



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.

Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

**ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΠΛΑΗΤΙΚΟΥ
ΜΕΙΩΤΗΡΑ ΓΙΑ ΕΠΕΝΕΡΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΠΟΔΙΟΥ ΤΡΙΩΝ
ΒΑΘΜΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ**

Ιωάννης Βάλβης

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2020

Περίληψη

Στις μέρες μας τα ρομπότ εμφανίζονται ολοένα και περισσότερο στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Μέχρι πρόσφατα, η χρήση τους γινόταν κυρίως σε βιομηχανικούς χώρους, όπου αυτά βρίσκονταν σε σταθερά σημεία και επιτελούσαν εργασίες δύσκολες, κουραστικές, ή επικίνδυνες για τον άνθρωπο. Με το πέρασμα των χρόνων, τα ρομπότ εξελίσσονται και χρησιμοποιούνται και σε περιβάλλοντα που είναι μη δομημένα. Εκεί οι απαιτήσεις είναι ακόμη πιο αυξημένες, γεγονός που απαιτεί μεγάλη προσοχή στην επιλογή και ανάπτυξη του κατάλληλου μηχανολογικού εξοπλισμού που αυτά φέρουν. Οι τεχνολογίες που είναι σχετικές με την κίνηση τέτοιων ρομπότ είναι συνήθως αυτές που θέτουν σήμερα κατά κύριο λόγο τα όρια των δυνατοτήτων τους.

Με ρομποτικές διατάξεις όπου η κίνηση επιτυγχάνεται με την χρήση τροχών, για παράδειγμα, είναι αδύνατη η εκτέλεση εργασιών σε μέρη όπου δεν υπάρχει πρόσβαση μέσω κάποιου είδους σχετικά ομαλού δρόμου. Άρα, τα περισσότερα σημεία ενδιαφέροντος παραμένουν δυσπρόσιτα με τις περισσότερες συμβατικές τεχνολογίες. Την λύση στο πρόβλημα αυτό προσφέρει η ενσωμάτωση ποδιών στα ρομπότ. Η αντίστοιχη τεχνολογία έχει κάνει την εμφάνισή της κυρίως τα τελευταία χρόνια, με εντυπωσιακά αλλά μεμονωμένα και περιορισμένα σε εργαστήρια έρευνας παραδείγματα. Η περίπλοκη δυναμική που περιγράφει τα φαινόμενα της κίνησης με πόδια καθιστά δύσκολη την ανάλυση και τον έλεγχο τέτοιων ρομπότ. Μείζον και ανοιχτό για καινοτομία ζήτημα στη σχετική έρευνα αποτελεί ο σχεδιασμός και η υλοποίηση συστημάτων επενέργειας που θα πλησιάσουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις εντυπωσιακές δυνατότητες των μυών που απαντώνται σε έμβιους οργανισμούς με πόδια.

Μέχρι πρόσφατα, στα περισσότερα ηλεκτρικά επενεργούμενα ρομπότ, η επιστημονική κοινότητα παγκοσμίως υιοθέτησε την χρήση κινητήρων μικρής πυκνότητας ροπής σε συνδυασμό με κιβώτια μεγάλων λόγων μείωσης ως βασικό στοιχείο της επενέργειας των τμημάτων τους (βραχίονες, πόδια κ.α.). Η λύση αυτή ενσωματώθηκε κατά κόρον στα πλέον γνωστά ρομπότ αποτελώντας για πολλά χρόνια μονόδρομο στην επενέργεια ρομποτικών αρθρώσεων. Δεδομένου όμως ότι κατά την αλληλεπίδραση τέτοιων ρομποτικών διατάξεων με το περιβάλλον τους μπορούν να εμφανιστούν μεγάλα κρουστικά φορτία που καταπονούν τα δομικά τους μέρη (πχ. μειωτήρες), θεωρείται αναγκαία η χρήση ελαστικών εξαρτημάτων που προσφέρουν ενδοτικότητα και άρα προστασία στο σύστημα. Παρά τα πλεονεκτήματα τέτοιων μεθόδων επενέργειας, η χρήση μειωτήρων μεγάλης μείωσης σε συνδυασμό με σταθερά παθητικά ελαστικά στοιχεία αυξάνει στις περισσότερες περιπτώσεις τόσο την πολυπλοκότητα, όσο και το όγκο των διατάξεων. Ταυτόχρονα, για την σωστή λειτουργία τέτοιων ρομπότ σε χρήσιμες εφαρμογές είναι αναγκαία η χρήση αισθητήρων δύναμης/ ροπής για την μέτρηση των δυνάμεων αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον, γεγονός που αυξάνει επιπρόσθετα την πολυπλοκότητα και το κόστος, ενώ θέτει πολλές προκλήσεις στον έλεγχό τους. Όπως είναι φυσικό, αυτός ο τρόπος επενέργειας εμφανιζόταν μέχρι πολύ πρόσφατα και στην πλειοψηφία των ηλεκτρικά επενεργούμενων ρομπότ με πόδια.

Τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη κινητήρων με αρκετά υψηλή συγκέντρωση ροπής, έγινε δυνατός ο συνδυασμός τους με μειωτήρες μικρών λόγων μείωσης για την επενέργεια αρθρώσεων σε ρομποτικές διατάξεις. Αυτή η εναλλακτική υλοποίηση όχι μόνο οδηγεί σε ρομπότ με μειωμένο όγκο, κόστος και βάρος, αλλά ταυτόχρονα μειώνει την πολυπλοκότητα τόσο της κατασκευής όσο και του ελέγχου. Την ίδια στιγμή, διευρύνει τις δυνατότητες του ρομπότ εφόσον μειώνεται δραστικά η αδράνεια των αρθρώσεων λόγω των μικρότερων λόγων μείωσης. Παράλληλα, εφόσον οι μειωτήρες με μικρές μειώσεις δεν χρήζουν προστασίας

απέναντι σε κρουστικά φορτία, ένα τέτοιο ρομπότ αποδεσμεύεται από σταθερά ελαστικά στοιχεία προστασίας που μπορούν να παίξουν κυρίαρχο ρόλο στην δυναμική του συστήματος και να δυσκολέψουν τον έλεγχο. Επιπρόσθετα, με απλή μέτρηση ρεύματος είναι δυνατή η εκτίμηση της ροπής των αρθρώσεων και άρα των δυνάμεων στα άκρα των τμημάτων ενός αρθρωτού ρομπότ, χωρίς την ενσωμάτωση αισθητήρων δύναμης/ ροπής. Έτσι, με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων ελέγχου (πχ. κερδών) είναι δυνατή η τροποποίηση της δυναμικής του ποδιού επιτυγχάνοντας για παράδειγμα δυνατότητα κίνησης με διαφορετική ενδοτικότητα ανάλογα με το περιβάλλον αλληλεπίδρασης.

Στην παρούσα διπλωματική υιοθετείται η δεύτερη μέθοδος επενέργειας για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση μονάδας επενέργειας μικρής μείωσης που στην συνέχεια ενσωματώνεται στις αρθρώσεις ευέλικτου ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας. Έμφαση δίνεται στη θερμική ανάλυση της μονάδας και στην εξαγωγή συμπερασμάτων που οδηγούν σε βέλτιστο σχεδιασμό. Τέλος, γίνεται η κατασκευή της μονάδας και του ποδιού που σχεδιάστηκε, και διεξάγονται κατάλληλα πειράματα κίνησης και μέτρησης θερμοκρασίας που πιστοποιούν τα αποτελέσματα που οδήγησαν τον σχεδιασμό.

Abstract

Nowadays, robots are increasingly entering the daily lives of humans. In the past, they were used mainly in industrial areas, where they were located in fixed locations and served purposes that were either difficult or dangerous to implement by humans. Over the years, robots have evolved and are increasingly used in unstructured environments.

In these areas, the demands are even higher, which requires great care in the selection and development of the appropriate mechanical equipment that they will bring. The targeted choice of technologies for the movement of such robots is also the one that primarily sets the limits of their capabilities.

In devices where movement is achieved by the use of wheels, for example, it is impossible to perform work in places where there is no access by some kind of road. The solution to this problem is offered by the integration of legs in robots. This technology has emerged in recent years mainly, while the complex dynamics that describe the phenomena of gait makes it difficult to analyze and control these robots. At the same time, a major issue in these cases is the implementation of power transmission systems at their links in the best possible way.

In the early years of legged robots, the scientific community worldwide adopted the use of low-torque motors combined with large reduction gearboxes as a key part of their actuation units. This solution was integrated into the most well-known robots that were built, while it was a one-way street, based on the existing technology until then regarding the existing motors and gearboxes. However, since the robotic devices develop large impact loads that strain the structural parts of the actuation system, it was necessary to use elastic components that offer flexibility in the system, thus protecting the components of the construction. However, their use in most cases increases both the complexity and the volume of the devices. At the same time, it was necessary to use force sensors at the extremities to measure ground forces, which makes this implementation even more complicated.

In recent years, with the development of motors with high torque concentration, it is possible to combine them with small reduction gearboxes to actuate the legs in robotic devices. This alternative implementation not only leads to robots with reduced volume and weight, but also reduces complexity. At the same time, with proper current control it is possible to estimate the force at the ends of the legs, without the necessary integration of sensors. Also, by adjusting the control parameters of the joints, it is possible to modify the flexibility of the foot, a fact that is very important for the improvement of the performance during walking.

In this diploma, this method of power transmission will be adopted for the design and implementation of an operation unit that will then be applied to a foot of three degrees of freedom.

*He who says he can and
he who says he can't are
both usually right –
Confucius*

Πρόλογος

Από αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που με τον τρόπο τους βόησαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου Ευάγγελο Παπαδόπουλο για την καθοδήγησή του σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής, αλλά και για τις γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσε όλο αυτό τον καιρό.

Ακολούθως, θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τους τρεις υποψήφιους διδάκτορες, τον Κώστα Κουτσούκη, τον Κώστα Μαχαιρά και τον Θανάση Μαστρογεωργίου. Χωρίς την τεράστια συμβολή τους θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο να έρθει εις πέρας ένα τόσο δύσκολο θέμα. Με την στάση τους έθεταν κάθε μέρα τις κατευθυντήριες γραμμές της μελέτης, ενώ συνέβαλλαν ενεργά μεταφέροντάς μου την γνώση και την εμπειρία τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειας αυτής. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Γιάννη, την μητέρα μου Μαρία και την αδερφή μου Κατερίνα που με υποστήριζαν με κάθε τρόπο.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	5
Πρόλογος	7
Περιεχόμενα	8
Κατάλογος Σχημάτων.....	10
Κατάλογος Πινάκων	14
1 Εισαγωγή.....	15
1.1 Σκοπός Εργασίας	15
1.2 Συστήματα ηλεκτρικής επενέργειας για ρομπότ με πόδια	16
1.3 Συστήματα ηλεκτρικής επενέργειας των χαρακτηριστικότερων ρομπότ με πόδια	18
1.3.1 Το δίποδο ρομπότ Cassie.....	18
1.3.2 Το τετράποδο ρομπότ StarETH	18
1.3.3 Το τετράποδο ρομπότ ANYmal	19
1.3.4 Το τετράποδο ρομπότ MIT Cheetah.....	20
1.3.5 Το τετράποδο ρομπότ MIT Cheetah 3.....	21
1.3.6 Το τετράποδο ρομπότ Laelaps II	22
1.4 Επισκόπηση της εργασίας.....	23
2 Σχεδιαστικές αρχές συστημάτων επενέργειας.....	25
2.1 Εισαγωγή.....	25
2.2 Οι επικρατέστερες τεχνολογίες μείωσης	25
2.2.1 Μειωτήρες Harmonic Drive	25
2.2.2 Μειωτήρες Cycloidal Drive	27
2.2.3 Πλανητικοί μειωτήρες	28
2.3 Αξιολόγηση έτοιμων μονάδων επενέργειας	29
2.4 Επιλογή κατάλληλου συστήματος μείωσης	33
2.4.1 Συγκέντρωση στοιχείων σε βάση δεδομένων.....	33
2.4.2 Επεξηγήσεις χρήσιμων μεγεθών	33
2.4.3 Εξαγωγή – Σχολιασμός γραφημάτων	34
2.4.4 Επιλογή στοιχείων μετάδοσης κίνησης της νέας μονάδας επενέργειας.....	36
3 Θερμικά πειράματα και προσομοιώσεις	38
3.1 Εισαγωγή.....	38
3.2 Θερμικά μοντέλα και προσομοιώσεις με χρήση λογισμικών FEA	38
3.2.1 Μέθοδοι μοντελοποίησης με FEA.....	38
3.2.2 Μοντελοποίηση του κινητήρα T Motor U8 KV100 στο λογισμικό Comsol με χρήση της μεθόδου υπολογισμού του συντελεστή h	39

3.2.3 Μοντελοποίηση κινητήρα T Motor U8 KV100 στο λογισμικό Solidworks και χρήση της μεθόδου ανάλυσης με CFD	45
3.3 Πειραματική μελέτη θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα T Motor U8.....	47
3.3.1 Πειραματικός προσδιορισμός αντίστασης τυλιγμάτων του κινητήρα T motor U8	47
3.3.2 Τα είδη αισθητήρων μέτρησης θερμότητας	49
3.3.3 Πειραματική αξιολόγηση θερμίστορ	50
3.3.4 Μέτρηση θερμοκρασίας με θερμίστορ στον κινητήρα T Motor U8 KV100.....	54
3.3.5 Αρχές λειτουργίας των θερμικών καμερών.....	57
3.3.6 Μέτρηση θερμοκρασίας με χρήση θερμικής κάμερας στον κινητήρα T Motor U8 KV100	59
3.3.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πειραματικών αποτελεσμάτων	63
4 Σχεδιασμός νέας μονάδας επενέργειας και ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας.....	66
4.1 Προδιαγραφές για τον σχεδιασμό της μονάδας	66
4.2 Ενσωμάτωση μειωτήρα στην μονάδα επενέργειας	66
4.3 Ενσωμάτωση κινητήρα στην μονάδα επενέργειας.....	68
4.4 Ενσωμάτωση αισθητήρα μέτρησης γωνίας	70
4.5 Σχεδιασμός του κελύφους της μονάδας επενέργειας	71
4.6 Σχεδιασμός ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας	75
4.7 Αναλύσεις δυνάμεων στα στοιχεία των μονάδων επενέργειας.....	77
4.7.1 Ανάλυση δυνάμεων στα ρουλεμάν	78
4.7.2 Ανάλυση δυνάμεων στον φορέα των πλανητών	80
4.7.3 Ανάλυση στο κέλυφος	80
4.7.4 Ανάλυση στα συνδετικά τεμάχια ανάμεσα στις μονάδες	81
5 Υλοποίηση ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας	84
5.1 Κατασκευή των μονάδων επενέργειας.....	84
5.1.1 Το σύστημα μετατροπής ισχύος του επενεργητή	84
5.1.2 Οι εδράσεις του στάτη και του ρότορα	85
5.2 Κατασκευή των βασικών στοιχείων του ποδιού.....	89
5.3 Συναρμολόγηση του ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας	91
5.4 Πειράματα με το φυσικό μοντέλο του ποδιού.....	93
5.4.1 Πείραμα 1 – Δοκιμή του ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας	93
5.4.2 Πείραμα 2 – Τροφοδοσία μονάδας με ρεύμα διαφορετικών εντάσεων.....	94
5.4.3 Πείραμα 3 – Μέτρηση θερμοκρασίας στο κέλυφος του επενεργητή	97
6 Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία	101
6.1 Συμπεράσματα	101
6.2 Μελλοντική εργασία	101
7 Βιβλιογραφία	103

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-2.	(α) Το δίποδο ρομπότ Cassie. (β) Σχηματική απεικόνιση των κύριων τμημάτων που απαρτίζουν το πόδι του ρομπότ Cassie.....	18
Σχήμα 1-3.	(α) Το τετράποδο ρομπότ StarETH. (β) Το σχέδιο του τετράποδου ρομπότ StarETH με τα χαρακτηριστικά μεγέθη των τμημάτων που το απαρτίζουν.	19
Σχήμα 1-4.	(α) Το τετράποδο ρομπότ ANYmal. (β) Ο χώρος εργασίας ενός ποδιού του ρομπότ ANYmal.	20
Σχήμα 1-5.	Το τετράποδο ρομπότ MIT Cheetah.....	21
Σχήμα 1-6.	(α) Το τετράποδο ρομπότ MIT Cheetah 3. (β) Σχηματική αναπαράσταση των κυριότερων μερών του ποδιού του ρομπότ.....	21
Σχήμα 1-7.	Το τετράποδο ρομπότ Laelaps II.	22
Σχήμα 1-8.	(α) Οι μονάδες επενέργειας ισχίου & γονάτου του τετράποδου ρομπότ Laelaps II. (β) Το ζεύγος εμπρόσθιων ποδιών του Laelaps II, με το σύστημα επίτευξης ενδοτικότητας να διακρίνεται.	23
Σχήμα 2-1.	(a) Τυπικός μειωτήρας Harmonic Drive. (b) Τα δομικά μέρη ενός μειωτήρα Harmonic Drive.....	26
Σχήμα 2-2.	Η κίνηση του Flexspline κατά την περιστροφή του Wave Generator.....	26
Σχήμα 2-3.	Επενεργητής κοίλου άξονα με την χρήση Harmonic Drive.	27
Σχήμα 2-4.	Τα δομικά μέρη των Cycloidal Drives.	27
Σχήμα 2-5.	Το R-V Drive.....	28
Σχήμα 2-6.	Τα δομικά μέρη ενός τυπικού πλανητικού μειωτήρα.	29
Σχήμα 2-7.	Η μονάδα επενέργειας CanisDrive.....	30
Σχήμα 2-8.	Η μονάδα επενέργειας του τετραπόδου MIT Cheetah Mini.....	31
Σχήμα 2-9.	Οι μονάδες επενέργειας του Laelaps II.	32
Σχήμα 2-10.	Η ειδική επαναλαμβανόμενη μέγιστη ροπή συναρτήσκει της ροπής αδράνειας.	34
Σχήμα 2-11.	Η ειδική επαναλαμβανόμενη μέγιστη ροπή συναρτήσκει του λόγου μείωσης.	35
Σχήμα 2-12.	Η ειδική επαναλαμβανόμενη μέγιστη ροπή συναρτήσκει της ροπής εκκίνησης άνευ φορτίου.	35
Σχήμα 2-13.	Η ειδική επαναλαμβανόμενη μέγιστη ροπή συναρτήσκει της ροπής ανάστροφης κίνησης άνευ φορτίου.....	36
Σχήμα 2-14.	Ο κινητήρας T Motor U8 Lite KV100.....	36
Σχήμα 3-1.	Η ροή αέρα κατά την συναγωγή σε κατακόρυφο τοίχωμα	40
Σχήμα 3-2.	Η ροή αέρα κατά την συναγωγή σε τοίχωμα υπό κλίση.....	42
Σχήμα 3-3.	Η ροή αέρα κατά την συναγωγή σε οριζόντιο άνω τοίχωμα.....	43
Σχήμα 3-4.	Η ροή αέρα κατά την συναγωγή σε οριζόντιο κάτω τοίχωμα.	43
Σχήμα 3-5.	Θερμική μοντελοποίηση του T Motor U8 KV100 σε περιβάλλον Comsol.	45
Σχήμα 3-6.	Ορισμός κατάλληλου όγκου αέρα γύρω από το μοντέλο του επενεργητή.	46

