδέουμε με pull up resistor μονίμως στα 5V. Για επιπλέον κάλυψη από το θόρυβο καλό είναι να συνδεθεί και ένας πυκνωτής 10μF μεταξύ 5V και γείωσης καθώς και αντίσταση μεταξύ των εισόδων A και B, βλ. Σχήμα 8-30 και Σχήμα 8-31. Τέλος στο Σχήμα 8-32 βλέπουμε την σύνδεση του σήματος που εξέρχεται από τον line receiver στο board της TI.



Σχήμα 8-30. Κύκλωμα για εφαρμογή του line receiver και μετατροπή του διαφορικού σήματος σε μονό. Βλέπουμε την έξοδο του encoder δεξιά, τον line receiver στο κέντρο και αριστερά την έξοδο του σήματος η οποία καταλήγει στο board.



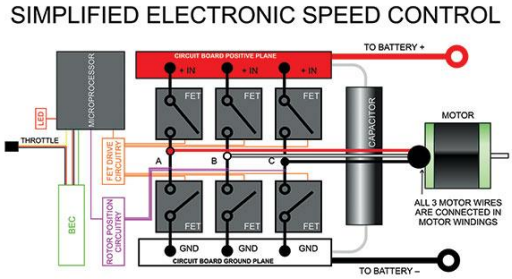
Σχήμα 8-31. Το κύκλωμα του line receiver όπως φαίνεται στην άνοψη. Φαίνεται ότι τοποθετούμε αντιστάσεις μεταξύ θετικού και αρνητικού σήματος του encoder για καλύτερη απόδοση και μείωση θορύβου.



Σχήμα 8-32. Τα καλώδια από την έξοδο του line receiver συνδέονται με το board της TI.

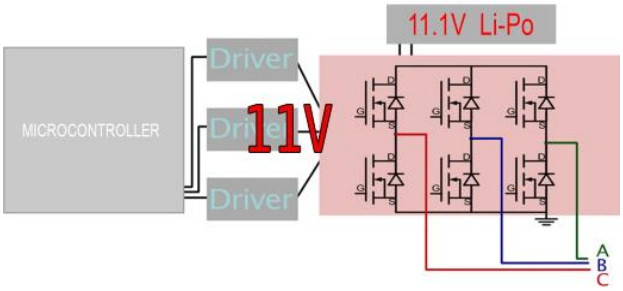
8.3.2 Electronic Speed Controller (ESC)

Συνήθως στην βιομηχανία των drones χρησιμοποιούνται οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες χωρίς αισθητήρα και με τραπεζοειδή οδήγηση. Επειδή στις συγκεκριμένες εφαρμογές γίνεται έλεγχος ταχύτητας στους συγκεκριμένους κινητήρες για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι λεγόμενοι Electronic Speed Controllers (ESCs). Στο Σχήμα 8-33 βλέπουμε την εσωτερική διάταξη ενός ESC.



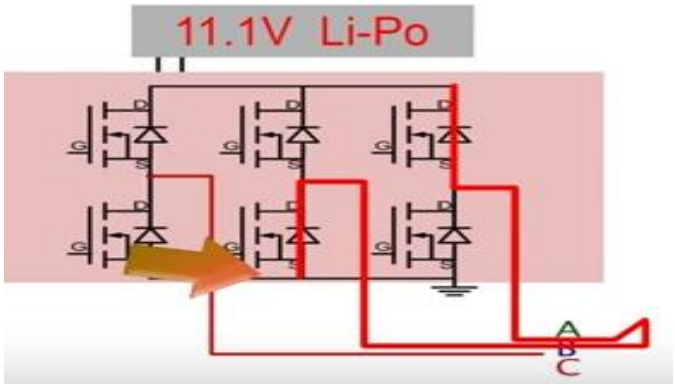
Σχήμα 8-33. Εσωτερική διάταξη των στοιχείων του ESC