Σχήμα 3-7.	Τα αποτελέσματα προσομοίωσης του T Motor U8 KV100 με χρήση CFD σε περιβάλλον Solidworks	46
Σχήμα 3-8.	Η διαμόρφωση της θερμοκρασίας στον αέρα γύρω από το μοντέλο του κινητήρα.....	47
Σχήμα 3-9.	Σχεδιάγραμμα μέτρησης με την μέθοδο 4 terminal sensing.....	48
Σχήμα 3-10.	Μέτρηση της αντίστασης του T Motor U8 Lite με την χρήση του RLC Meter.	48
Σχήμα 3-11.	Η μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας (α) Στα θερμίστορ (b) Στα θερμόμετρα αντίστασης καλωδίου(PRT).	49
Σχήμα 3-12.	Τα θερμίστορ NTC που αξιολογήθηκαν πειραματικά : (a) Θερμίστορ 10KΩ, (b) Θερμίστορ 100KΩ (c) Θερμίστορ 100KΩ για κεφαλές 3D εκτυπωτών.	50
Σχήμα 3-13.	(α) Πολύμετρο Fluke 289 με θερμοστοιχείο τύπου K. (β) Το δοκίμιο για την μέτρηση της θερμοκρασίας.	51
Σχήμα 3-14.	Η πειραματική διάταξη αξιολόγησης των θερμίστορ.	51
Σχήμα 3-15.	Το κύκλωμα σύνδεσης έκαστου θερμίστορ με το Arduino.	52
Σχήμα 3-16.	Μετρήσεις θερμοκρασίας από τους τέσσερεις αισθητήρες.	53
Σχήμα 3-17.	Το εύρος πιθανών μετρήσεων του θερμοστοιχείου και του θερμίστορ 100KΩ για 3D εκτυπωτές.	54
Σχήμα 3-18.	Η διάταξη θερμικού πειράματος του κινητήρα T Motor U8 KV100.....	54
Σχήμα 3-19.	<i>Τα τυλίγματα του επενεργητή συνδέθηκαν με σύνδεση τριγώνου.</i>	55
Σχήμα 3-20.	Η εικόνα του T Motor U8 KV100 μέσω θερμικής κάμερας.....	55
Σχήμα 3-21.	Τοποθέτηση των θερμίστορ στα τυλίγματα του T Motor U8 KV100.	56
Σχήμα 3-22.	Η θερμοκρασία τυλιγμάτων του T Motor U8 KV100 για τροφοδοσία με 6,43A, 10,16A και 13,73A.	57
Σχήμα 3-23.	Η θερμική κάμερα FLIR E300.	57
Σχήμα 3-24.	Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. (1) Ακτίνες X, (2) UV ακτινοβολία, (3) Ορατό φως, (4) IR ακτινοβολία, (5)Μικροκύματα, (6) Ραδιοκύματα.	58
Σχήμα 3-25.	Η εκπεμπόμενη, η μεταδιδόμενη και η ανακλώμενη θερμοκρασία σώματος.	58
Σχήμα 3-26.	Πειραματικός υπολογισμός της θερμοκρασίας ανάκλασης: (a) Η πειραματική διάταξη (b) Το στιγμιότυπο από την θερμική κάμερα	60
Σχήμα 3-27.	Κάλυψη ενός εκ των τυλιγμάτων με μονωτική ταινία.....	60
Σχήμα 3-28.	Μετρήσεις θερμοκρασίας του T Motor U8 KV100: (a) Πριν την ρύθμιση του e στο Sp2 (b) Μετά την ρύθμιση του e στο Sp2.	61
Σχήμα 3-29.	Λήψη έγκυρων μετρήσεων σε οποιοδήποτε σημείο των πηνίων του T Motor U8 KV100 έπειτα από την πειραματική εύρεση του συντελεστή e.....	61
Σχήμα 3-30.	Μέτρηση θερμοκρασίας με θερμική κάμερα και θερμίστορ στον T Motor U8 KV100.....	62
Σχήμα 3-31.	Οι ζώνες πιθανών μετρήσεων έκαστου μετρητικού οργάνου.....	63
Σχήμα 3-32.	Χωρική κατανομή των θερμοκρασιών κατά την θερμική ισορροπία για το μοντέλο του κινητήρα (α) στο λογισμικό Comsol και (β) στο λογισμικό Solidworks.	64

Σχήμα 3-33.	Χρονική εξέλιξη των θερμοκρασιακών μεταβολών των περιελίξεων των φάσεων A, B και C από την προσομοίωση στο Comsol (διακεκομμένη κόκκινη και μπλε γραμμή για τις περιελίξεις της φάσης A και B,C αντίστοιχα) και από τα πειραματικά δεδομένα (συνεχής κόκκινη και μπλε γραμμή για τις περιελίξεις της φάσης A και B,C αντίστοιχα).	64
Σχήμα 4-1.	Πλανητικός μειωτήρας όμοιος με τους Varitron DH – 042.	67
Σχήμα 4-2.	Πλήρης αποσυναρμολόγηση των πλανητικών μειωτήρων.	67
Σχήμα 4-3.	Η βαθμίδα πλανητικής μείωσης της μονάδας επενέργειας.	68
Σχήμα 4-4.	Η έδραση του επενεργητή T Motor U8 Lite KV100.	68
Σχήμα 4-5.	Αποδόμηση του ρότορα και του στάτη.	69
Σχήμα 4-6.	Προσαρμογή του ήλιου στον ρότορα του κινητήρα.	69
Σχήμα 4-7.	(α) Ο κλασικός μαγνητικός encoder AS5047P, (β) Ο δακτυλιοειδής μαγνητικός encoder RLB.....	70
Σχήμα 4-8.	(α) Παράδειγμα έδρασης μαγνητικού encoder, (β) Παράδειγμα έδρασης δακτυλιοειδούς encoder.	70
Σχήμα 4-9.	Το κέλυφος της μονάδας επενέργειας.	72
Σχήμα 4-10.	Η μονάδα επενέργειας σε τομή.	72
Σχήμα 4-11.	Τα μέρη της μονάδας επενέργειας.	73
Σχήμα 4-12.	Οι βασικές διαστάσεις της μονάδας επενέργειας.....	73
Σχήμα 4-13.	Οι κατασκευαστικές ανοχές των τεμαχίων της μονάδας επενέργειας.	74
Σχήμα 4-14.	(α) Το συνδετικό τεμάχιο ανάμεσα στις μονάδες 1 και 2. (β) Το συνδετικό τεμάχιο ανάμεσα στις μονάδες 2 και 3.....	75
Σχήμα 4-15.	Το συναρμολόγημα των τριών μονάδων επενέργεια.	76
Σχήμα 4-16.	Ενσωμάτωση του ποδιού στο συναρμολόγημα των τριών μονάδων επενέργειας.....	76
Σχήμα 4-17.	Οδήγηση του ιμάντα εντός του σωλήνα ανθρακονήματος.	77
Σχήμα 4-18.	Κρουστική φόρτιση του ποδιού κατά την πτώση στο έδαφος.	78
Σχήμα 4-19.	Το Διάγραμμα Ελευθέρου Σώματος του φορέα των γριναζιών.	79
Σχήμα 4-20.	Ανάλυση δυνάμεων με χρήση FEA (α) Στον φορέα των γριναζιών μείωσης 7:1. (β) Στον φορέα των γριναζιών μείωσης 10:1.	80
Σχήμα 4-21.	Τα φορτία που ασκούνται στο κέλυφος της μονάδας επενέργειας.....	81
Σχήμα 4-22.	Ανάλυση δυνάμεων με χρήση FEA στο κέλυφος του επενεργητή.	81
Σχήμα 4-23.	Τα φορτία που ασκούνται στο εξάρτημα σύνδεσης της μονάδας 1 με το μελλοντικό σώμα του ρομπότ.	82
Σχήμα 4-24.	Ανάλυση δυνάμεων με χρήση FEA στο εξάρτημα σύνδεσης της μονάδας 1 με το μελλοντικό σώμα του ρομπότ.	82
Σχήμα 4-25.	Τα φορτία που ασκούνται στο εξάρτημα σύνδεσης της μονάδας 2 με την μονάδα 3.....	83
Σχήμα 4-26.	Ανάλυση δυνάμεων με χρήση FEA στο εξάρτημα σύνδεσης της μονάδας 2 με την μονάδα 3.	83
Σχήμα 5-1.	Το συναρμολόγημα του ρότορα με τον ήλιο του συστήματος μείωσης. ...	84
Σχήμα 5-2.	Το συναρμολόγημα των πλανητών του συστήματος μείωσης με τον φορέα τους.....	85

Σχήμα 5-3.	Η έδραση του στάτη.	85
Σχήμα 5-4.	(α) Τοποθέτηση του στάτη στο έδρανο. (β) Τοποθέτηση θερμίστορ στα τυλίγματα του στάτη.	86
Σχήμα 5-5.	(α) Τοποθέτηση του ρουλεμάν 6805 και του δακτυλιοειδούς γραναζιού. (β) Τοποθέτηση της βαθμίδας μείωσης στην έδραση του στάτη.	87
Σχήμα 5-6.	(α) Τοποθέτηση του ρότορα με τον ήλιο στην έδραση. (β) Τοποθέτηση της έδρασης του ρότορα.....	87
Σχήμα 5-7.	Τοποθέτηση του μετρητικού γωνιακής θέσης AS5047P και του καλύμματός του.	88
Σχήμα 5-8.	Οργάνωση και προστασία των καλωδίων με την χρήση σπιράλ και κατάλληλων πλαστικών άκρων.....	88
Σχήμα 5-9.	Τα δομικά μέρη του ποδιού.....	89
Σχήμα 5-10.	Η μορφή του ποδιού έπεται από την συναρμολόγηση του ισχίου και του γονάτου.....	89
Σχήμα 5-11.	Οδήγηση του ιμάντα εντός του σωλήνα ανθρακονήματος.	90
Σχήμα 5-12.	Το εσωτερικό τμήμα του άνω άκρου του ισχίου.	91
Σχήμα 5-13.	(α) Το εξάρτημα για την σύνδεση των μονάδων 1 και 2. (β) Το εξάρτημα για την σύνδεση των μονάδων 2 και 3.....	92
Σχήμα 5-14.	Το συναρμολογημένο πόδι τριών βαθμών ελευθερίας πάνω στην ειδική βάση.	93
Σχήμα 5-15.	(α) Η κίνηση απαγωγής και προσαγωγής του ισχίου, (β) η δεύτερη κίνηση του ισχίου, και (γ) η κίνηση του γονάτου.....	94
Σχήμα 5-16.	Η πειραματική διάταξη μέτρησης θερμοκρασίας στα τυλίγματα του στάτη για τροφοδοσία με διάφορες τιμές ρεύματος.	95
Σχήμα 5-17.	Οι μετρήσεις θερμοκρασίας κατά την τροφοδοσία της μονάδας με ρεύματα διαφορετικών εντάσεων.	95
Σχήμα 5-18.	Σύγκριση της θερμοκρασίας τυλιγμάτων του επενεργητή της μονάδας και του T Motor U8 KV100, έπειτά από τροφοδοσία με κοντινές τιμές ρεύματος.	96
Σχήμα 5-19.	Πείραμα υπολογισμού της θερμοκρασίας ανάκλασης.....	97
Σχήμα 5-20.	Πείραμα υπολογισμού του συντελεστή εκπομπής.	98
Σχήμα 5-21.	Μέτρηση της θερμοκρασίας στο κέλυφος της μονάδας μετά την αφαίρεση της ταινίας.....	98
Σχήμα 5-22.	Πείραμα που δείχνει ότι η θερμοκρασία της γυαλιστερής επιφάνειας του καλύμματος του encoder είναι δύσκολο να μετρηθεί με απλή χρήση θερμικής κάμερας.....	99
Σχήμα 5-23.	Πειραματικά αποτελέσματα μετά από αύξηση του συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας με την χρήση μονωτικής ταινίας.....	99
Σχήμα 5-24.	Η θερμοκρασία του καλύμματος του encoder για τροφοδοσία του επενεργητή με ρεύμα 13,36 A.....	100

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1. Τα στοιχεία των επικρατέστερων πλανητικών μειωτήρων	37
Πίνακας 3-1. Οι αντιστάσεις των κινητήρων T Motor U8.	49

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Με το πέρασμα των χρόνων τα ρομπότ χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο σε εφαρμογές που βρίσκονται σε μη δομημένα περιβάλλοντα, επιτελώντας όλο και πιο εξελιγμένες εργασίες. Πιο συγκεκριμένα, απαντώνται ρομπότ που μπορούν να αντιλαμβάνονται και να αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον τους, να συνεργάζονται με τον άνθρωπο, να αναγνωρίζουν πρόσωπα και εικόνες, ακόμα και να λαμβάνουν δικές τους αποφάσεις.

Ένα από τα πιο σημαντικά γνωρίσματα που διαχωρίζουν τα διάφορα ρομπότ μεταξύ τους είναι τα συστήματα κίνησης με τα οποία αυτά είναι εξοπλισμένα. Τα συστήματα αυτά είναι ουσιαστικά οποιαδήποτε φέρουσα διάταξη τους επιτρέπει να μεταφέρονται εντός του χώρου εργασίας τους, όπως ρόδες, πόδια ή ακόμη και συνδυασμός αυτών. Συνεπώς, οι δυνατότητες των ρομποτικών διατάξεων καθορίζονται σε ένα αρκετά μεγάλο μέρος τους από τα συστήματα κίνησής που αυτά χρησιμοποιούν.

Τα πλέον χρησιμοποιούμενα ρομπότ σε μη δομημένα περιβάλλοντα, μέχρι στιγμής είναι αυτά που έχουν σαν βασικό τρόπο κίνησής τους τις ρόδες, διότι διέπονται από αρκετά πιο απλοποιημένη δυναμική, σε σχέση με τις ρομποτικές διατάξεις που φέρουν πόδια. Για τον λόγο αυτό μπορούν να αναλυθούν και να ελεγχθούν αρκετά πιο εύκολα. Το γεγονός όμως ότι φέρουν ρόδες περιορίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό το περιβάλλον στο οποίο μπορούν να εργασθούν. Πιο αναλυτικά, προκειμένου να μεταβούν από ένα μέρος σε ένα άλλο, τίθεται ως απαραίτητη προϋπόθεση η ύπαρξη δρόμου συγκεκριμένων χαρακτηριστικών και χωρίς έντονες ασυνέχειες, όπως εμπόδια.

Επομένως, το γεγονός ότι τα ρομπότ αυτά δεν μπορούν να εργασθούν παρά μόνο σε συγκεκριμένα εδάφη, κάνει αναγκαία την μελέτη άλλων διατάξεων που θα μπορούν να φτάσουν πρακτικά σε οποιοδήποτε περιβάλλον τους ζητηθεί. Τέτοιες διατάξεις είναι τα ρομπότ με πόδια, τα οποία τα τελευταία χρόνια αποτελούν πόλο ενδιαφέροντος για την ευρύτερη επιστημονική κοινότητα.

Όπως είναι αναμενόμενο, ακόμα και τα ρομπότ αυτά δεν έχουν απεριόριστες δυνατότητες, διότι τα συστήματα κίνησής τους θέτουν επίσης μεγάλους περιορισμούς. Πιο συγκεκριμένα, το εύρος κίνησης των μελών τους καθορίζει το πόσο επιδέξια μπορούν αυτά να κινηθούν στον χώρο, αλλά και το πόσο απαιτητικές εργασίες αυτά μπορούν να επιτύχουν. Ταυτόχρονα, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά ισχύος από τις μονάδες επενέργησης προς τα μέλη των ποδιών επηρεάζουν όχι μόνο την ενεργειακή απόδοση της ρομποτικής διάταξης, αλλά και το κατά πόσον είναι ικανή να αντιλαμβάνεται το περιβάλλον στο οποίο εργάζεται. Αυτό το γνώρισμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα ρομπότ με πόδια, διότι όταν μια τέτοια διάταξη είναι σε θέση να αντιλαμβάνεται το έδαφος επάνω στο οποίο βρίσκεται, τότε μπορεί με τον κατάλληλο έλεγχο να μεταβάλλει την συμπεριφορά της κατά την βάδιση. Με τον τρόπο αυτό, το ρομπότ όχι μόνο μπορεί να διατηρεί την ισορροπία του, αλλά και να είναι κατά το δυνατόν πιο ενεργειακά αποτελεσματικό κατά την λειτουργία του.

Η ηλεκτρική επενέργηση σε ρομπότ με πόδια πρόκειται να είναι ο βασικός πυρήνας της παρούσας εργασίας, δηλαδή η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή μονάδων επενέργησης που θα βασίζονται στην συνεργασία ηλεκτρικών κινητήρων με μικρές βαθμίδες μείωσης. Οι εν λόγω μονάδες επενέργησης στην συνέχεια θα συνδυαστούν κατάλληλα και θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή ενός ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας, το οποίο θα

προορίζεται για την εφαρμογή σε ρομποτική διάταξη με πόδια. Εξετάζοντας τις διάφορες σχεδιαστικές επιλογές, θα διαμορφωθούν σταδιακά τόσο οι μονάδες επενέργησης, όσο και το υπόλοιπο πόδι. Βασικός γνώμονας σε κάθε φάση σχεδιασμού θα είναι η υλοποίηση επενεργητών μεγάλης πυκνότητας ροπής και ταυτόχρονα μικρής μείωσης, με τους οποίους το ρομπότ θα μπορεί ανά πάσα στιγμή να αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του μέσω μέτρησης κατανάλωσης ρεύματος και να προσαρμόζεται σε αυτό. Την ίδια στιγμή, ιδιαίτερη βαρύτητα θα δοθεί και στην μεγιστοποίηση του χώρου εργασίας του τελικού ποδιού, επεκτείνοντας έτσι τις δυνατότητες του ρομπότ που θα το φέρει.

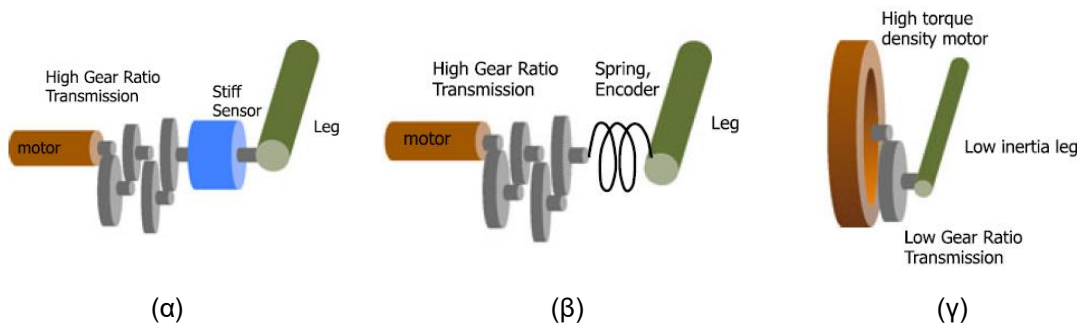
1.2 Συστήματα ηλεκτρικής επενέργησης για ρομπότ με πόδια

Τα ρομπότ με πόδια αποτελούν πολύπλοκα συστήματα με πολλούς βαθμούς ελευθερίας, έντονη σύζευξη μεταξύ των βαθμών και υβριδική δυναμική καθώς κατά την κίνησή τους μεταβάλλεται διαρκώς ο αριθμός των ποδιών που βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος. Η κίνηση των ρομπότ με πόδια είναι συνυφασμένη με τεχνολογικές προκλήσεις, μία από τις κυριότερες να σχετίζεται με την επενέργησή τους.

Κατά την κίνηση, ανεξαρτήτως του επιλεγόμενου βηματισμού, κάθε πόδι μπορεί είτε να βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος (φάση εδάφους – stance phase), είτε να βρίσκεται στον αέρα (φάση πτήσης – flight phase). Κατά την φάση εδάφους απαιτείται αυξημένη ροπή από τους επενεργητές ώστε να στηρίξουν το βάρος του ρομπότ ενώ κατά την φάση πτήσης απαιτούνται μικρότερες ροπές αλλά αναπτύσσονται μεγαλύτερες ταχύτητες στις αρθρώσεις του ρομπότ καθώς το πόδι πρέπει να τοποθετηθεί κατάλληλα για την επόμενη φάση εδάφους. Επειδή οι επενεργητές αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό του βάρους του ρομπότ, η μείωση της μάζας τους συνδέεται άμεσα με την αύξηση των δυνατοτήτων του ρομπότ.

Επιπρόσθετα η εναλλαγή μεταξύ της φάσης πτήσης και της εδάφους πραγματοποιείται μέσω της κρούσης του πέλματος του ρομπότ με το έδαφος. Τα κρουστικά φορτία που αναπτύσσονται είναι περιοδικά και επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή των εμπλεκόμενων μηχανικών μερών των επενεργητών. Έτσι απαιτείται ειδική πρόνοια κατά τον σχεδιασμό η οποία οδηγεί στην υπερδιαστασιολόγηση των μηχανολογικών μερών του επενεργητή αν ακολουθηθεί η παραδοσιακή αρχιτεκτονική επενέργησης.

Η αρχιτεκτονική αυτή, η οποία χρησιμοποιείται στην περίπτωση των ρομποτικών βραχιόνων, χαρακτηρίζεται από την χρήση ηλεκτρικών κινητήρων σε συνδυασμό με συστήματα μετάδοσης κίνησης με μεγάλες σχέσεις μετάδοσης, βλέπε **Σχήμα 1-1(α)**. Τα συστήματα που προκύπτουν χαρακτηρίζονται από μεγάλη δυσκαμψία και μεγάλη ακρίβεια κατά την κίνηση ωστόσο η αρχιτεκτονική αυτή δεν είναι ιδανική στις περιπτώσεις που το σύστημα αλληλοεπιδρά δυναμικά με το περιβάλλον. Στην περίπτωση των ρομπότ με πόδια η μεγάλη ισοδύναμη αδράνεια (οφειλόμενη στους μειωτήρες με μεγάλες σχέσεις μετάδοσης) που εμφανίζεται στο άκρο που αλληλοεπιδρά με το έδαφος περιορίζει σημαντικά τον έλεγχο της δύναμης κατά την φάση εδάφους. Με σκοπό της άρση των περιορισμών έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικές αρχιτεκτονικές επενέργησης, η επενέργηση σε σειρά με ελαστικά στοιχεία (Series Elastic Actuation [1]) και η επενέργηση με ιδιοδεκτικό έλεγχο δύναμης (Proprioceptive Force Control Actuation), **Σχήμα 1-1**, [2].



Σχήμα 1-1. Σχηματική απεικόνιση των κυριότερων αρχιτεκτονικών επενέργησης **(α) Επενέργηση μεγάλης δυσκαμψίας και ακρίβειας κίνησης. (β) Επενέργηση με χρήση ελαστικών στοιχείων σε σειρά – Series Elastic Actuation. (γ) επενέργηση με ιδιοδεκτικό έλεγχο δύναμης - Proprioceptive Force Control Actuation.**

Η αρχιτεκτονική επενέργησης σε σειρά με ελαστικά στοιχεία είναι αυτή που απαντάται και στα περισσότερα ρομπότ τέτοιου είδους. Πρόκειται για την υλοποίηση των συστημάτων επενέργησης με χρήση κινητήρων μικρής διαμέτρου και άρα σχετικά μικρής πυκνότητας ροπής σε συνδυασμό με κιβώτια μεγάλων λόγων μείωσης. σε σειρά με ελαστικά μέσα για την απόσβεση κρουστικών φορτίων που θα ήταν αλλιώς καταστροφικά για τα κιβώτια μείωσης. Αυτή η αντιμετώπιση ήταν η πλέον επικρατέστερη μέχρι πρόσφατα. Με τον τρόπο αυτό τα συστήματα επενέργησης είχαν πολύ μικρή ενδοτικότητα, με αποτέλεσμα τα κρουστικά φορτία κατά την βάρδια να καταπονούν τα στοιχεία των μειωτήρων. Για τον λόγο αυτό ήταν αναγκαία η χρήση ελαστικών μέσων για την επίτευξη της ενδοτικότητας, γεγονός που οδηγούσε σε αρκετά ογκώδη, ακριβά και βαριά συστήματα επενέργησης. Ταυτόχρονα, ο μόνος τρόπος να αντιλαμβάνεται το ρομπότ τις δυνάμεις εδάφους ήταν η προσθήκη αισθητήρων δύναμης στα άκρα, γεγονός που αύξανε ακόμη περισσότερο την περιπλοκότητα και το βάρος της κατασκευής, καθώς και τον έλεγχο του ρομπότ.

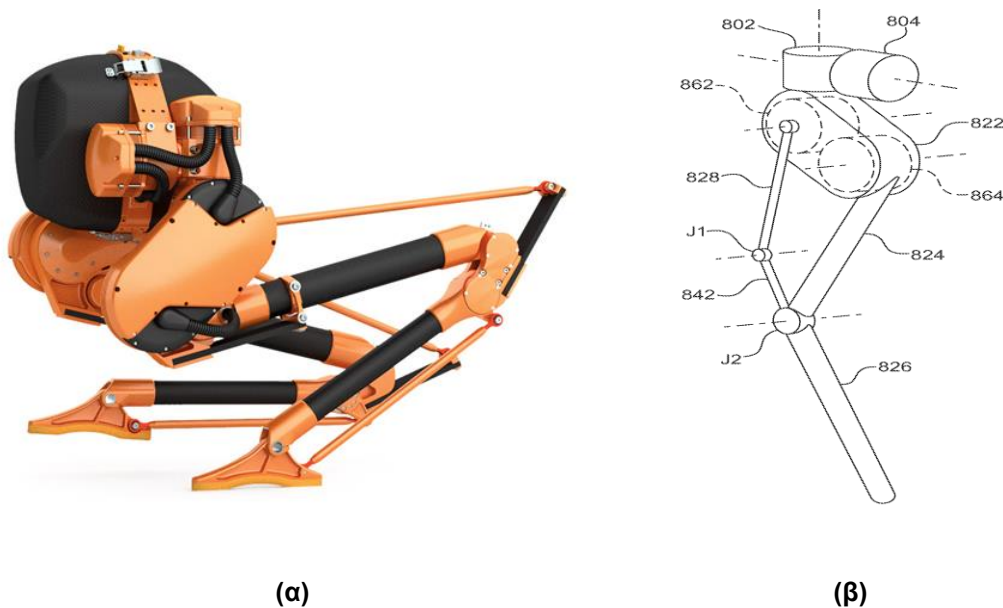
Η αρχιτεκτονική επενέργησης με ιδιοδεκτικό έλεγχο δύναμης έχει ως βασικό γνώρισμα την χρήση κινητήρων μεγάλης διαμέτρου και άρα μεγάλης πυκνότητας ροπής σε συνεργασία με μειωτήρες μικρών λόγων μείωσης. Όσο μικρότερος ο λόγος μείωσης τόσο μεγαλύτερη είναι η συνεισφορά του ηλεκτρικού πεδίου του κινητήρα στην παραλαβή των κρουστικών φορτίων, και άρα τόσο μικρότερη η καταπόνηση του μειωτήρα. Λόγω αυτού, τέτοιου είδους συστήματα δεν κάνουν χρήση επιπλέον ελαστικών μέσων για λόγους προστασίας. Το γεγονός αυτό απλοποιεί κατά πολύ τον σχεδιασμό, μειώνοντας ταυτόχρονα το βάρος και το κόστος των διατάξεων. Επιπλέον, δεν χρειάζονται αισθητήρες δύναμης για την υλοποίηση σχημάτων ελέγχου δύναμης – εφόσον η κατανάλωση ρεύματος του κινητήρα δίνει καλή εκτίμηση της ροπής εξόδου – ενώ επίσης δεν χρειάζεται να αντιμετωπιστούν μέσω ελέγχου θέματα που σχετίζονται με μόνιμα ελατήρια στην κατασκευή. Οποιαδήποτε συμπεριφορά ενδοτικότητας μπορεί πλέον να υλοποιηθεί μέσω ρυθμιζόμενων κερδών σε επίπεδο λογισμικού, αυξάνοντας έτσι τις δυνατότητες του ποδιού.

1.3 Συστήματα ηλεκτρικής επενέργειας των χαρακτηριστικότερων ρομπότ με πόδια

1.3.1 Το δίποδο ρομπότ Cassie

Αναφορικά με το δίποδο ρομπότ Cassie [3], στις μονάδες επενέργειας των ποδιών χρησιμοποιούνται Cycloid Gears, με τα οποία επιτυγχάνονται υψηλές σχέσεις μείωσης. Οι επενεργητές συνδέονται σε σειρά και αποτελούν δομικό στοιχείο του ποδιού. Η ύπαρξη μεγάλων μειώσεων κάνει αναγκαία την χρήση κάποιου μέσου ενδοτικότητας στην δομή του ποδιού για την προστασία τόσο των μειωτήρων, όσο και των αρθρώσεων από φαινόμενα κρουστικής φόρτισης. Στην παρούσα δομή του ρομπότ, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 1-2, γίνεται υλοποίηση της ενδοτικότητας σε δύο εκ των πέντε μελών με χρήση φύλλων ανθρακονήματος.

Αναφορικά με την μετάδοση κίνησης στο πόδι του Cassie, έχει γίνει χρήση μηχανισμού 5-Bar για μετάδοση κίνησης από την άρθρωση 3 στο μέλος 4, καθώς και μηχανισμού 4-Bar για μετάδοση κίνησης από τον επενεργητή 5 στο άκρο του ποδιού. Οι δύο μηχανισμοί αυτοί υλοποιούνται με ράβδους ανθρακονήματος (τεμάχια 824 και 826 στο Σχήμα 1-2), οι οποίες συνδέονται με τα υπόλοιπα μεταλλικά μέρη με εποξειδική κόλλα. Ο 5^{ος} επενεργητής στο πόδι του Cassie χρησιμοποιείται την κίνηση του άκρου (πέλματος) με στόχο την ακύρωση διαταραχών για αυξημένη ευστάθεια.



Σχήμα 1-2. (α) Το δίποδο ρομπότ Cassie. (β) Σχηματική απεικόνιση των κύριων τμημάτων που απαρτίζουν το πόδι του ρομπότ Cassie.

1.3.2 Το τετράποδο ρομπότ StarIETH

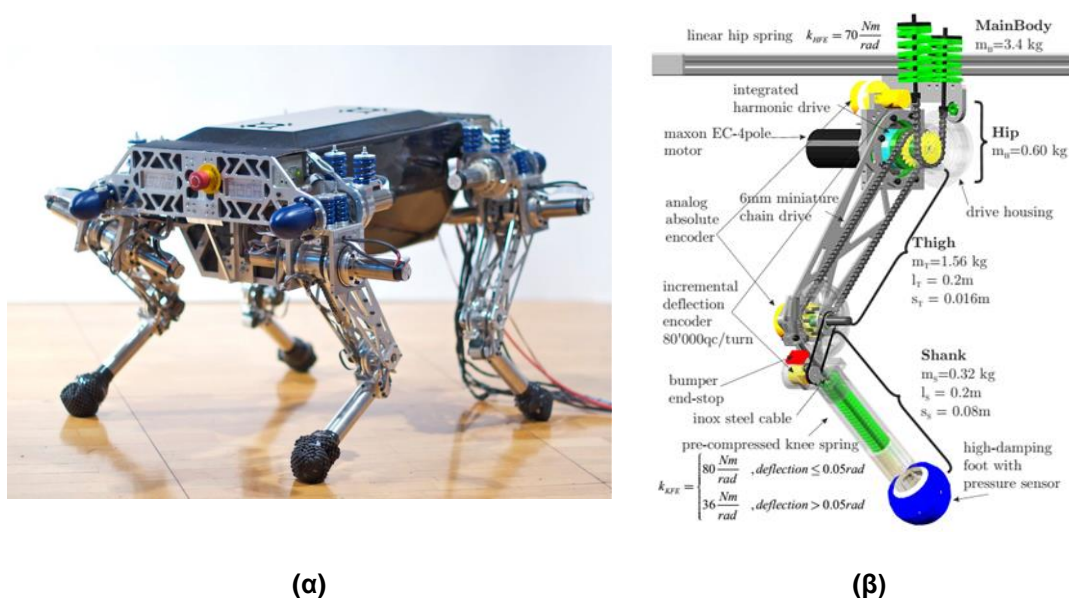
Το τετράποδο ρομπότ StarIETH [4] φέρει πόδια τριών βαθμών ελευθερίας, τα οποία είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο υψηλής αντοχής προκειμένου να επιτευχθεί χαμηλό βάρος. Έκαστο πόδι αποτελείται από πολλά επιμέρους εξαρτήματα, γεγονός που το καθιστά πλήρως τροποποιήσιμο. Για την επενέργησή τους χρησιμοποιούνται επενεργητές σε σειρά με κατάλληλα ελατήρια, επομένως πρόκειται για υλοποίηση τύπου Series Elastic Actuator (SEA). Το βασικό γνώρισμα του συστήματος αυτού είναι ότι τα ελατήρια είναι τοποθετημένα σε σημείο

τέτοιο ώστε να είναι εύκολα προσβάσιμα, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 1-3. Με αυτό τον τρόπο, μπορούν να αλλάζονται για πειραματικούς σκοπούς εύκολα, χωρίς περίπλοκες διαδικασίες αποσυναρμολόγησης. Αυτή η λεπτομέρεια οδηγεί σε πιο συμπαγή σχεδιασμό του συστήματος επενέργειας.

Η ενδοτικότητα του ποδιού υλοποιείται με την χρήση ενός παθητικού πρισματικού ελατηρίου εσωτερικά στο κατώτερο μέλος. Στο άκρο του ποδιού είναι προσαρμοσμένη μικρή μπάλα τένις, η οποία αποσβένει τους κραδασμούς που καταπονούν την κατασκευή. Ταυτόχρονα, κάνοντας χρήση κατάλληλης μετρητικής διάταξης για μέτρηση της πίεσης του αέρα εντός της μπάλας, γίνεται μέτρηση της δύναμης που ασκείται στο άκρο.

Τα συστήματα επενέργειας είναι κατάλληλα τοποθετημένα ώστε να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν μικρότερη ροπή αδράνειας στα κινούμενα μέρη του ρομπότ. Για τον λόγο αυτό, βρίσκονται τοποθετημένα κατά το δυνατόν κοντά στο κυρίως σώμα του ρομπότ.

Δεδομένου ότι ο επενεργητής για το Knee είναι απομακρυσμένος σε σχέση με το εν λόγω μέλος, η μετάδοση κίνησης γίνεται με χρήση αλυσίδας.



Σχήμα 1-3. (α) Το τετράποδο ρομπότ StarIETH. (β) Το σχέδιο του τετράποδου ρομπότ StarIETH με τα χαρακτηριστικά μεγέθη των τμημάτων που το απαρτίζουν.

1.3.3 Το τετράποδο ρομπότ ANYmal

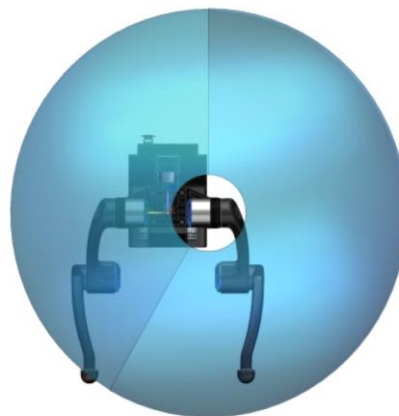
Το τετράποδο ρομπότ ANYmal [5] φέρει πόδια τριών βαθμών ελευθερίας, ενώ όλες οι αρθρώσεις του ποδιού είναι σχεδιασμένες κατά τρόπο ώστε να έχουν ικανή απόσταση μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-4. Αυτή η σχεδιαστική λεπτομέρεια δίνει την δυνατότητα στα μέλη των ποδιών να μπορούν να κάνουν πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονά τους, με συνέπεια το ρομπότ να είναι σε θέση να επιχειρήσει περίπλοκες κινήσεις. Το κάθε μέλος του ποδιού είναι εξ' ολοκλήρου κατασκευασμένο από ανθρακόνημα. Συνεπώς, αν κάποιο μέλος σπάσει ή φθαρεί, τότε αντικαθίσταται ολόκληρο.

Η επενέργεια σε κάθε μέλος του ποδιού επιτυγχάνεται με τους επενεργητές ANYdrive. Ο ANYdrive είναι ένας πλήρως ενσωματωμένος Series Elastic επενεργητής. Αποτελείται από κινητήρα υψηλής πυκνότητας ροπής και μειωτήρα τύπου Harmonic Drive σε σειρά με ένα

στροφικό ελατήριο για την επίτευξη της ενδοτικότητας. Η μέτρηση της ροπής του επενεργητή επιτυγχάνεται με μέτρηση της διαφοράς στην γωνιακή θέση των άκρων του ελατηρίου.