Ουσιαστικά αυτά είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα τα οποία αποτελούνται από τον μικροελεγκτή (microcontroller – MCU), τα ηλεκτρονικά ισχύος που είναι ουσιαστικά τα τρανζίστορ (MOSFETs) και δουλεύουν ως διακόπτες και σχηματίζουν το λεγόμενο 3 phase H bridge όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-34 και τον ενισχυτή όπου ενισχύει το σήματα εξόδου του microcontroller στην τάση εκείνη με την οποία μπορούν να κάνουν ενεργή την λειτουργία του Mosfet αφού αυτή προκειμένου να λειτουργήσει χρειάζεται μία συγκεκριμένη τιμή τάσης.



Σχήμα 8-34. Προκειμένου να ανοίξουν τα mosfets πρέπει οι ακροδέκτες να έχουν μία συγκεκριμένη διαφορά τάσης.

Τα τρανζίστορ που βρίσκονται στην πάνω θέση συνδέονται με την υψηλή τάση, στην προκειμένη περίπτωση με 11.1Volt, ενώ τα κάτω συνδέονται στην γείωση. Αν για παράδειγμα θέλουμε να στείλουμε στην A είσοδο υψηλή τάση και στην B είσοδο χαμηλή πρέπει να ανοίξουμε την πύλη από αυτά τα δύο τρανζίστορς. Έτσι ρεύμα θα διατρέχει από το A και θα καταλήγει στο B όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-35. Έτσι βασικά πρέπει να ελέγχουμε 2 τρανζίστορ σε κάθε περίπτωση προκειμένου να έχουμε την κατάλληλη ακολουθία στον brushless motor.



Σχήμα 8-35. Το ρεύμα διαρρέει από το A στο B αφού πρώτα διαπεράσει μέσα από τις αντίστοιχες φάσεις του κινητήρα, [18].

Αν τώρα συνδέσουμε το ESC με το τροφοδοτικό ή με μία μπαταρία Lipo τότε η τάση που θα έχει ο κινητήρας και κατά συνέπεια και η ταχύτητά του θα καθορίζεται από το duty-cycle του σήματος PWM εξόδου του μικροελεγκτή προς τους drivers. Το σήμα αυτό είναι συνήθως στα 10 – 20KHz και το duty cycle καθορίζει το ποσοστό της τάσης π.χ. των 11.1V στο Σχήμα 8-34, που «θα βλέπει» ο κινητήρας. Αυτό που θέλει προσοχή να παρατηρήσουμε ότι για να ελέγξουμε το duty cycle αυτού του σήματος εξόδου από τον μικροελεγκτή στέλνουμε σήμα εισόδου σε αυτόν πάλι της μορφής PWM. Ουσιαστικά υπάρχουν διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας και είναι αυτά που φαίνονται παρακάτω.

1. Standard PWM – από 1,000 μs μέχρι 2,000 μs (slow)
2. OneShot 125 - από 125 μs μέχρι 250 μs
3. OneShot 42 - από 42 μs μέχρι 84 μs
4. MultiShot - από 5 μs μέχρι 25 μs

Αυτά τα πρωτόκολλα επικοινωνίας είναι ο τρόπος με τον οποίο ο flight controller (βιομηχανία drone), στην δική μας περίπτωση Arduino, επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή του ESC. Για παράδειγμα το πιο παλιό και απλό πρωτόκολλο επικοινωνίας είναι το Standard PWM, που εφαρμόζεται και στο ESC που χρησιμοποιήσαμε για τους κινητήρες T-motor U8, βλ. Σχήμα 8-36, στο οποίο ουσιαστικά ο μικροελεγκτής μετράει πόσο χρόνο είναι ON το PWM σήμα εισόδου (ουσιαστικά το μήκος του παλμού, 1ms – stop & 2ms full power) και ανάλογα με τον χρόνο αυτό αντιστοιχεί το duty cycle στο PWM σήμα εξόδου που αναφέραμε προηγουμένως για να ανοιγοκλείνει τα mosfets, συχνότητα kHz. Ουσιαστικά δηλαδή το duty cycle στο σήμα εξόδου του μικροελεγκτή καθορίζεται άμεσα από το πόσο χρόνο είναι ανοικτό ON το σήμα εισόδου και έμμεσα από την συχνότητα αυτού και το duty cycle αυτού. Για παράδειγμα για παλμό διάρκειας 2ms θέλουμε duty cycle 100% στα 500 Hz PWM ενώ στα 50Hz PWM θέλουμε 10% duty cycle.