(α)



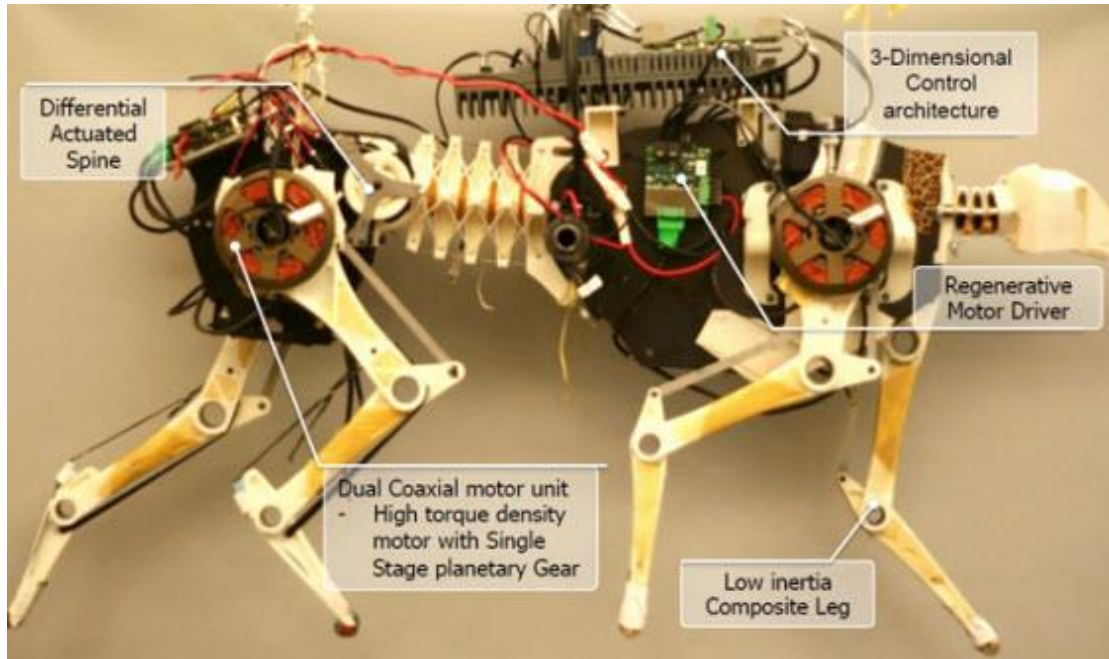
(β)

Σχήμα 1-4. (α) Το τετράποδο ρομπότ ANYmal. (β) Ο χώρος εργασίας ενός ποδιού του ρομπότ ANYmal.

1.3.4 Το τετράποδο ρομπότ MIT Cheetah

Το ρομπότ MIT Cheetah [6] φέρει πόδια τριών βαθμών ελευθερίας, τα οποία είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά, προκειμένου να επιτευχθεί μικρή ροπή αδράνειας και υψηλή αντοχή. Πιο συγκεκριμένα, ο πυρήνας του κάθε μέλους είναι κατασκευασμένος από αφρό πολυουρεθάνης, ενώ καλύπτεται εξωτερικά από ρητίνη πολυουρεθάνης υψηλής στιβαρότητας. Οι επενεργητές βρίσκονται τοποθετημένοι επάνω στο κυρίως σώμα του ρομπότ, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 1-5Σχήμα, για επίτευξη μικρότερης ροπής αδράνειας στα κινούμενα μέλη. Για την μετάδοση κίνησης στο Knee γίνεται χρήση χαλύβδινης ράβδου, υλοποιώντας μηχανισμό 5-Bar. Η μετάδοση κίνησης από το Knee στο Foot γίνεται με την χρήση ζεύγους τενόντων από υλικό Kevlar, διατηρώντας έτσι τον βιομιμητικό χαρακτήρα του ποδιού.

Δεδομένου ότι το MIT Cheetah σχεδιάστηκε για υψηλές επιδόσεις ταχύτητας, δεν χρησιμοποιήθηκαν μειωτήρες μεγάλης μείωσης καθώς τα κρουστικά φορτία που θα εμφανίζονταν θα δρούσαν καταστροφικά για αυτούς. Αντίθετα, για την επενέργηση ισχίου και γονάτου επιλέχθηκαν κινητήρες υψηλής πυκνότητας ροπής σε συνδυασμό με πλανητικό μειωτήρα μίας βαθμίδας και λόγου μείωσης 5.8:1. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την καλή εκτίμηση των δυνάμεων που ασκούνται στο άκρο μέσω μέτρησης ρεύματος, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η επίτευξη ελέγχου δύναμης στους επενεργητές. Έτσι, μέσω αυτών των επενεργητών, το ρομπότ μπορεί να αντιλαμβάνεται το έδαφος και να προσαρμόζει τον τρόπο με τον οποίο βαδίζει ή τρέχει. Η επενέργηση του τρίτου βαθμού ελευθερίας (απαγωγή και προσαγωγή του ισχίου) επιτυγχάνεται με την χρήση ενός επενεργητή χαμηλής ισχύος.



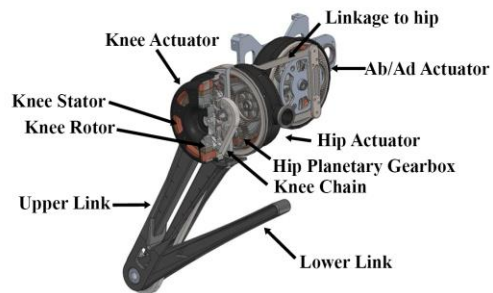
Σχήμα 1-5. Το τετράποδο ρομπότ MIT Cheetah.

1.3.5 Το τετράποδο ρομπότ MIT Cheetah 3

Το τετράποδο ρομπότ MIT Cheetah 3 [7] φέρει πόδια τριών βαθμών ελευθερίας. Οι επενεργητές είναι τοποθετημένοι κοντά στο κυρίως σώμα του ρομπότ, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 1-6. Με τον τρόπο αυτό, τα κινούμενα μέλη έχουν μικρή ροπή αδράνειας. Η μετάδοση κίνησης στο γόνατο γίνεται με σύστημα αλυσοκίνησης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγάλο εύρος κίνησης του μέλους αυτού, αυξάνοντας έτσι τις δυνατότητες του ρομπότ.



(α)



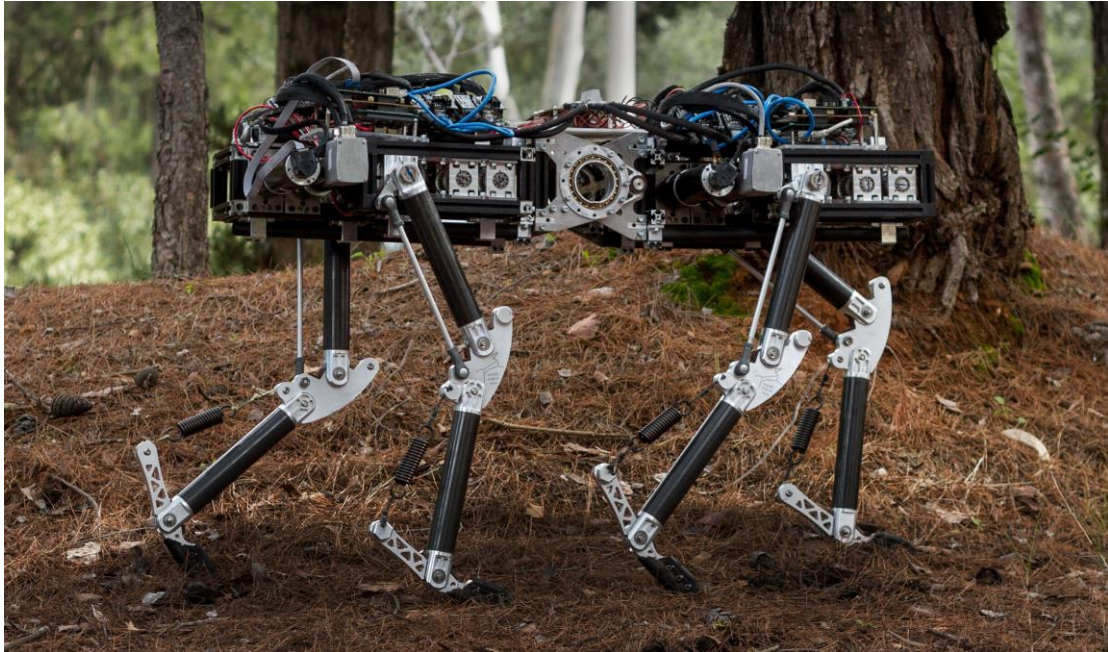
(β)

Σχήμα 1-6. (α) Το τετράποδο ρομπότ MIT Cheetah 3. (β) Σχηματική αναπαράσταση των κυριότερων μερών του ποδιού του ρομπότ.

Η απαγωγή και προσαγωγή του ισχίου (Ab/Ad) επιτυγχάνεται με ζεύγος χαλύβδινων ράβδων, ενώ ο αντίστοιχος επενεργητής βρίσκεται στο μέσο του σώματος του ρομπότ. Η επενέργηση ισχίου και γονάτου γίνεται με την χρήση δύο ομοαξονικών κινητήρων brushless υψηλής πυκνότητας ροπής, που βρίσκονται σε σειρά με πλανητικό μειωτήρα μικρής σχέσης μείωσης. Ο μικρός λόγος μείωσης προσφέρει την δυνατότητα στο ρομπότ να αντιλαμβάνεται τις δυνάμεις εδάφους μέσω μέτρησης ρεύματος.

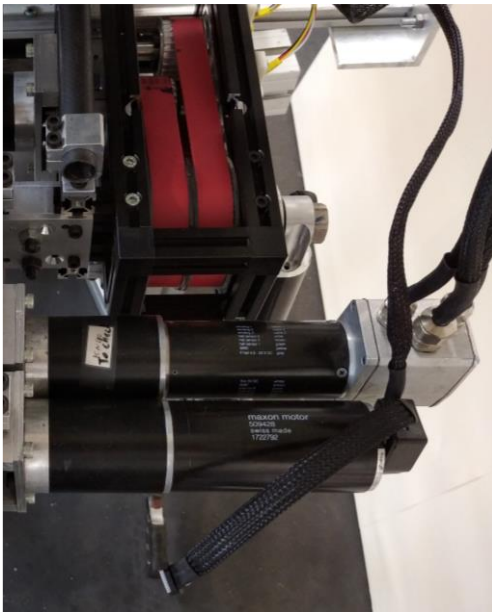
1.3.6 Το τετράποδο ρομπότ Laelaps II

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να γίνει σύντομη αναφορά στο σύστημα επενέργειας του τετράποδου ρομπότ Laelaps II [8], του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Ε.Μ.Π., που αποτελεί τον προκάτοχο της νέας διάταξης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Στο εν λόγω τετράποδο έχει υλοποιηθεί μια παραλλαγή της πρώτης μεθόδου αντιμετώπισης του ζητήματος επενέργειας. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 1-7, το ρομπότ φέρει πόδια δύο βαθμών ελευθερίας.



Σχήμα 1-7. Το τετράποδο ρομπότ Laelaps II.

Για την επενέργησή ισχίου και γονάτου χρησιμοποιούνται κινητήρες Brushless και Brushed, αντίστοιχα, του οίκου Maxon, Σχήμα 1-8. Ο κινητήρας του ισχίου συνδέεται σε σειρά με πλανητικό μειωτήρα λόγου μείωσης 53:1, ενώ ο κινητήρας του Knee βρίσκεται σε σειρά με πλανητική μείωση λόγου 43:1. Μεταξύ των εξόδων των μειωτήρων και των αρθρώσεων του ποδιού παρεμβάλλονται επίσης κατάλληλα σύστημα ιμαντοκίνησης. Το γεγονός ότι τα συστήματα επενέργειας φέρουν αρκετά μεγάλους λόγους μείωσης, καθιστά αναγκαία την χρήση κάποιου ελαστικού μέσου για την επίτευξη ενδοτικότητας. Για τον σκοπό αυτό τοποθετήθηκε στο κάτω άκρο του ποδιού πρισματικό ελατήριο εφελκυσμού υλοποιώντας έτσι σύστημα επενέργειας τύπου Series Elastic. Κατ' αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η προστασία τόσο των μειωτήρων, όσο και των αρθρώσεων του ρομπότ από τα κρουστικά φορτία κατά την βάδιση. Την ίδια στιγμή, κατά την φάση της προσγείωσης του ποδιού στο έδαφος αποθηκεύεται δυναμική ενέργεια στο ελατήριο, η οποία και απελευθερώνεται κατά την φάση της απογείωσης από αυτό.



(α)



(β)

Σχήμα 1-8. (α) Οι μονάδες επενέργησης ισχίου & γονάτου του τετράποδου ρομπότ Laelaps II. (β) Το ζεύγος εμπρόσθιων ποδιών του Laelaps II, με το σύστημα επίτευξης ενδοτικότητας να διακρίνεται.

1.4 Επισκόπηση της εργασίας

Η εργασία ξεκινά με το Κεφάλαιο 2, και την εισαγωγή στις βασικές τεχνολογίες των συστημάτων μείωσης που χρησιμοποιούνται στην επενέργηση των ρομπότ με πόδια. Αφού αναγνωριστούν τα κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων μείωσης καθώς και των εμπορικά διαθέσιμων μονάδων επενέργησης επιλέγεται το κατάλληλο σύστημα μείωσης για την νέα μονάδα επενέργησης.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται δυο διαφορετικές προσεγγίσεις στην μοντελοποίηση των θερμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την λειτουργία του κινητήρα της μονάδας επενέργησης. Ακολουθεί η επιλογή των κατάλληλων αισθητήρων θερμοκρασίας για την ενσωμάτωση στην μονάδα επενέργησης και ο πειραματικός προσδιορισμός βασικών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του κινητήρα. Τέλος πραγματοποιείται πειραματική αξιολόγηση των μοντέλων μέσω της χρήσης θερμικής κάμερας.

Το Κεφάλαιο 4 εστιάζει στον σχεδιασμό της νέας μονάδας επενέργησης και του ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας. Την εισαγωγή των προδιαγραφών ακολουθεί η περιγραφή των αναγκαίων τροποποιήσεων των τμημάτων του μειωτήρα και του κινητήρα καθώς και η παρουσίαση των τμημάτων που απαρτίζουν το κέλυφος της μονάδας επενέργησης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση του ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας και την ανάλυση των φορτίσεων κατά την κίνησή του.

Η κατασκευή και η συναρμολόγηση του πρωτότυπου ποδιού παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5, το οποίο περιλαμβάνει επίσης τον πρώτο έλεγχο λειτουργικότητας του ποδιού καθώς και θερμικό πείραμα με την μονάδα επενέργησης. Η καταγραφή των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά το πείραμα πραγματοποιείται με χρήση θερμικής κάμερας.

Τέλος στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα σχετικά με τον σχεδιασμό και την υλοποίηση τόσο της μονάδας επενέργειας όσο και του νέου ρομποτικού ποδιού. Την εργασία ολοκληρώνουν τα προτεινόμενα επόμενα βήματα για την βελτίωση και περαιτέρω εξέλιξη των πρωτοτύπων που αναπτύχθηκαν.

2 Σχεδιαστικές αρχές συστημάτων επενέργειας

2.1 Εισαγωγή

Έπειτα από τον σαφή διαχωρισμό των δύο βασικών τάσεων στην αντιμετώπιση του ζητήματος της επενέργειας σε γνωστά ρομπότ με πόδια, θα γίνει μια εκτενής ανάλυση εστιάζοντας κυρίως στα συστήματα μείωσης που τα απαρτίζουν.

Παρατηρείται ότι σχεδόν όλοι οι σχεδιασμοί που εξετάστηκαν ενσωματώνουν διατάξεις μείωσης που είναι off-the-shelf προϊόντα. Πιο συγκεκριμένα, όλα τα είδη μείωσης στα γνωστά ρομπότ ανήκουν στις κατηγορίες των Harmonic Drives, Cycloidal Drives, καθώς και των πλανητικών συστημάτων μείωσης. Αυτό συμβαίνει διότι τα εν λόγω συστήματα είναι δοκιμασμένα να καλύπτουν συγκεκριμένες προδιαγραφές.

Όπως τονίσθηκε, τα συστήματα μείωσης υφίστανται ισχυρές κρουστικές καταπονήσεις κατά την βάρδια. Συνεπώς, θα ήταν παρακινδυνευμένο στις εφαρμογές αυτές να επινοούνται και να χρησιμοποιούνται ειδικά συστήματα μείωσης που να εξυπηρετούν απόλυτα τις ανάγκες έκαστης ρομποτικής διάταξης. Αυτό συνεπάγεται ότι κατά την φάση του σχεδιασμού των συστημάτων επενέργειας, εισάγονται αρκετοί δεσμευτικοί παράγοντες. Ο σχεδιαστής ενός τέτοιου συστήματος καλείται να επιλέξει ανάμεσα σε μια γκάμα έτοιμων συστημάτων μείωσης που υπάρχουν ήδη στην αγορά.

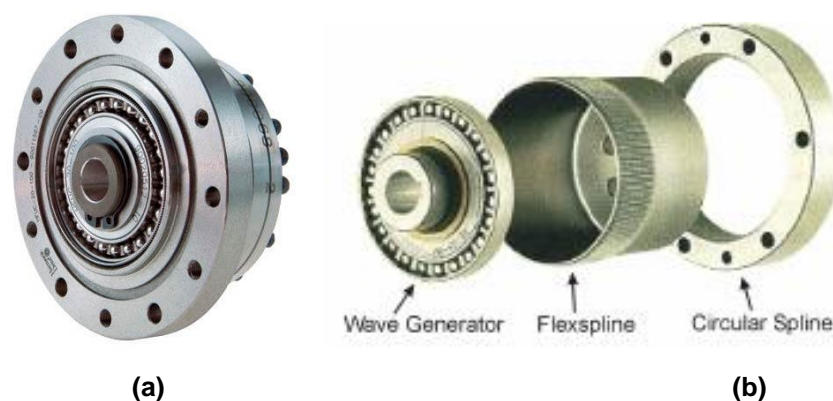
Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια πλήρης αναφορά στα συστήματα μείωσης που διατίθενται στην αγορά και εξετάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα έκαστου συστήματος. Τέλος, γίνεται η επιλογή του συστήματος μείωσης που ανταποκρίνεται στις ανάγκες της υπό μελέτη εφαρμογής με βάση καλά ορισμένα κριτήρια.

2.2 Οι επικρατέστερες τεχνολογίες μείωσης

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα πλέον χρησιμοποιούμενα συστήματα μείωσης που διατίθενται στην αγορά. Γίνεται εκτενής αναφορά στα Harmonic Drives, τα Cycloidal Drives και τους πλανητικούς μειωτήρες, όπου αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας, τα πλεονεκτήματα, καθώς και τα μειονεκτήματά τους.

2.2.1 Μειωτήρες Harmonic Drive

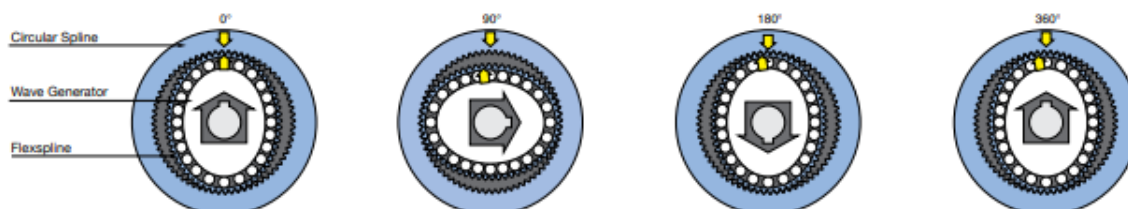
Τα βασικά δομικά μέρη των Harmonic Drives είναι το Circular Spline, το Flexspline και το Wave Generator, όπως διακρίνονται και στο Σχήμα 2-1. Το Wave Generator είναι η είσοδος του συστήματος που εργάζεται σε υψηλές στροφές, ενώ το Flexspline είναι η έξοδος του συστήματος. Το Circular Spline είναι το σταθερό μέρος του μειωτήρα. Πρόκειται για έναν συμπαγή κυλινδρικό δακτύλιο με εσωτερικά δόντια γραναζιού. Το Flexspline είναι ένα άκαμπτο, λεπτό κυλινδρικό κύπελλο με εξωτερικά δόντια στο ανοικτό άκρο του κυπέλλου. Το κλειστό άκρο του κυπέλλου αποτελεί μία φλάντζα όπου επιτελεί τον ρόλο της εξόδου ροπής. Το Wave Generator περιλαμβάνει ένα λεπτό σφαιρικό ρουλεμάν προσαρμοσμένο σε ελλειπτικό δίσκο και αποτελεί έναν μετατροπέα ροπής υψηλής απόδοσης.



Σχήμα 2-1. (a) Τυπικός μειωτήρας Harmonic Drive. (b) Τα δομικά μέρη ενός μειωτήρα Harmonic Drive.

Η αρχή λειτουργίας των Harmonic Drives είναι η ακόλουθη. Το Flexspline έχει ελαφρώς μικρότερη διάμετρο από το Circular Spline και συνήθως έχει δύο λιγότερα δόντια από αυτό. Το ελλειπτικό σχήμα του Wave Generator προκαλεί την εμπλοκή των δοντιών του Flexspline με το Circular Spline σε δύο περιοχές στα αντίθετα άκρα του άξονα της έλλειψης. Καθώς περιστρέφεται το Wave Generator, η ζώνη εμπλοκής του δοντιού μεταφέρεται κατά τον κύριο άξονα της έλλειψης.

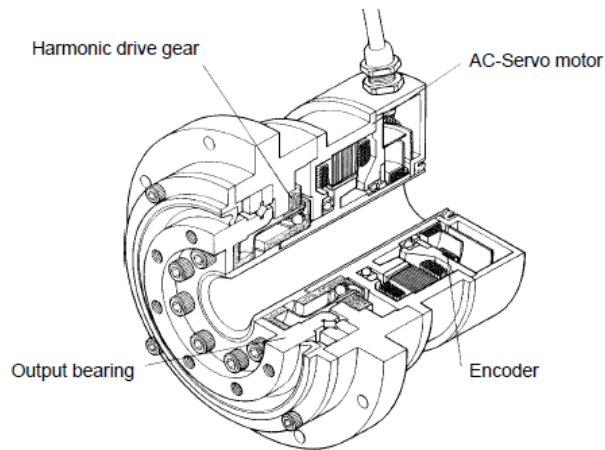
Για κάθε 180° δεξιόστροφης κίνησης του Wave Generator, το Flexspline κινείται αριστερόστροφα κατά ένα δόντι σε σχέση με το Circular Spline, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-2. Κάθε ολοκληρωμένη περιστροφή του Wave Generator κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού προκαλεί αριστερόστροφη κίνηση του Flexspline κατά δύο δόντια σε σχέση με το Circular Spline.



Σχήμα 2-2. Η κίνηση του Flexspline κατά την περιστροφή του Wave Generator.

Τα πλεονεκτήματα των Harmonic Drives είναι πολυάριθμα, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών μείωσης. Το βασικότερο πλεονέκτημά τους είναι ότι έχουν σχεδόν μηδενικό backlash. Ταυτόχρονα, η ισχύς μεταδίδεται μέσω ταυτόχρονης εμπλοκής πολλαπλών δοντιών. Το γεγονός αυτό προσφέρει υψηλή συγκέντρωση ροπής, ενώ ο μειωτήρας παρουσιάζει πολύ υψηλή στρεπτική δυσκαμψία. Επιπρόσθετα, είναι δυνατή η επίτευξη μεγάλων λόγων μείωσης με εύρος από 30/1 έως 320/1 σε μία μόνο βαθμίδα.

Τέλος, ένα πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό των Harmonics είναι η δυνατότητα υλοποίησης επενεργητών κοίλου άξονα, όπως στο Σχήμα 2-3. Το ιδιαίτερο αυτό γνώρισμα δίνει την δυνατότητα σε καλωδιώσεις, αλλά και ατράκτους να διέρχονται διαμέσου του κεντρικού άξονα της μονάδας. Ως αποτέλεσμα, απλοποιείται σημαντικά ο σχεδιασμός των ρομποτικών διατάξεων.



Σχήμα 2-3. Επενεργητής κοίλου άξονα με την χρήση Harmonic Drive.

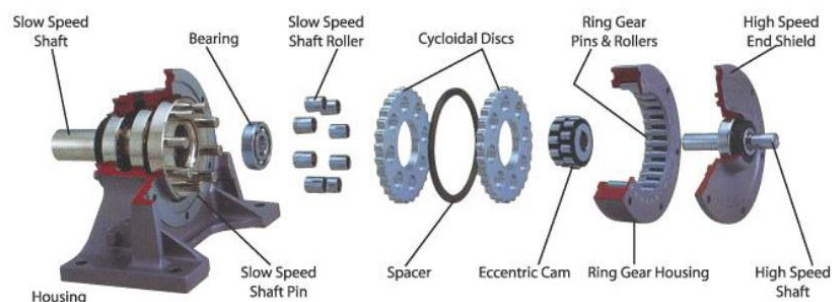
Ένα βασικό μειονέκτημα των Harmonic Drives είναι ότι οι εν λόγω μειώσεις παρουσιάζουν το ονομαζόμενο κινηματικό σφάλμα. Πρόκειται για ένα εγγενές περιοδικό σφάλμα τοποθέτησης που είναι υπεύθυνο για την υποβάθμιση της απόδοσης της μετάδοσης. Εκφράζεται ως η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής θέσης και της πραγματικής θέσης της εξόδου και εξαρτάται κυρίως από το φορτίο και την ταχύτητα περιστροφής.

2.2.2 Μειωτήρες Cycloidal Drive

Τα βασικά δομικά μέρη των Cycloidal Drives είναι ο άξονας εισόδου υψηλής ταχύτητας, ο άξονας εξόδου, το Eccentric Cam, τα Cycloidal Discs, το Ring Gear Housing, τα Ring Gear Pins & Rollers και τα Slow Speed Shaft Pins, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2-4. Στις περισσότερες των περιπτώσεων στα Cycloidal Drives ενσωματώνονται και πλανητικά συστήματα γραναζιών.

Κατά την λειτουργία ενός μονοβάθμιου μειωτήρα Cycloidal Drive, τα δύο Cycloidal Discs στρέφονται με μια σχετική γωνία κίνησης του ενός προς τον άλλο ίση με 180° . Το Eccentric Cam περιστρέφεται με τον ίδιο αριθμό περιστροφών και στην ίδια κατεύθυνση με το τον άξονα εισόδου. Τα Cycloidal Discs λαμβάνουν κίνηση από την περιστροφή του Eccentric Cam μέσω εδράνων. Τα Cycloidal Discs είναι συζευγμένα με τα Ring Gear Pins & Rollers που βρίσκονται μέσα στο σώμα του Ring Gear Housing.

Αποτέλεσμα αυτής της σύζευξης είναι η κατάλληλη κίνηση των Cycloidal Discs. Τα Slow Speed Shaft Pins, των οποίων ο φορέας είναι συνδεδεμένος με τον άξονα εξόδου, διέρχονται από τα κυκλικά ανοίγματα των Cycloidal Discs και μεταφέρουν έτσι την κίνηση των Cycloidal Discs προς τον άξονα εξόδου. Για περιττό αριθμό βαθμίδων μείωσης, ο άξονας εξόδου περιστρέφεται με την αντίστροφη φορά από τον άξονα εισόδου.



Σχήμα 2-4. Τα δομικά μέρη των Cycloidal Drives.

Τα πλεονεκτήματα των Cycloidal Drives είναι ότι έχουν σχεδόν μηδενικό backlash, ενώ προσφέρουν υψηλή συγκέντρωση ροπής και στρεπτική δυσκαμψία και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε αρθρώσεις όπου η στιβαρότητα είναι πιο σημαντική από την ελαχιστοποίηση της μάζας. Παρουσιάζουν επίσης πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου και κραδασμών κατά την λειτουργία τους. Επιπλέον, παρέχουν την δυνατότητα επίτευξης μεγάλων λόγων μείωσης σε μία μόνο βαθμίδα με εύρος τιμών από 10/1 έως πάνω από 100/1, ενώ παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό απόδοσης. Την ίδια στιγμή, λόγω του ότι πάνω από το 60% των στοιχείων μετάδοσης βρίσκονται σε συνεχή επαφή, αυτός ο τύπος μείωσης μπορεί να παραλάβει βραχυχρόνιες υπερφορτίσεις ακόμη και ύψους 500%.

Η συνεργασία των μελών των Cycloidal Drives με πλανητικές μειώσεις προσφέρει εξαιρετικά αποτελέσματα όσον αφορά την απορρόφηση κρουστικών φορτίων, γεγονός που δεν καλύπτεται αλλιώς με την χρήση μόνο συμβατικών πλανητικών γραναζιών. Τέτοιου είδους μεταδόσεις κίνησης ονομάζονται και R-V Drives και ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-5.

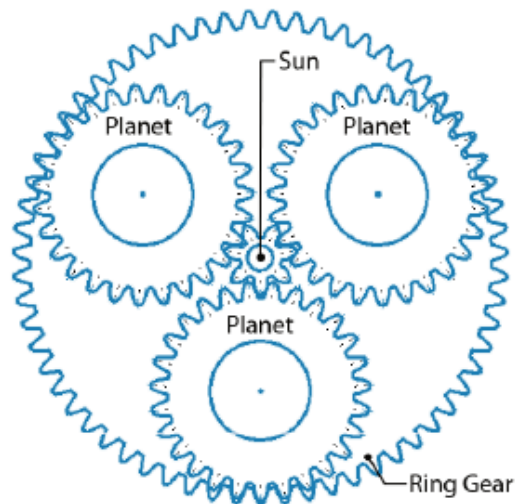


Σχήμα 2-5. Το R-V Drive.

Ένα μειονέκτημα των Cycloids είναι ότι παρουσιάζουν φαινόμενα αστοχίας λόγω κόπωσης. Ταυτόχρονα, σε εφαρμογές όπου Cycloidal Drives με μεγάλους λόγους μείωσης εργάζονται σε υψηλές ταχύτητες, εμφανίζονται φαινόμενα ταλαντώσεων.

2.2.3 Πλανητικοί μειωτήρες

Τα πλανητικά συστήματα μείωσης στροφών αποτελούνται από τρία κύρια μέρη, το δακτυλιοειδές γρανάζι (Ring Gear), ο ήλιος (Sun) και οι πλανήτες (Planets), όπως διακρίνονται στο Σχήμα 2-6. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η κάθε βαθμίδα μείωσης χρησιμοποιεί δύο ή τρεις πλανήτες. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται περισσότεροι πλανήτες σε μια βαθμίδα μείωσης, για λόγους αύξησης της πυκνότητας ροπής.



Σχήμα 2-6. Τα δομικά μέρη ενός τυπικού πλανητικού μειωτήρα.

Στα πλανητικά συστήματα μείωσης, η είσοδος υψηλών στροφών είναι συνήθως ο ήλιος και η έξοδος είναι ο άξονας που συνδέεται με τον φορέα των πλανητών. Το δακτυλιοειδές γρανάζι διατηρείται στις περισσότερες των περιπτώσεων σταθερό. Οι πλανήτες βρίσκονται σε σύζευξη τόσο με το δακτυλιοειδές γρανάζι, όσο και με τον ήλιο. Με τον τρόπο αυτό, περιστροφή του ηλίου μετατρέπεται σε περιστροφή των πλανητών τόσο γύρω από τον άξονά τους, όσο και γύρω από τον άξονα του ηλίου. Όλοι οι πλανήτες βρίσκονται σε έναν κοινό φορέα, ο οποίος και αποτελεί την έξοδο του συστήματος.

Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να υλοποιηθούν διαφορετικές διατάξεις από την παραπάνω. Για παράδειγμα, η είσοδος του συστήματος μπορεί να είναι το δακτυλιοειδές γρανάζι, η έξοδος να είναι ο φορέας των πλανητών και ο ήλιος να διατηρείται σταθερός.

Τα βασικότερο από τα πλεονεκτήματα των πλανητικών συστημάτων μείωσης είναι ότι προσφέρουν υψηλή συγκέντρωση ροπής, ενώ έχουν αρκετά μικρό όγκο αναφορικά με τους λόγους μείωσης που επιτυγχάνουν συγκριτικά με άλλους τρόπους μείωσης. Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να επιτευχθεί μεγάλο εύρος λόγων μείωσης, από 3/1 έως και πάνω από 100/1 σε μία μόνο βαθμίδα. Την ίδια στιγμή, δεδομένου ότι γίνεται χρήση πολλών μικρών γραναζιών, εμφανίζεται μικρή αδράνεια.

Στους πλανητικούς μειωτήρες, η πυκνότητα ροπής μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη περισσότερων πλανητών, αυξάνοντας έτσι τα σημεία επαφής. Αυτό σημαίνει ότι ένα πλανητικό γρανάζι που φέρει τρεις πλανήτες, μπορεί να μεταφέρει τρεις φορές τη ροπή ενός παρόμοιου μεγέθους ζεύγους δύο γραναζιών.

2.3 Αξιολόγηση έτοιμων μονάδων επενέργησης

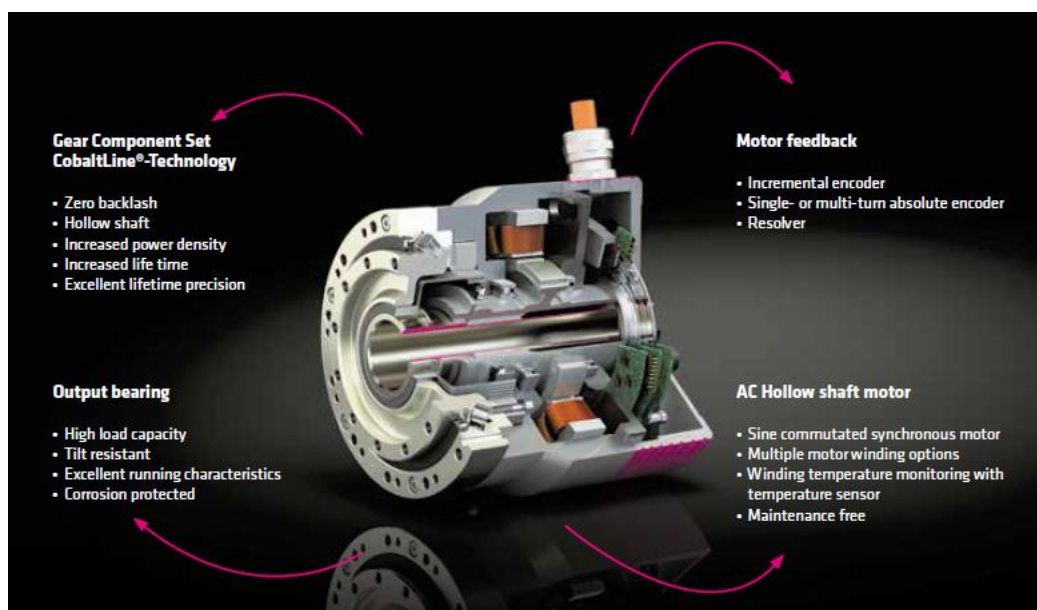
Όπως εξηγήθηκε, ο βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι να κατασκευαστούν μονάδες επενέργησης που θα ανταποκρίνονται καλύτερα στις ανάγκες ενός ρομπότ με πόδια. Οι μονάδες επενέργησης αυτές θα προκύψουν με τον κατάλληλο συνδυασμό κινητήρων με τους αντίστοιχους μειωτήρες. Ο λεπτομερής σχεδιασμός τους αποτελεί μια διαδικασία που είναι εξαιρετικά απαιτητική σε δεξιότητες, χρόνο και κόστος. Τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργηθεί μεγάλο επιχειρηματικό ενδιαφέρον για την κατασκευή τέτοιου υλικού, δίνοντας διάφορες λύσεις στο πρόβλημα. Στην αγορά πλέον είναι διαθέσιμα συναρμολογήματα που ενσωματώνουν συστήματα όπως κινητήρες, μειωτήρες, φρένα, encoders, drivers, και Inertial

Measurement Units (IMUs). Πολλά από αυτά συνοδεύονται και από έτοιμο λογισμικό, που διευκολύνει κατά πολύ τον προγραμματισμό και τον έλεγχο τους. Επομένως, ενσωματώνοντας έτοιμο υλικό, μειώνεται ο όγκος και το βάρος της ρομποτικής διάταξης, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η αξιοπιστία της.

Επομένως κρίθηκε σκόπιμο να γίνει διερεύνηση ανάμεσα στους έτοιμους επενεργητές που είναι διαθέσιμοι, ώστε να εξακριβωθεί εάν πληρούν τις ανάγκες της εφαρμογής που μελετάται. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο από τις πιο ενδιαφέρουσες περιπτώσεις έτοιμων συστημάτων επενέργειας, καθώς και το σύστημα μετάδοσης κίνησης του τετραπόδου Laelaps II. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα χαρακτηριστικά που βρίσκονται εντός του πεδίου ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας, όπως τα δομικά στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα μετάδοσης.