Ο ESC με αυτό το πρωτόκολλο μπορεί να ανανεώνει την ταχύτητα του κινητήρα και άρα ενός drone ανά 2ms ή ισοδύναμα ανά 500Hz, πράγμα το οποίο το καθιστά μη ευέλικτο αφού η μεγαλύτερη συχνότητα ανανέωσης είναι τα 500Hz, [59]. Έτσι γι' αυτό η τεχνολογία προχώρησε στα πρωτόκολλα 2, 3, 4 που φαίνονται παραπάνω, στα οποία είναι αρκετά πιο γρήγορος ο ρυθμός ανανέωσης.

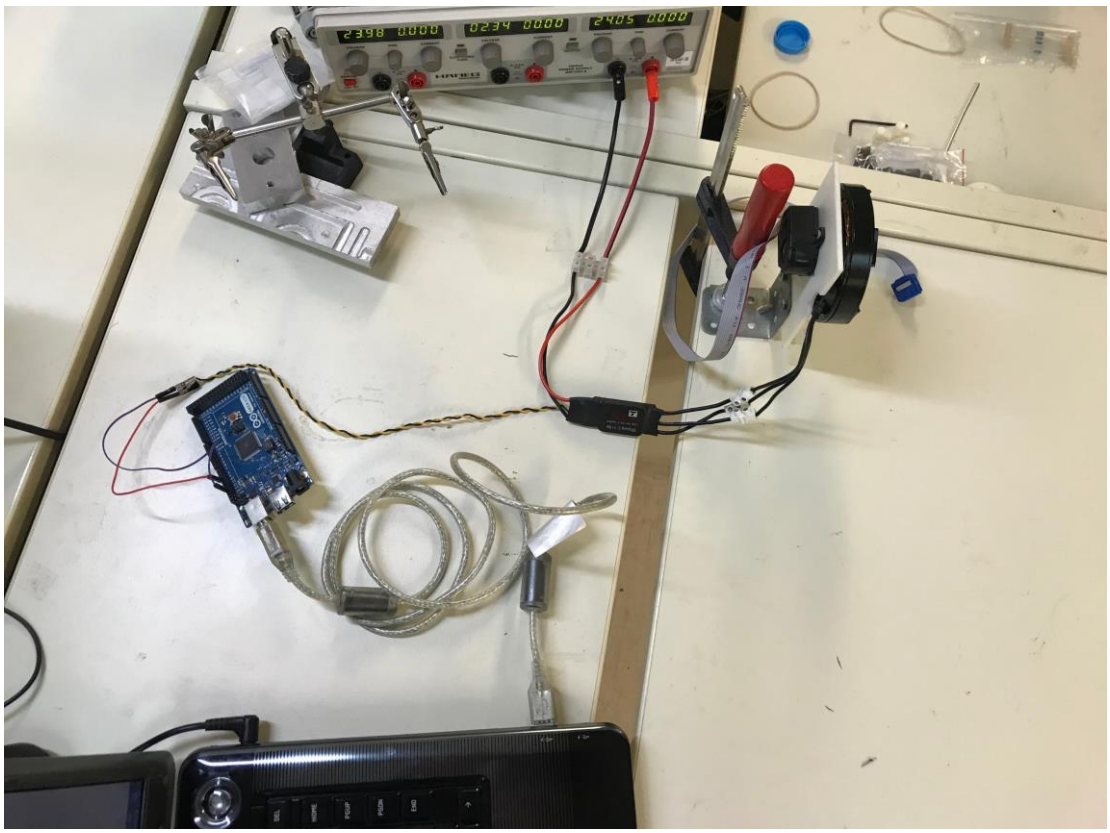
Σχήμα 8-36. ESC T-motor AIR 40Amps, [74].

Οι ESCs επίσης στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν προσφέρουν δυνατότητα αλλαγή φοράς της περιστροφής του κινητήρα παρά μόνο αν αλλάξουμε φορά στα καλώδια του κινητήρα. και περιορίζονται μόνο στο να λειτουργούν τον κινητήρα σε μία κατεύθυνση. Τις δυνατότητες στο ESC τις καθορίζει ουσιαστικά το «μυαλό» του, δηλαδή το πρόγραμμα που είναι εγκατεστημένο στον μικροελεγκτή firmware και καθορίζει την λειτουργία του ανάλογα με το σήμα εισόδου που αναφέραμε προηγουμένως. Για παράδειγμα σε μία περίπτωση όπου το ESC προσφέρει λειτουργία και ως προς

τις δύο κατευθύνσεις, το 1ms μπορεί να μην αντιστοιχεί στο stop, αλλά στο full power της αντίθετης κατεύθυνσης. Μερικά από τα firmwares τα οποία μπορείς να προγραμματίσεις προκειμένου να αλλάζουν την φορά περιστροφής μέσω εντολής είναι τα παρακάτω.

1. BL Heli_S ESC [29]
2. SimonK ESC

Επίσης τα ESCs στα remote control cars (RC cars) προσφέρουν δυνατότητα και για λειτουργία σε 4 quadrant αφού σε αυτά είναι απαραίτητο να έχουμε και φρένο. Σε αυτή την περίπτωση, θα είχαμε το λεγόμενο complementary switching στα τρανζίστορ. Για περισσότερες πληροφορίες κάποιος μπορεί να εστιάσει στο αρχείο, [46].



Σχήμα 8-37. Στην εικόνα αυτή έχουμε την διάταξη για την λειτουργία του κινητήρα T-motor U8.

Τέλος έχουμε στην εικόνα που παρουσιάζουμε την συνδεσμολογία του ESC που απεικονίζεται στο Σχήμα 8-37, με τον κινητήρα. Επίσης δεν χρησιμοποιήσαμε κάποιο flight controller για την λειτουργία του κινητήρα αλλά το PWM σήμα εισόδου στον μικροελεγκτή, όπως αναφέραμε παραπάνω το παρήγαμε από το Arduino Mega που επίσης φαίνεται στην εικόνα. Ένα pin του Arduino ήταν συνδεμένο και παρήγαμε το PWM σήμα και το άλλο ήταν στη γείωση. Επίσης βλέπουμε πως το ESC είναι συνδεδεμένο και στο τροφοδοτικό μέσω των δύο πιο χοντρών καλωδίων (μαύρο και κόκκινο) και στον κινητήρα μέσω των τριών καλωδίων.

8.3.3 Θερμική Κάμερα

Όσον αφορά τα όργανα μέτρησης θα πρέπει να κάνουμε κάποιες παρατηρήσεις. Αρχικά έχουμε την θερμική κάμερα όπου όπως αναφέραμε χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να μετρήσουμε την

θερμοκρασία του κινητήρα είτε του board. Η θερμική κάμερα μας έδωσε την δυνατότητα να μετρήσουμε την θερμοκρασία του κινητήρα έχοντας κάποια απόσταση από αυτόν και με ακρίβεια.