Η μονάδα επενέργειας CanisDrive

Τα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν τον σχεδιασμό της μονάδας επενέργειας CanisDrive [9] είναι η προσπάθεια για ελαχιστοποίηση του όγκου και μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας του συστήματος. Το ιδιαίτερο γνώρισμα της μονάδας είναι η ύπαρξη κοίλου άξονα σε όλο το μήκος της συσκευής, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 2-7, γεγονός που συνοδεύεται με πληθώρα πλεονεκτημάτων. Η περιστροφή της ατράκτου στην έξοδο επιτυγχάνεται με την χρήση ενός κινητήρα AC, ο οποίος συνεργάζεται με μειωτήρα στροφών Harmonic Drive. Οι μονάδες CanisDrive διατίθενται σε οκτώ διαφορετικά μεγέθη με σχέσεις μείωσης από 50/1 έως 160/1 και μέγιστη ροπή εξόδου από 23 έως 1840 Nm. Ταυτόχρονα, δίνεται η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε μια γκάμα υποσυστημάτων, αναφορικά με τα τυλίγματα του κινητήρα, την ύπαρξη ή όχι φρένου και τα είδη αισθητήρων που θα φέρει η μονάδα επενέργειας.



Σχήμα 2-7. Η μονάδα επενέργειας CanisDrive.

Αναφορικά με τους αισθητήρες που διαθέτει ο εν λόγω επενεργητής, η συσκευή είναι εξοπλισμένη με αισθητήρες θέσης (encoders) στην πίσω πλευρά του κινητήρα. Για λόγους προστασίας του κινητήρα από φαινόμενα υπερθέρμανσης, ελέγχεται διαρκώς η θερμοκρασία των τυλιγμάτων μέσω της χρήσης ενός θερμίστορ που βρίσκεται ενσωματωμένο στα τυλίγματα.

Εξετάζοντας τις προδιαγραφές του CanisDrive, συμπεραίνεται ότι η χρήση μεγάλων λόγων μείωσης καθιστά την μονάδα αυτή ως μη κατάλληλη για την ενσωμάτωσή της στην διάταξη του ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας. Όπως τονίσθηκε αρχικά, οι επενεργητές που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να φέρουν μικρές μειώσεις, ώστε το ρομπότ να μπορεί να αντιλαμβάνεται εύκολα τις δυνάμεις εδάφους με απλό έλεγχο ρεύματος.

Η μονάδα επενέργησης του τετραπόδου MIT Cheetah Mini

Οι σχεδιαστικές αρχές που διέπουν τον επενεργητή του τετραπόδου ρομπότ MIT Cheetah Mini [10] βρίσκονται σε συμφωνία με τις προδιαγραφές που θα πρέπει να πληροί και ο επενεργητής που μελετάται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Η μονάδα επενέργησης που φαίνεται στο Σχήμα 2-8 είναι βασισμένη στην συνεργασία ενός αρκετά ισχυρού κινητήρα σε συνδυασμό με ένα κιβώτιο μικρής μείωσης. Πιο συγκεκριμένα, ως πηγή ισχύος έχει χρησιμοποιηθεί ένας κινητήρας outrunner συνεχούς ρεύματος, παρόμοιος με τον T Motor U8, ο οποίος είναι σχεδιασμένος για εφαρμογή σε drone. Η υψηλή συγκέντρωση ροπής σε συνδυασμό με το σχετικά μικρό κόστος του, τον καθιστά μια από τις πλέον αξιόλογες επιλογές για την κατηγορία του. Λόγω της πληθώρας των πλεονεκτημάτων του, παρόμοιος κινητήρας έχει χρησιμοποιηθεί και σε άλλα ρομπότ που φέρουν πόδια, όπως το GOAT [11] και το Minitaur [12].

Αναφορικά με το σύστημα μείωσης, η μονάδα αυτή φέρει μια βαθμίδα πλανητικής μείωσης με λόγο 6/1. Ο μειωτήρας έχει ενσωματωθεί με κατάλληλο τρόπο εντός του επενεργητή, ώστε να υλοποιηθεί κατά το δυνατόν πιο συμπαγής σχεδιασμός. Ο επενεργητής φέρει επίσης ενσωματωμένα ηλεκτρονικά συστήματα για την οδήγηση του κινητήρα, αλλά και encoder για την μέτρηση της θέσης του ρότορα.



Σχήμα 2-8. Η μονάδα επενέργησης του τετραπόδου MIT Cheetah Mini

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η μονάδα επενέργησης αυτή υλοποιήθηκε σχεδόν παράλληλα με την έναρξη της παρούσας μελέτης. Η εν λόγω μονάδα αρχικά δεν ήταν εμπορικά διαθέσιμη, αλλά τον τελευταίο καιρό έχει αρχίσει έντονο επιχειρηματικό ενδιαφέρον γύρω από αυτήν. Στην αγορά διατίθενται κάποιες απομιμήσεις της διάταξης αυτής, σε αρκετά ανταγωνιστικές τιμές για τα χαρακτηριστικά που μόλις περιεγράφηκαν. Οι κατασκευάστριες εταιρείες όμως δεν είναι σε θέση να παρέχουν επαρκή δεδομένα για την μηχανική και ηλεκτρική συμπεριφορά του συστήματος. Επομένως, το προϊόν αυτό θα πρέπει να δοκιμασθεί κατάλληλα πρώτα, ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία του.

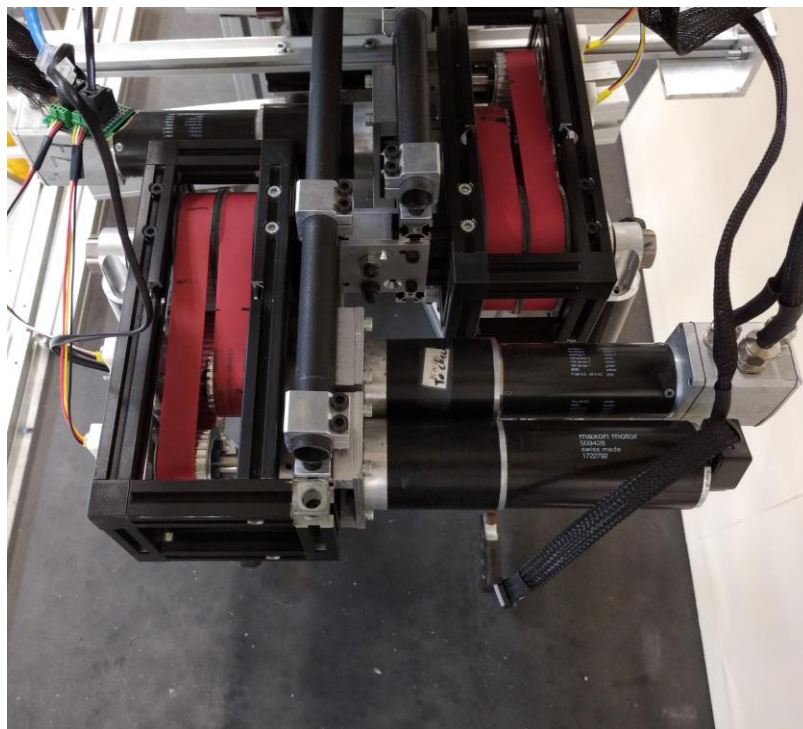
Σε αντίθεση με τον επενεργητή CanisDrive που εξετάσθηκε, η εμπορική έκδοση της μονάδας επενέργησης αυτής διαθέτει καθορισμένα χαρακτηριστικά ροπής και ταχύτητας

περιστροφής. Πιο συγκεκριμένα, δεν είναι δυνατή η ενσωμάτωση κατά παραγγελία του κατάλληλου κινητήρα ή μειωτήρα, καθώς και η προσθήκη άλλων αισθητήρων, όπως θερμίστορ για μέτρηση θερμοκρασίας.

Το σύστημα επενέργειας του τετραπόδου Laelaps II

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 2-9, στην περίπτωση του τετραπόδου ρομπότ Laelaps II υλοποιείται συνεργασία έτοιμων μονάδων επενέργειας με σύστημα τροχαλιών. Έκαστη μονάδα αποτελείται από κινητήρα DC σε σειρά με πλανητικό σύστημα μεγάλου λόγου μείωσης. Η ισχύς στην συνέχεια μεταφέρεται σε σύστημα τροχαλιών, οι οποίες με την χρήση οδοντωτού ιμάντα κινούν τα δύο μέλη του ποδιού.

Αυτή η μέθοδος μετάδοσης κίνησης έχει το πλεονέκτημα ότι αλλάζοντας κατάλληλα τις τροχαλίες είναι δυνατή η επίτευξη διαφορετικών σχέσεων μετάδοσης με μικρό κόστος. Ένα από τα μειονεκτήματα της λύσης αυτής είναι ότι παρουσιάζει αυξημένο όγκο και βάρος. Ταυτόχρονα, σημειώνεται αύξηση στις απώλειες λόγω τριβών στα πολυάριθμα έδρανα που χρησιμοποιούνται. Λόγω της ύπαρξης τροχαλιών, το σύστημα μετάδοσης περιλαμβάνει αρκετούς συνδέσμους, οι οποίοι είναι πιθανό να εμφανίσουν φαινόμενα ολίσθησης, μειώνοντας έτσι την αξιοπιστία του συστήματος. Σε συνάρτηση με αυτό, η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος μετάδοσης κίνησης δυσχεραίνει την συντήρησή του.



Σχήμα 2-9. Οι μονάδες επενέργειας του Laelaps II.

Στον παρόν σχεδιασμό, οι κινητήρες του ρομπότ δεν προστατεύονται κατάλληλα σε περίπτωση πτώσης στο έδαφος, γεγονός που είναι αρκετά επισφαλές για τους επενεργητές. Σε αντίστοιχη λογική, διακρίνεται έλλειψη σε θέματα προστασίας τόσο σε ευαίσθητα μηχανολογικά μέρη, όσο και σε ηλεκτρονικά. Το γεγονός αυτό μπορεί να μειώσει τον χρόνο ζωής ή ακόμα και να αποβεί καταστροφικό στην περίπτωση όπου το ρομπότ βρεθεί σε περιβάλλοντα με αυξημένη υγρασία και σκόνη.

2.4 Επιλογή κατάλληλου συστήματος μείωσης

2.4.1 Συγκέντρωση στοιχείων σε βάση δεδομένων

Όπως τονίσθηκε, τίθενται αρκετοί περιορισμοί σε σχέση με το είδος και τα χαρακτηριστικά των συστημάτων μείωσης που είναι διαθέσιμα. Το γεγονός αυτό πρακτικά καθιστά μονόδρομο την επιλογή ανάμεσα σε μια πεπερασμένη λίστα έτοιμων off-the-shelf μειωτήρων. Η κατά το δυνατόν ευρεία γνώση των συστημάτων μείωσης που διατίθενται από τους κατασκευαστικούς οίκους παγκοσμίως, θα καταστήσει πιο εύστοχη την επιλογή μειωτήρα για τον επενεργητή που πρόκειται να κατασκευασθεί. Σε αυτό το πλαίσιο, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει καταγραφή μεγάλου μέρους των μειωτήρων που υπάρχουν διαθέσιμοι στην αγορά από τις κατηγορίες των Harmonic Drives, Cycloidal Drives και πλανητικών μειωτήρων.

Όλα τα δεδομένα ανακτήθηκαν από τεχνικούς καταλόγους των κατασκευαστών παγκοσμίως και καταχωρήθηκαν σε ένα αρχείο Excel. Κάνοντας χρήση των εργαλείων που προσφέρει το περιβάλλον Excel, έγινε το κατάλληλο φιλτράρισμα ανάλογα με τα κριτήρια που τέθηκαν. Με αντίστοιχο τρόπο, εξήχθησαν χρήσιμα διαγράμματα προκειμένου να συγκριθούν οι τρεις αυτές τεχνολογίες μείωσης.

2.4.2 Επεξηγήσεις χρήσιμων μεγεθών

Στο σημείο αυτό θα εξηγηθούν κάποια από τα χρήσιμα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τα συστήματα μείωσης, τα οποία και λήφθηκαν υπ' όψιν κατά την επιλογή.

Λόγος μείωσης (Ratio)

Πρόκειται για τον λόγο μείωσης της ταχύτητας εισόδου προς την ταχύτητα εξόδου, όταν το σύστημα μείωσης λειτουργεί με τον συμβατικό τρόπο, όπως δηλαδή περιεγράφηκε κατά την παρουσίαση των Harmonic Drives, των Cycloidal Drives και των πλανητικών μειωτήρων. Είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι ανάλογα με την διάταξη λειτουργίας των μειωτήρων, δηλαδή ανάλογα με το ποιο μέλος είναι η είσοδος, ποιο η έξοδος και ποιο είναι πακτωμένο, ο λόγος μείωσης αλλάζει.

Ειδική επαναλαμβανόμενη μέγιστη ροπή (Specific Repeatable Peak Torque)

Πρόκειται για τον λόγο της μέγιστης ροπής που μπορεί να μεταδώσει στιγμιαία το κιβώτιο μείωσης προς το βάρος του. Καθορίζει τις μέγιστες επιτρεπόμενες ροπές επιτάχυνσης και πέδησης. Κατά τη διάρκεια του κανονικού κύκλου λειτουργίας, η ροπή αυτή δεν πρέπει να ξεπεραστεί, διότι αυτό θα έχει συνέπειες για τη διάρκεια ζωής του μειωτήρα. Δεδομένου ότι το σύστημα μείωσης που θα επιλεγεί προορίζεται για εφαρμογή σε ρομπότ με πόδια, η φόρτιση θα γίνεται στιγμιαία και επαναλαμβανόμενα. Συνεπώς, το μέγεθος αυτό αποτελεί ένα από τα βασικά κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου μειωτήρα.

Ροπή αδράνειας (Moment of inertia)

Το μέγεθος αυτό αφορά την ροπή αδράνειας των στρεφόμενων μερών του μειωτήρα. Κατά την βάρδιση των ρομπότ που φέρουν πόδια εκτελείται επαναλαμβανόμενη επιτάχυνση και επιβράδυνση των μελών τους. Για τον λόγο αυτό, η ροπή αδράνειας διαδραματίζει μείζονα ρόλο στην απόδοση των συστημάτων επενέργειας της ρομποτικής διάταξης.

Ροπή εκκίνησης άνευ φορτίου (No Load Starting Torque)

Πρόκειται για την ροπή που απαιτείται να εφαρμοσθεί στην είσοδο του μειωτήρα, προκειμένου τα μέρη του συστήματος να ξεκινήσουν να περιστρέφονται. Εκφράζει την ροπή που είναι αναγκαία ώστε να υπερνικηθούν οι τριβές του συστήματος.

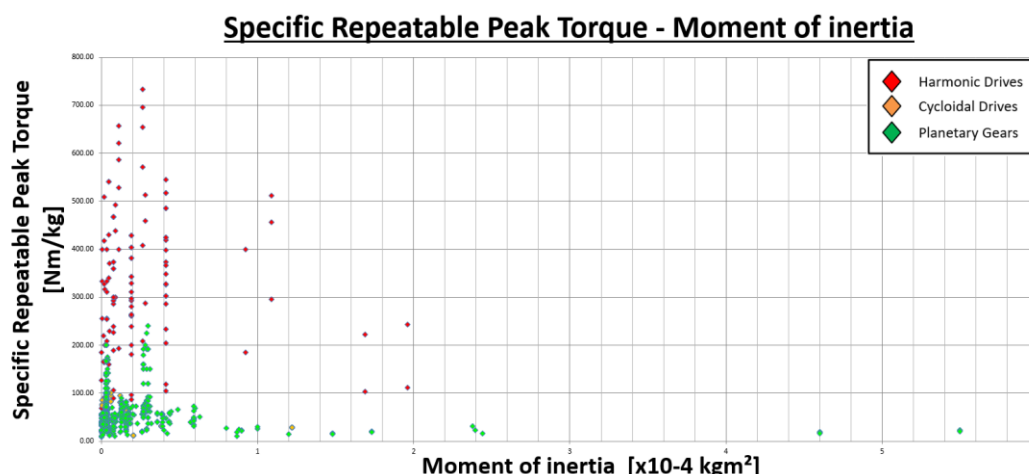
Ροπή ανάστροφης κίνησης άνευ φορτίου (No Load Back Driving Torque)

Πρόκειται για την ροπή που απαιτείται να εφαρμοσθεί στην έξοδο του συστήματος μείωσης, προκειμένου τα κινούμενα μέρη του να ξεκινήσουν να στρέφονται ανάστροφα. Το μέγεθος αυτό είναι χρήσιμο για τους σκοπούς που πρόκειται να επιτελεί ο επενεργητής που θα σχεδιαστεί. Το μέγεθος αυτό αποτελεί δείκτη του backdrivability για ένα σύστημα μείωσης στροφών.

2.4.3 Εξαγωγή – Σχολιασμός γραφημάτων

Στο σημείο αυτό θα γίνει επεξεργασία των στοιχείων που καταγράφηκαν στο αντίστοιχο αρχείο Excel και θα εξαχθούν διάφορα ενδιαφέροντα γραφήματα, τα οποία και θα σχολιασθούν στην συνέχεια. Τα διαγράμματα αυτά αφορούν τα χρήσιμα μεγέθη που εξετάστηκαν προηγουμένως.

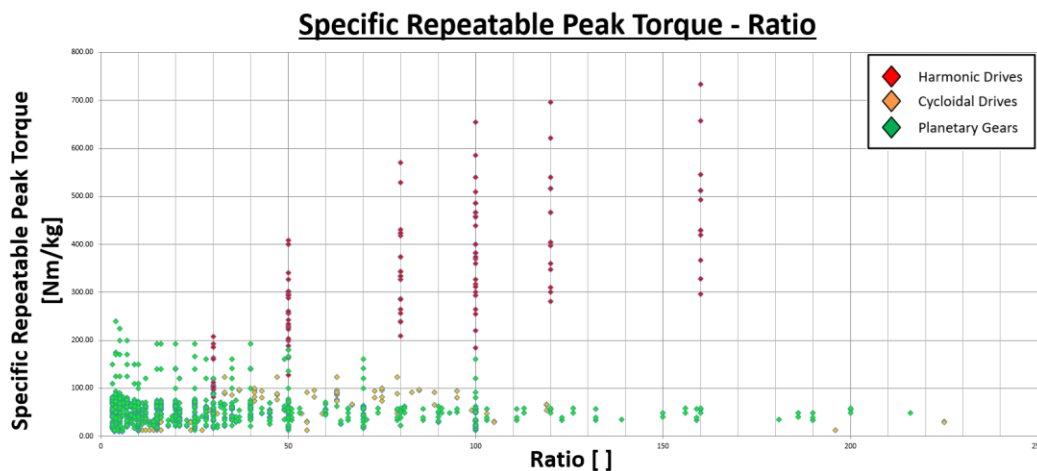
Το πρώτο γράφημα, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-10, απεικονίζει το πώς μεταβάλλεται η ειδική επαναλαμβανόμενη μέγιστη ροπή συναρτήσει της ροπής αδράνειας, ανάλογα με το είδος της μείωσης. Στο διάγραμμα αυτό, με κόκκινο χρώμα σκιαγραφούνται τα Harmonic Drives, με πορτοκαλί χρώμα τα Cycloidal Drives και με πράσινο χρώμα παρουσιάζονται τα πλανητικά συστήματα. Όπως εξηγήθηκε, σε ρομποτικές διατάξεις που φέρουν πόδια είναι σημαντική η ύπαρξη μεγάλων τιμών ειδικής επαναλαμβανόμενης μέγιστης ροπής και μικρών τιμών ροπής αδράνειας στις μονάδες μείωσης. Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι τα Harmonic Drives ανταποκρίνονται καλύτερα στις απαιτήσεις αυτές σε σχέση με τα άλλα δύο συστήματα. Λόγω του μικρού αριθμού των Cycloid Drives που είναι διαθέσιμα στην αγορά, στο γράφημα παρατηρείται ότι σε μερικές περιπτώσεις τα πορτοκαλί σημεία καλύπτονται από τα κόκκινα και πράσινα των Harmonic Drives και των πλανητικών μειωτήρων, αντίστοιχα, γεγονός που τα καθιστά δυσδιάκριτα.