Μία θερμική κάμερα μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί για να προκύψουν και κάποια ποιοτικά χαρακτηριστικά όπως αυτά που αναφέραμε προηγουμένως όπου παρατηρήσαμε ότι επενεργείτε κάθε φορά μία φάση του κινητήρα όπως περιμέναμε. Επίσης μας έδωσε και την δυνατότητα να δούμε από την θερμική κάμερα την διάταξη των φάσεων του κινητήρα. Για παράδειγμα μπορούμε να παρατηρήσουμε από την φωτογραφία παραπάνω ότι τα 36 πηνία δια μερίζονται σε 6 εξάδες και σε κάθε εξάδα έχουμε την εξής σειρά φάσεων AA – BB - CC.

Μία θερμική κάμερα όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να βγούμε και ποσοτικά συμπεράσματα. Προκειμένου όμως να γίνει αυτό σε αντίθεση με τα ποιοτικά πρέπει να υπάρχει ακρίβεια στην μέτρηση. Οι θερμικές κάμερες ουσιαστικά **μετρούν ακτινοβολία**, υπέρυθρη ακτινοβολία για την ακρίβεια, εκμεταλλευόμενες το γεγονός πως όλα τα σώματα με θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος υπέρυθρης ακτινοβολίας ανάλογα με το υλικό και την επιφάνεια. Προκειμένου όμως οι θερμικές κάμερες να μετατρέψουν την θερμική ακτινοβολία σε θερμοκρασία χρησιμοποιούν την Εξ. (8-51).

$$W_{tot} = \varepsilon\tau W_{obj} + (1-\varepsilon)\tau W_{amb} + (1-\tau)W_{atm} \tag{8-51}$$

Όπου ε ονομάζεται **συντελεστής εκπομπής(emissivity)** και είναι ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας ενός σώματος, τ είναι η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας, W_{obj} είναι η ακτινοβολία που εκπέμπει το μέλαν σώμα με βάση το οποίο έχει βαθμονομηθεί η θερμική κάμερα, ρ=1-ε είναι η δυνατότητα αντανάκλασης που έχει το σώμα του οποίου μετράει την θερμοκρασία η θερμική κάμερα, W_{amb} είναι η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα γύρω σώματα του αντικειμένου και W_{atm} η ακτινοβολία που μετράει η θερμική κάμερα και έρχεται κατευθείαν από το περιβάλλον.

Ο χρήστης όμως προκειμένου να εκμεταλλευτεί την θερμική κάμερα πρέπει να ρυθμίσει δύο παραμέτρους για να δείξει την θερμοκρασία με ακρίβεια και οι οποίες είναι **η Emissivity (ε) και η θερμοκρασία ανάκλασης – Temperature reflection(Tref).**

Όπως είπαμε οι θερμικές κάμερες είναι βαθμονομημένες με βάση το μέλαν σώμα, το οποίο όπως γνωρίζουμε και από τις αρχές της μεταφοράς θερμότητας είναι έχει συντελεστή εκπομπής ε=1 και καθόλου δυνατότητα αντανάκλασης της ακτινοβολίας. Όλα τα πραγματικά υλικά όμως όπως και τα πηνία του κινητήρα αποτελούν πραγματικά σώματα και ως εκ τούτου χαρακτηρίζονται, σε κάθε τμήμα του μήκους κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας, από έναν **συντελεστή εκπομπής**. Τα πηνία του κινητήρα όπως αναφέραμε και παραπάνω έχουν και ειδική μόνωση προκειμένου να μην έρθουν σε επαφή και γίνει βραχυκύκλωμα. Για την μόνωση αυτή υπάρχει ειδική ταξινόμηση όπου κάθε τάξη (class) χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένα υλικά μόνωσης και μέγιστης θερμοκρασίας. Ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας των υλικών, που χρησιμοποιείται σαν μόνωση κλάσης F είναι σταθερός για φάσμα τιμών 0°C – 100°C και για μήκη κύματος 8-14μm, [71]. Τυπικές τιμές αυτών των υλικών είναι 0.92-0.96. Γενικά βέβαια μπορεί κάποιος να ανατρέξει σε καταλόγους σχετικούς ώστε να βρει συγκεκριμένα για το υλικό της μόνωσης που έχει. Αν όμως θέλουμε να σιγουρευτούμε ότι επιλέξαμε σωστά τον συντελεστή εκπομπής επειδή μπορεί να μην γνωρίζουμε με ακρίβεια το υλικό που έχουμε, μπορούμε να συγκρίνουμε την θερμοκρασία που μετράει η κάμερα, με την θερμοκρασία που μετράει ένα άλλο μετρητικό όργανο όπως το θερμοστοιχείο που αναφέραμε προηγουμένως και να ελέγξουμε

αν προβάλουν τις ίδιες θερμοκρασίες. Παρακάτω φαίνεται η εικόνα στο Σχήμα 8-38, όπου κατά την διάρκεια του πειράματος όπου επιλέχθηκε να ορισθεί το emissivity στο ε=0.93 και στην οποία παρατηρούμε την ίδια θερμοκρασία από τα δύο μετρητικά όργανα, θερμοκρασία 98ºC. Καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος γινόταν έλεγχος αν τα δύο όργανα δείχνουν την ίδια θερμοκρασία και το αποτέλεσμα ήταν πολύ κοντινό για τον συγκεκριμένο συντελεστή εκπομπής. Από την εικόνα του της θερμικής κάμερας μπορούμε να δούμε επίσης ότι η μέγιστη θερμοκρασία που έχουν κάποια σημεία από τα πηνία είναι 101 αλλά στο σημείο που έχουμε στοχεύσει με το spot είναι 98 βαθμούς επαληθεύοντας το γεγονός πως ακόμα και το ίδιο πηνίο κατά μήκος να παρουσιάζει διαφορετικές θερμοκρασίες.

Όσον αφορά την **θερμοκρασία ανάκλασης** που άλλες φορές ονομάζεται εμφανής ανακλώμενη θερμοκρασία, [54] αποτελεί ουσιαστικά μέγεθος με το οποίο χαρακτηρίζεται η ποσότητα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τα αντικείμενα γύρω από το αντικείμενο στόχο και αντανακλάται πάνω στο αντικείμενο στόχο. Είναι δηλαδή η φαινομενική θερμοκρασία των αντικειμένων, που έχει σαν αποτέλεσμα η ακτινοβολία τους να ανακλάται πάνω στο αντικείμενο στόχο και αντιστοιχεί στο μέγεθος W_{amb} της Εξ. (8-51).

Σχήμα 8-38. Σύγκριση της θερμοκρασίας μεταξύ της θερμικής κάμερας με την θερμοκρασία από το θερμοστοιχείο που είναι προσδεμένο στα πηνία του στάτη για σωστή ρύθμιση της πρώτης.

Παρατήρηση: Θεωρούμε ότι η θερμοκρασία αυτή είναι ίδια σε όλες τις επιφάνειες που εκπέμπουν και είναι μέσα στο ημισφαίριο που φαίνεται από ένα σημείο του αντικείμενου στόχου, [19].

Γενικά όσο μεγαλύτερος είναι ο **συντελεστής εκπομπής** μίας επιφάνειας τόσο μικρότερη επίδραση έχει αυτό το μέγεθος στην ακρίβεια της μέτρησης της θερμοκρασίας αφού η ακτινοβολία που εκπέμπουν τα τριγύρω σώματα πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστής ανάκλασης της επιφάνειας στόχου, που αυτός ισούται με r=1-ε. Άρα όσο πλησιέστερα στην μονάδα είναι ο **συντελεστής**

εκπομπής του στόχου τόσο μικρότερη είναι η δυνατότητα αντανάκλασης και άρα τόσο μικρότερη επίδραση έχει αυτή η παράμετρος στην μέτρηση της θερμοκρασίας.