Σχήμα 2-10. Η ειδική επαναλαμβανόμενη μέγιστη ροπή συναρτήσει της ροπής αδράνειας.

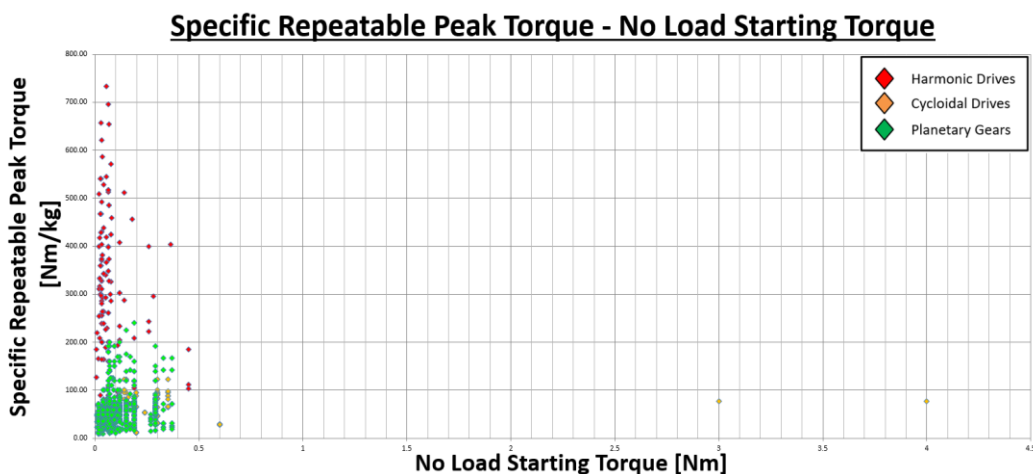
Στο Σχήμα 2-11, διακρίνεται το γράφημα που αφορά την διαμόρφωση της ειδικής επαναλαμβανόμενης μέγιστης ροπής συναρτήσει του λόγου μείωσης, ανάλογα με την τεχνολογία μείωσης. Για την εφαρμογή που προορίζεται ο μειωτήρας που θα επιλεγεί, είναι

χρήσιμη η εξασφάλιση σχετικά μικρών λόγων μείωσης με υψηλές τιμές ειδικής επαναλαμβανόμενης μέγιστης ροπής. Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι για λόγους μείωσης μέχρι και το 30/1 υπερτερούν τα πλανητικά συστήματα μείωσης, ενώ για μειώσεις άνω της τιμής αυτής υπερέρχουν τα Harmonic Drives.



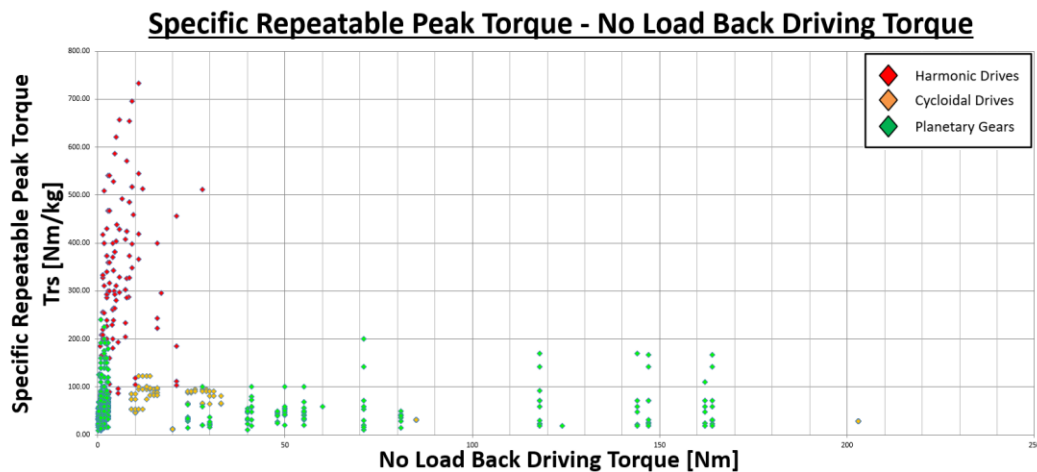
Σχήμα 2-11. Η ειδική επαναλαμβανόμενη μέγιστη ροπή συναρτήσει του λόγου μείωσης.

Στην συνέχεια, στο Σχήμα 2-12 εξετάζονται οι τιμές που λαμβάνει η ειδική επαναλαμβανόμενη μέγιστη ροπή συναρτήσει της ροπής εκκίνησης άνευ φορτίου για κάθε μία εκ των τριών τεχνολογιών μείωσης. Όπως τονίσθηκε, η ροπή εκκίνησης άνευ φορτίου είναι ένας δείκτης των απωλειών λόγω τριβών που υπάρχουν σε κάθε σύστημα. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να ελαχιστοποιείται το μέγεθος αυτό, με ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της ειδικής επαναλαμβανόμενης μέγιστης ροπής. Από το γράφημα εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα Harmonic Drives καλύπτουν καλύτερα αυτή την απαίτηση.



Σχήμα 2-12. Η ειδική επαναλαμβανόμενη μέγιστη ροπή συναρτήσει της ροπής εκκίνησης άνευ φορτίου.

Το γράφημα στο Σχήμα 2-13 αποτυπώνει την διαμόρφωση της ροπής ανάστροφης κίνησης άνευ φορτίου συναρτήσει της ειδικής επαναλαμβανόμενης μέγιστης ροπής ανάλογα με την τεχνολογία μείωσης. Όπως τονίσθηκε, είναι σημαντικό ο μειωτήρας που θα επιλεγεί να έχει κατά το δυνατόν χαμηλή ροπή ανάστροφης κίνησης άνευ φορτίου και μεγάλη ειδική επαναλαμβανόμενη μέγιστη ροπή. Με βάση αυτό το κριτήριο, αυτή η απαίτηση καλύπτεται σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό από τα Harmonic Drives.



Σχήμα 2-13. Η ειδική επαναλαμβανόμενη μέγιστη ροπή συναρτῆσει της ροπῆς ανάστροφης κίνησης άνευ φορτίου.

Είναι χρήσιμο να τονισθεί ότι τα ανωτέρω συμπεράσματα που εξήχθησαν αφορούν την γενικότερη σύγκριση των τεχνολογιών μείωσης. Στην συνέχεια θα ερμηνευθούν εκ νέου τα διαγράμματα αυτά, ώστε να επιλεγούν τα συστήματα μείωσης που ανταποκρίνονται καλύτερα στις προδιαγραφές που θα τεθούν.

2.4.4 Επιλογή στοιχείων μετάδοσης κίνησης της νέας μονάδας επενέργησης

Σε εκτενή έρευνα που είχε λάβει χώρα κατά την υλοποίηση του ρομπότ Minitaur [10] παρουσιάσθηκαν τα πλεονεκτήματα κινητήρων όμοιων του T Motor U8. Αναφορικά με τον κινητήρα που επιλέχθηκε να ενσωματωθεί στην δομή της νέας μονάδας επενέργησης, εκλέχθηκε ο T Motor U8 Lite KV100, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-14 Ο εν λόγω κινητήρας αποτελεί βελτιωμένη έκδοση του προαναφερθέντος, παρουσιάζοντας καλύτερες επιδόσεις ροπῆς και ταχύτητας.



Σχήμα 2-14. Ο κινητήρας T Motor U8 Lite KV100

Αναφορικά με τον μειωτήρα που θα ενσωματωθεί στην μονάδα επενέργησης, θα πρέπει να χαρακτηρίζεται κυρίως από υψηλή ειδική επαναλαμβανόμενη μέγιστη ροπή, καθώς και από λόγους μείωσης μικρότερους ή ίσους των 10/1.

Η μελέτη της μηχανικής της βάδισης του τετραπόδου Laelaps II [13], καθιστά δυνατό τον ακριβή ορισμό των μεγεθών του κατάλληλου συστήματος μείωσης για εφαρμογή σε ρομπότ όμοιων επιδόσεων και βάρους από 20 έως 40 kg. Πιο συγκεκριμένα, το κιβώτιο μείωσης θα

πρέπει να μπορεί να παραλάβει επαναλαμβανόμενη μέγιστη ροπή μεγαλύτερη από 50 Nm και να εργάζεται σε ταχύτητες ανάμεσα σε 100 και 400 rpm. Ταυτόχρονα, δόθηκε σημασία στην τήρηση μικρών τιμών ροπής αδράνειας, ροπής εκκίνησης, καθώς και ροπής αναστροφής κίνησης άνευ φορτίου.

Κάνοντας χρήση της βάσης δεδομένων σε περιβάλλον Excel, προέκυψε ότι οι βέλτιστες επιλογές ανήκουν στην οικογένεια των πλανητικών. Πιο συγκεκριμένα, τα επικρατέστερα συστήματα μείωσης είναι του οίκου Varitron, και μάλιστα τα μοντέλα της κατηγορίας DH-042. Ο Πίνακας 2-1 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των εν λόγω μειωτήρων.

Πίνακας 2-1. Τα στοιχεία των επικρατέστερων πλανητικών μειωτήρων

Πλανητικό σύστημα	Ratio	Repeatable Peak Torque (Nm)
DH - 042	1/7	80
DH - 042	1/10	60

Από τα δεδομένα του πίνακα παρατηρούμε ότι ενώ τα κιβώτια αυτά ανήκουν στην ίδια κατηγορία, έχουν διαφορετικές τιμές επαναλαμβανόμενης μέγιστης ροπής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ενώ ο μειωτήρας με λόγο 1/7 φέρει τρεις πλανήτες εσωτερικά, ο μειωτήρας με μείωση 1/10 φέρει δύο πλανήτες. Οπότε με βάση τα όσα αναφέρθηκαν σχετικά με τις πλανητικές μειώσεις, είναι δικαιολογημένη αυτή η διαφοροποίηση.

3 Θερμικά πειράματα και προσομοιώσεις

3.1 Εισαγωγή

Τα θερμικά φαινόμενα αποτελούν μείζον θέμα σε εφαρμογές κίνησης ρομπότ με πόδια. Ο κινητήρας T Motor U8 Lite KV100 που ενσωματώθηκε στην μονάδα επενέργησης, συνοδεύεται από μειωμένα δεδομένα αναφορικά με την θερμική συμπεριφορά του. Επομένως, κρίθηκε αναγκαία η απόκτηση κατάλληλης γνώσης με την πειραματική ενασχόληση τόσο με τον ίδιο, όσο και με τον T Motor U8 KV100, που αποτελεί παλαιότερο μοντέλο της ίδιας κατηγορίας.

Με την αύξηση των τιμών ρεύματος τροφοδοσίας του κινητήρα, αυξάνεται η παραγόμενη ροπή, καθώς και η θερμική ισχύς που εκλύεται. Ελέγχοντας με συστηματικό τρόπο την θερμοκρασία των τυλιγμάτων, είναι δυνατή η βέλτιστη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του επενεργητή, αλλά και η προστασία του από τον κίνδυνο υπερθέρμανσης, ρυθμίζοντας κατάλληλα την ένταση του ρεύματος.

Εξίσου μεγάλης σημασίας κρίθηκε και η ανάπτυξη μεθόδων πρόβλεψης της θερμικής συμπεριφοράς της μονάδας επενέργησης. Με την δόμηση μεθοδολογιών μοντελοποίησης, σε επόμενες εκδόσεις της μονάδας θα είναι δυνατή η πρόβλεψη της μέγιστης θερμοκρασίας τόσο του κελύφους, όσο και των τυλιγμάτων. Με τον τρόπο αυτό θα λαμβάνονται τεκμηριωμένες αποφάσεις σχεδιασμού, όπως για παράδειγμα η επιλογή ανάμεσα σε μαγνητικούς ή δακτυλιοειδείς encoders, που εξετάσθηκε προηγουμένως.

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετασθούν και θα συγκριθούν πειραματικά οι δύο επικρατέστεροι τρόποι μέτρησης θερμοκρασίας. Στην συνέχεια, θα αναλυθούν οι μέθοδοι πρόβλεψης της θερμικής συμπεριφοράς κινητήρα μέσω της χρήσης προγραμμάτων προσομοίωσης με FEA. Αποκτώντας γνώση περί των θερμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στον επενεργητή, θα είναι δυνατή η προσαρμογή του σχεδίου του κελύφους της μονάδας, με γνώμονα την επίτευξη καλύτερων επιδόσεων ψύξης του κινητήρα.

3.2 Θερμικά μοντέλα και προσομοιώσεις με χρήση λογισμικών FEA

3.2.1 Μέθοδοι μοντελοποίησης με FEA

Στη παρούσα υποενότητα θα εξετασθούν οι μέθοδοι προσομοίωσης των θερμικών φαινομένων με την χρήση λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Κάνοντας χρήση της θεωρίας θα μοντελοποιηθεί το θερμικό πείραμα του επενεργητή T Motor U8 KV100. Με τον τρόπο αυτό, θα ελεγχθεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων, συγκρίνοντάς τα με το πραγματικό πείραμα του κινητήρα στα 10,16 A.

Δεδομένου ότι το φυσικό πρόβλημα που πρόκειται να μοντελοποιηθεί είναι ένα πρόβλημα φυσικής συναγωγής, διακρίνονται δυο βασικές μεθοδολογίες προσέγγισης του θέματος με χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης.

Η πρώτη προσέγγιση της φυσικής συναγωγής βασίζεται στην χρήση των συντελεστών συναγωγής h για την περιγραφή του φαινομένου της ανταλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον. Με τον τρόπο αυτό περιγράφεται η εξωτερική ροή θερμότητας μέσω του συντελεστή h , ο οποίος είτε τίθεται ίσος με συγκεκριμένες τιμές από εμπειρικούς πίνακες, είτε υπολογίζεται επακριβώς στις επιφάνειες όπου λαμβάνει χώρα η συναγωγή κάνοντας χρήση εμπειρικών σχέσεων υπολογισμού του, όπως θα εξετασθεί εκτενώς παρακάτω. Η προσέγγιση

αυτή οδηγεί σε ένα πιο απλό μοντέλο που προβλέπει τη ροή θερμότητας προς το περιβάλλον και παράγει αρκετά ακριβή αποτελέσματα στις περιπτώσεις όπου η γεωμετρία που μελετάται είναι απλή.

Η δεύτερη προσέγγιση της φυσικής συναγωγής γίνεται με την ανάλυση της ροής αέρα γύρω από το μοντέλο μας με την χρήση υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD). Με την μέθοδο αυτή επιλύεται το συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο, αλλά και οι εξισώσεις ροής στον αέρα που περιβάλλει το μοντέλο. Αυτή η προσέγγιση παράγει λεπτομερή αποτελέσματα αναφορικά με το πεδίο ροής του αέρα και την κατανομή θερμοκρασίας στο μοντέλο. Ωστόσο, το μοντέλο που προκύπτει είναι αρκετά περίπλοκο και απαιτεί περισσότερους υπολογιστικούς πόρους για την επίλυσή του, σε σχέση με την πρώτη προσέγγιση.

Αναφορικά με τις δύο αυτές μεθόδους όταν προσομοιώνονται απλές γεωμετρίες, όπως απλές επίπεδες και κατακόρυφες πλάκες, τότε και οι δύο προσεγγίσεις παράγουν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Όταν όμως η γεωμετρία είναι αρκετά περίπλοκη, τότε η δεύτερη μέθοδος είναι πιο ακριβής από την πρώτη.

Στην περίπτωση του κινητήρα T Motor U8 KV100, θα γίνει αρχικά υλοποίηση της πρώτης μεθόδου. Πιο συγκεκριμένα, θα αναλυθεί το πρόβλημα της φυσικής συναγωγής επιλύοντας τους εμπειρικούς τύπους για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής h που χαρακτηρίζει την συναγωγή με την χρήση του προγράμματος Comsol. Καταλήγοντας στα κατάλληλα συμπεράσματα σχετικά με την μέθοδο αυτή, θα εφαρμοσθεί η μέθοδος επίλυσης CFD, κάνοντας χρήση του προγράμματος Solidworks. Με τον τρόπο αυτό, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά θα εκλεγεί η πιο ακριβής μέθοδος για το εν λόγω πρόβλημα μοντελοποίησης.

Με τον τρόπο αυτό, σε μελλοντικούς σχεδιασμούς της μονάδας επενέργειας θα είναι δυνατή η χρήση των μεθόδων αυτών με σκοπό την πρόβλεψη της θερμικής της συμπεριφοράς. Ως αποτέλεσμα, θα είναι εφικτή η τροποποίηση του σχεδιασμού, με σκοπό την βέλτιστη απαγωγή της θερμότητας του κινητήρα στο περιβάλλον, μεγιστοποιώντας έτσι τις δυνατότητες του επενεργητή.

3.2.2 Μοντελοποίηση του κινητήρα T Motor U8 KV100 στο λογισμικό Comsol με χρήση της μεθόδου υπολογισμού του συντελεστή h

Για την υλοποίηση της παρούσας μεθόδου, επιλέχθηκε η χρήση του λογισμικού Comsol, δεδομένου ότι το περιβάλλον του ενδείκνυται για την ενσωμάτωση των εμπειρικών σχέσεων υπολογισμού του συντελεστή h . Τα δύο κύρια φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνουν χώρα στο μοντέλο του κινητήρα, είναι η μεταφορά με αγωγή και με συναγωγή.