Τέλος όταν είναι ο συντελεστής εκπομπής μίας επιφάνειας είναι μικρός τότε αυτό από μόνο του δυσκολεύει την μέτρηση της θερμοκρασίας μίας επιφάνειας και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές για την βελτίωση της μέτρησης. Μία από τις τεχνικές που χρησιμοποιείται μάλιστα και στα PCB που αποτελούνται από διαφορετικά εξαρτήματα(αντιστάσεις, τρανζίστορς κ.λπ.) είναι η χρήση προσωρινών μονωτικών ταινιών με σκοπό την αύξηση του συντελεστή εκπομπή. Στην φωτογραφία, βλ. Σχήμα 4-35β, που μετριέται η θερμοκρασία στο board της Texas Instruments χρησιμοποιήθηκε αυτή η τεχνική και ο συντελεστής εκπομπής ρυθμίστηκε στο ε=0.93.

Κλείνοντας το κεφάλαιο έχουμε κάποιες συνοπτικές ο συνοπτικές εξηγήσεις όσον αφορά τις τεχνικές μόνωσης.

1. **Μόνωση κατηγορίας Y:** Αντέχει θερμοκρασία μέχρι 90°C. Συνήθως κατασκευασμένο από βαμβάκι, μετάξι ή χαρτί.
2. **Μόνωση κατηγορίας A:** Αντέχει θερμοκρασία μέχρι 105°C. Είναι ενισχυμένα υλικά κλάσης-Y με εμποτισμένο βερνίκι ή μονωτικό λάδι.
3. **Μόνωση Κατηγορίας-E:** Αντέχει θερμοκρασία μέχρι 120°C.
4. **Μόνωση κατηγορίας B:** Αντέχει θερμοκρασία μέχρι 130°C. Αυτό έχει μια μορφή που το ανόργανο υλικό γίνεται πιο σκληρό με κόλλες. Αυτός είναι ο πρώτος μονωτήρας που χρησιμοποιεί αυτό δομή.
5. **Μόνωση κατηγορίας F:** Αντέχει ένα θερμοκρασία μέχρι 155°C για παράδειγμα, έγινε των υλικών της κλάσης B που αναβαθμίζονται με συγκολλητικά, σιλικόνη και βερνίκια αλκυδικής ρητίνης υψηλότερη θερμική αντοχή.
6. **Μόνωση κατηγορίας H:** Αντέχει θερμοκρασία μέχρι 180°C.

8.4 Software

8.4.1 Κώδικας για το έλεγχο του ESC μέσω Arduino

```
#include <PWM.h> // Library to be able to change the default available
frequency of the PWM Arduino signal

int escPin = 11;
int throttle = 127; // Initial maximum speed
int throttleOLD = 0;
int32_t frequency = 500; // frequency of PWM(in Hz)
int32_t freqval = 100;


void setup() {
 Serial.begin(9600); // Initialize serial connection baud rate with the pc
 Serial.setTimeout(500); // Sets the milliseconds to wait for serial.data
when using functions like Serial.parseInt

 InitTimersSafe(); //initialize all timers except for 0, to save time
keeping functions
//sets the frequency for the specified pin
 bool success = SetPinFrequencySafe(escPin, frequency);
//if the pin frequency was set successfully, pin 13 turn on
 if(success) {
```

```
 pinMode(13, OUTPUT);
 digitalWrite(13, LOW);
 }
//Verify that Timer's 1 Frequency has changed
 freqval = Timer1_GetFrequency();
 Serial.print("Timer's 1 frequency is: ");
 Serial.print(freqval);
 Serial.print("\n\n");

// Throttle Calibration
// Write a maximum value (most ESCs require this correct startup)
 pwmWrite(escPin, throttle);


// Description in Monitor
 Serial.print("Turn on the ESC (Connect to the LIPO)");
 Serial.print("\n");
 Serial.print("After the motor emits 2 short 'BEEP - BEEP' put 0(Throttle
to the bottom) in 3 seconds");
 Serial.print("\n");
 Serial.print("Turn off the ESC (Disconnect to the LIPO)");
 Serial.print("\n\n");
// ESC Programming
 Serial.print("ESC Programming - (Throttle to the bottom, Intermediate
Timing & High Timing)");
 Serial.print("Turn on the ESC (Connect to the LIPO)");
 Serial.print("\n");
 Serial.print("After the motor emits 3 short 'BEEP - BEEP -
BEEP'(Intermediate Timing) put 0(Throttle to the bottom) in 3 seconds");
 Serial.print("\n");
 Serial.print("After the motor emits 4 short 'BEEP - BEEP - BEEP -
BEEP'(High Timing) put 0(Throttle to the bottom) in 3 seconds");
 Serial.print("\n\n");

}

void loop() {
// Encoder feedback void
// Wait for some input
 while (!Serial. Available()) {}
// Speed Modification

 // Print it out
 Serial.print("Input your duty-cycle % (1 - 254 ) for PWMOUT1: ");
 throttleOLD = throttle; // For changeThrottle() function. TrottleOLD
variable is used in order to change duty cycle gradually
 // Read the new throttle value
 /* You send characters-bytes via Serial Monitor, use Serial.ParseInt()
 and normalizeThrottle() in order to be normalized as throttle(duty
cycle)*/
 throttle = normalizeThrottle(Serial.parseInt()) ;
 // Print it out
 Serial.println(throttle);
 pwmWrite(escPin,throttle);
 // Change throttle to the new value
 // changeThrottle(throttle,throttleOLD);
}

//void changeThrottle(int throttle,int throttleOLD) {
//
//// Are we going up or down?
```

```
// int step = 1;
// if( throttle < throttleOLD )
// step = -1;
//
//// Slowly move to the new throttle value
// while(throttleOLD != throttle) {
// throttleOLD += step;
// Serial.print("Duty-cycle % (0 - 255 ) for PWMOUT1 is: ");
// Serial.print(throttleOLD);
// Serial.print("\n");
// pwmWrite(escPin,throttleOLD);
//// delay(throttleChangeDelay); //This delay is intended for protection
// }
//
//}

// Ensure the throttle value is between 1 - 254
 int normalizeThrottle(int value) {
 if( value < 1 )
 return 1;
 if( value > 254 )
 return 254;
 return value;
}
```

8.4.2 Κώδικας MATLAB για την μελέτη αντοχής του ανθρακονήματος

Ο παρακάτω κώδικας βρίσκεται και στο CD που συνοδεύει την παρούσα διπλωματική εργασία.

```
format long
% Tube length
L = 0.11;

% Yield Stress [MPa]
sigma_y = 120;
figure(1)
set(gcf,'color','w');
plot([0.01 0.03],[sigma_y sigma_y],'k:','LineWidth',2);
hold on
for F = 40 : 40 : 120 % Load
r2_sigma = [];
for r2 = 0.005 : 0.0001 : 0.0125 % Outer radius

% Tube thickness
delta = 0.001;

% Inner radious
r1 = r2 - delta;

% Sigma Max Calculation
sigma_max = 4 * F * L * r2 / (pi * (r2^4 - r1^4));
temp = [r2 sigma_max];
r2_sigma = [r2_sigma; r2 sigma_max*10^(-6)];
end
plot(2.*r2_sigma(:,1),r2_sigma(:,2),'LineWidth',2);
end
grid on
xlabel('Carbon Fiber Tube Outer Diameter [m]')
ylabel('Stress [MPa]')
legend('Yield Stress','Load: 40N','Load: 80N','Load: 120N');
```

8.4.3 Κώδικας MATLAB για την προσομοίωση του μονόποδου ρομπότ απευθείας οδήγησης

Οι κώδικες της προσομοίωσης βρίσκονται στο [56] και στο CD που συνοδεύει την παρούσα διπλωματική εργασία.

8.4.4 Οδήγηση Κινητήρων μέσω του DRV8301 – 69M της Texas Instruments

Τα έγγραφα με οδηγίες για την χρήση του board DRV8301 – 69M, βλ. Σχήμα 4-8, βρίσκονται στο [56].