Σχετικά με την μετάδοση θερμότητας με αγωγή, το πρόγραμμα λαμβάνει υπ' όψιν τις ιδιότητες και τον όγκο των υλικών του μοντέλου όπως ορίζονται από τον χρήστη και υπολογίζεται κατάλληλα η μετάδοση με βάση τις αντίστοιχες σχέσεις. Στην παρούσα ανάλυση αποτυπώθηκε το φυσικό μοντέλο σε τρισδιάστατη μορφή για την εισαγωγή του στο πρόγραμμα Comsol. Συνεπώς, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή τόσο στην κατά το δυνατόν ακριβέστερη γεωμετρική αποτύπωση του μοντέλου, όσο και στον σωστό ορισμό των αντίστοιχων υλικών που το απαρτίζουν.

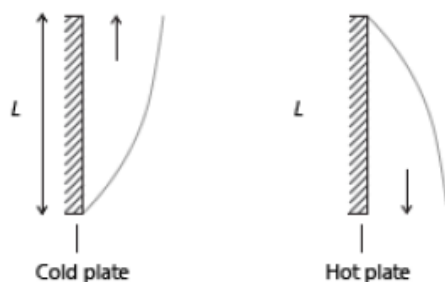
Αναφορικά με την μετάδοση θερμότητας με συναγωγή, ο μηχανισμός μετάδοσης είναι πιο περίπλοκος από αυτόν της αγωγής και εισάγει πληθώρα δυσκολιών, διότι είναι πολύ σημαντικό να ορισθεί σωστά ο συντελεστής συναγωγής h . Το εν λόγω μέγεθος όχι μόνο εξαρτάται από την γεωμετρία της επιφάνειας στην οποία μελετάται και την φύση της ροής του αέρα γύρω από αυτή, αλλά επίσης αλλάζει τόσο με τον χρόνο, όσο και κατά μήκος της ίδιας

της γεωμετρίας. Αυτό εξηγείται σχετικά εύκολα αν παρατηρήσουμε τους τύπους που εκφράζουν το h , όπως θα παρουσιασθούν στην συνέχεια.

Επομένως, ο ακριβής ορισμός του συντελεστή h απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, ενώ ο υπολογισμός του μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι από προσεγγιστικούς εμπειρικούς πίνακες που ορίζουν τυπικές τιμές του h για τυποποιημένες γεωμετρίες, και ο δεύτερος είναι επιλύοντας εμπειρικούς τύπους που προσεγγίζουν την τιμή του συντελεστή h σε κάθε σημείο της επιφάνειας. Όπως αναμένεται, η δεύτερη προσέγγιση είναι πιο ακριβής, διότι μπορεί να περιγράψει την αλλαγή του h τόσο κατά μήκος της εκάστοτε γεωμετρίας, όσο και κατά την πάροδο του χρόνου. Προκειμένου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στα πραγματικά, επιλέχθηκε ο εν λόγω τρόπος προσέγγισης. Παρακάτω παρατίθενται οι εμπειρικοί αυτοί τύποι που θα επιλύθούν με την βοήθεια του Comsol.

Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του h σε κατακόρυφο τοίχωμα

Ο συντελεστής μεταφοράς h για την συναγωγή σε κατακόρυφες επίπεδες επιφάνειες, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-1 περιγράφεται από την Εξ.(4-4).



Σχήμα 3-1. Η ροή αέρα κατά την συναγωγή σε κατακόρυφο τοίχωμα

$$h = \begin{cases} \frac{k}{L} * \left(0.68 + \frac{0.67 * Ra_L^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.492 * k}{\mu * C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right) & \text{εάν } Ra_L \leq 10^9 \\ \frac{k}{L} * \left(0.825 + \frac{0.387 * Ra_L^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.492 * k}{\mu * C_p} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 & \text{εάν } Ra_L > 10^9 \end{cases} \quad (0-1)$$

Όπου:

$$Ra_L = Gr_L * Pr \quad (0-2)$$

$$Gr_L = \frac{g * a_p * (T - T_{amb}) * L^3}{(\mu / \rho)^2} \quad (0-3)$$

$$a_p = \frac{1}{T} \quad (0-4)$$

Στο σημείο αυτό αξίζει να γίνει μια αναφορά και να εξηγηθούν τα φυσικά ορισμένα χρήσιμα φυσικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν το φαινόμενο της συναγωγής. Ο αριθμός Rayleigh (Ra_L) για ένα ρευστό είναι ένας αδιάστατος αριθμός που σχετίζεται με ροή που οδηγείται από την κίνηση των ανοδικών ρευμάτων αέρα, κατά την ελεύθερη ή φυσική συναγωγή. Το μέγεθος αυτό συνδέεται άμεσα και με τον αριθμό Nusselt. Χαρακτηρίζει το καθεστώς ροής του ρευστού, δηλαδή μια χαμηλή τιμή Ra_L υποδηλώνει στρωτή ροή, ενώ μια τιμή σε υψηλότερο εύρος υποδηλώνει τυρβώδη ροή. Κάτω από μια συγκεκριμένη κρίσιμη τιμή, δεν υπάρχει κίνηση ρευστού και η μεταφορά θερμότητας γίνεται πλέον με αγωγή και όχι με συναγωγή.

Όπως παρατηρείται, ο αριθμός Rayleigh ορίζεται ως το γινόμενο του αριθμού Grashof με τον αριθμό Prandtl. Ο αριθμός Grashof περιγράφει τη σχέση μεταξύ ανοδικών ρευμάτων και ιξώδους μέσα σε ένα ρευστό, ενώ ο αριθμός Prandtl περιγράφει τη σχέση μεταξύ του κινηματικού ιξώδους και της θερμικής διάχυσης. Ως εκ τούτου, ο αριθμός Rayleigh μπορεί να θεωρηθεί ως ο λόγος των ανοδικών ρευμάτων και των δυνάμεων ιξώδους πολλαπλασιασμένος επί του λόγου ορμής και θερμικής διάχυσης.

Αναφορικά με τα μεγέθη που αναφέρθηκαν, όλα τα μεγέθη εκτός από το T (που είναι η μεταβλητή της εξίσωσης) ορίζονται στο λογισμικό ως δεδομένα. Έτσι, το L είναι το χαρακτηριστικό μήκος της εκάστοτε επιφάνειας που μελετάται, το T_{amb} είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ τα μεγέθη k , ρ , μ και C_p προκύπτουν από πίνακες ιδιοτήτων του αέρα για μια μέση θερμοκρασία που εκτιμάται ότι θα λάβει ο αέρας γύρω από το μοντέλο.

Δεδομένου ότι με βάση την Εξ.(3-4) ο τύπος υπολογισμού του h αλλάζει ανάλογα αν υπάρχει στρωτή ή τυρβώδη ροή, θα είναι χρήσιμο στο σημείο αυτό να γίνει ένας ενδεικτικός υπολογισμός για την εξακρίβωση του εύρους τιμών που θα κυμαίνεται ο αριθμός Ra_L . Σύμφωνα με τις Εξ. (3-5) & (3-6), ο αριθμός Ra_L δίνεται από την Εξ.(3-8).

$$Ra_L = \frac{g * a_p * (T - T_{amb}) * L^3}{(\mu / \rho)^2} * Pr \quad (0-5)$$

Θέτοντας ενδεικτικές τιμές για τα μεγέθη της εξίσωσης, δηλαδή ως T την τιμή 140°C , ως T_{amb} την τιμή 18°C , ως L την τιμή $0,065\text{m}$ και από πίνακες ιδιοτήτων αέρα για μια ενδιάμεση θερμοκρασία ευρεθεί ότι $Pr = 0,697$, $g = 9,81(\text{m/s}^2)$, $a_p = 0,00242(1/\text{K})$, $\mu = 2,075 * 10^{-5} (\text{Pa} * \text{s})$ και $\rho = 1,009(\text{kg/m}^3)$, τότε υπολογίζεται στην (3-9) μια ενδεικτική τιμή του αριθμού Ra_L .

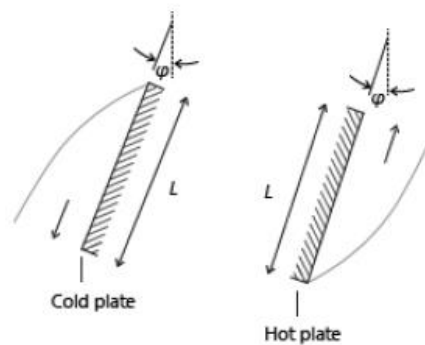
$$Ra_L = 13.11 * 10^5 \quad (0-6)$$

Επομένως, στο μοντέλο θα υπάρχει στρωτή ροή ($Ra \leq 10^9$). Με βάση την Εξ.(3-4) προκύπτει η Εξ. (3-10) παρακάτω, που περιγράφει τον συντελεστή h για κατακόρυφες πλάκες, η οποία και θα εισάγεται στο Comsol για επίλυση. Με την χρήση της εξίσωσης αυτής, το λογισμικό θα υπολογίζει σε κάθε βήμα επίλυσης τη νέα τιμή του T_a , ξεκινώντας από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Με τον τρόπο αυτό θα υπολογίζεται κατάλληλα ο συντελεστής h σε κάθε χρονική στιγμή.

$$h = \frac{k}{L} * \left(0.68 + \frac{0.67 * \left(\frac{1}{T} \right) * (T - T_{amb}) * L^3 * Pr}{(\mu / \rho)^2} \right)^{1/4} \left(1 + \left(\frac{0.492 * k}{\mu * C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9} \quad (0-7)$$

Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του h σε τοίχωμα υπό κλίση

Ο συντελεστής h για την συναγωγή σε τοιχώματα υπό κλίση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-2 με γωνίες $-60^\circ < \varphi < 60^\circ$ περιγράφεται από την Εξ. (3-11).



Σχήμα 3-2. Η ροή αέρα κατά την συναγωγή σε τοίχωμα υπό κλίση.

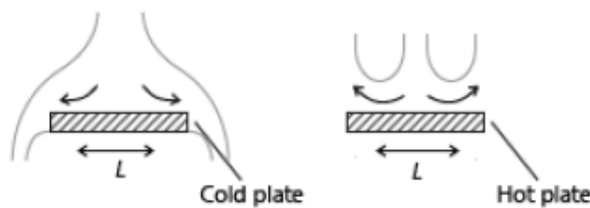
$$h = \begin{cases} \frac{k}{L} * \left(0.68 + \frac{0.67 * (\cos \varphi * Ra_L)^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.492 * k}{\mu * C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right) & \text{εάν } Ra_L \leq 10^9 \\ \frac{k}{L} * \left(0.825 + \frac{0.387 * Ra_L^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.492 * k}{\mu * C_p} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 & \text{εάν } Ra_L > 10^9 \end{cases} \quad (0-8)$$

Όπως αποδείχθηκε προηγουμένως, δεδομένου ότι υπάρχει στρωτή ροή ($Ra \leq 10^9$), προκύπτει η Εξ.(3-12) που περιγράφει τον συντελεστή h , την οποία και εισάγεται στο Comsol για επίλυση.

$$h = \frac{k}{L} * \left(0.68 + \frac{0.67 * \left[\cos \varphi * \frac{g * \left(\frac{1}{T} \right) * (T - T_{amb}) * L^3}{(\mu / \rho)^2} * Pr \right]^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.492 * k}{\mu * C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right) \quad (0-9)$$

Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του h σε οριζόντιο άνω τοίχωμα

Ο συντελεστής h για την συναγωγή σε οριζόντιο άνω τοίχωμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-3, περιγράφεται από την Εξ. (3-13).



Σχήμα 3-3. Η ροή αέρα κατά την συναγωγή σε οριζόντιο άνω τοίχωμα.

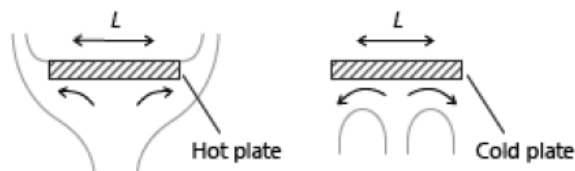
$$h = \frac{k}{L} * 0.54 * Ra_L^{1/4} \quad , \quad \text{εάν } 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 \quad (0-10)$$

Δεδομένου ότι η ροή θα είναι στρωτή ($Ra \leq 10^7$), και ενσωματώνοντας την Εξ.(3-8), προκύπτει η (3-14), που περιγράφει τον συντελεστή h , την οποία και θα εισάγεται στο Comsol για επίλυση.

$$h = \frac{k}{L} * 0.54 * \left(\frac{g * \left(\frac{1}{T} \right) * (T - T_{amb}) * L^3}{(\mu / \rho)^2} * Pr \right)^{1/4} \quad (0-11)$$

Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του h σε οριζόντιο κάτω τοίχωμα

Ο συντελεστής h για την συναγωγή σε οριζόντιο κάτω τοίχωμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-4, περιγράφεται από την Εξ. (3-15).



Σχήμα 3-4. Η ροή αέρα κατά την συναγωγή σε οριζόντιο κάτω τοίχωμα.

$$h = \frac{k}{L} * 0.27 * Ra_L^{1/4} \quad , \quad \text{εάν } 10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10} \quad (0-12)$$

Δεδομένου ότι η ροή θα είναι στρωτή ($Re \leq 10^{10}$), και ενσωματώνοντας την Εξ.(3-8), προκύπτει η (3-14), που περιγράφει τον συντελεστή h , την οποία και θα εισάγεται στο Comsol για επίλυση.

$$h = \frac{k}{L} * 0.27 * \left(\frac{g * \left(\frac{1}{T}\right) * (T - T_{amb}) * L^3}{(\mu / \rho)^2} * Pr \right)^{1/4} \quad (0-13)$$

Όπως παρατηρείται, το φυσικό μοντέλο του κινητήρα αποτελεί μια αρκετά περίπλοκη γεωμετρία. Προκειμένου να επιτευχθούν όσο το δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα προσομοίωσης, το μοντέλο αυτό προσεγγίσθηκε ως ένα σύνολο από απλές κατακόρυφες και οριζόντιες επιφάνειες. Κατηγοριοποιώντας κάθε διακριτή επιφάνεια του επενεργητή σε ένα από τα είδη αυτά, ορίσθηκε τοπικά η αντίστοιχη εξίσωση που περιγράφει τον συντελεστή συναγωγής h .

Προκειμένου να εξασφαλισθούν τα κατάλληλα στοιχεία για στην μοντελοποίηση, υπολογίσθηκε το θερμικό φορτίο που εκλύει το κάθε πηνίο του κινητήρα ξεχωριστά, έτσι ώστε οι τιμές αυτές να εισαχθούν στο μοντέλο του Comsol. Όπως εξηγήθηκε, δεδομένου ότι στα θερμικά πειράματα του κινητήρα συνδέονται οι δύο εκ των τριών φάσεων μόνο, υλοποιείται σύνδεση τύπου τριγώνου. Επομένως, κατά την τροφοδοσία των δύο φάσεων του κινητήρα με ρεύμα I , σε κάθε στιγμή αν η φάση A διαρρέεται με ρεύμα I_A , οι φάσεις B και C θα διαρρέονται με ρεύμα $I_A/2$, όπως διακρίνεται στην Εξ.(3-17).

$$I_{ph} = \begin{cases} I_A = \frac{2}{3} * I \\ I_B = I_C = \frac{1}{3} * I \end{cases} \quad (0-14)$$

Η θερμική ισχύς που θα εκλύεται από κάθε φάση θα δίνεται από την Εξ (3-4).

$$Q_{ph} = (I_{ph})^2 * R_{ph} \quad (0-15)$$

Επίσης, δεδομένου ότι η κάθε φάση αποτελείται από 12 πηνία, η θερμική ισχύς που θα εκλύει το κάθε πηνίο θα περιγράφεται από την Εξ. (3-5).

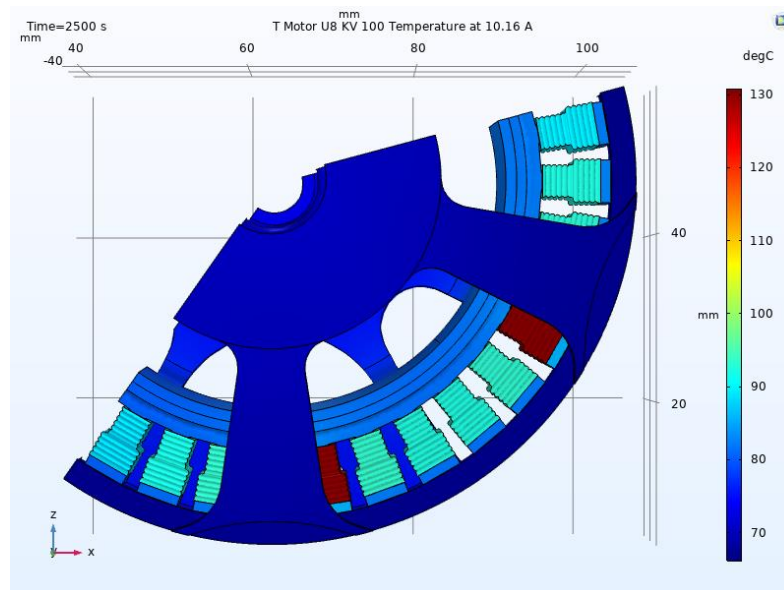
$$Q_{coil} = \frac{Q_{ph}}{12} \quad (0-16)$$

Στο θερμικό πείραμα του κινητήρα T Motor U8 KV100, μοντελοποιείται τροφοδοσία ρεύματος έντασης 10,16A. Κάνοντας χρήση των Εξ.(4-17), (4-18) και (4-19), και για R_{ph} ίσο με 0,36Ω (πειραματικός προσδιορισμός βλ. Κεφ. 3.3.1), προκύπτουν οι παρακάτω τιμές θερμικής ισχύος που εκλύεται από κάθε πηνίο έκαστης φάσης. Οι τιμές αυτές περιλαμβάνονται στις παραμέτρους που εισάγονται στο λογισμικό, ώστε να υλοποιηθεί η επίλυση του μοντέλου.

$$Q_{coil} = \begin{cases} Q_{Acoil} = 1.374W \\ Q_{Bcoil} = 0.342W \end{cases} \quad (0-17)$$

Στο Σχήμα 3-5 που ακολουθεί παρουσιάζεται το θερμικό μοντέλο του επενεργητή T Motor U8 KV100 έπειτα από την μοντελοποίηση με το λογισμικό Comsol. Η προσομοίωση έγινε για

χρόνο 2500 δευτερόλεπτα, όσο διήρκεσε και το πραγματικό πείραμα του εν λόγω κινητήρα κατά την τροφοδοσία του με ρεύμα 10,16A. Για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικών πόρων εξετάστηκε μόνο ένα τμήμα του κινητήρα, γεγονός που κρίθηκε ότι δεν θα επηρέαζε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

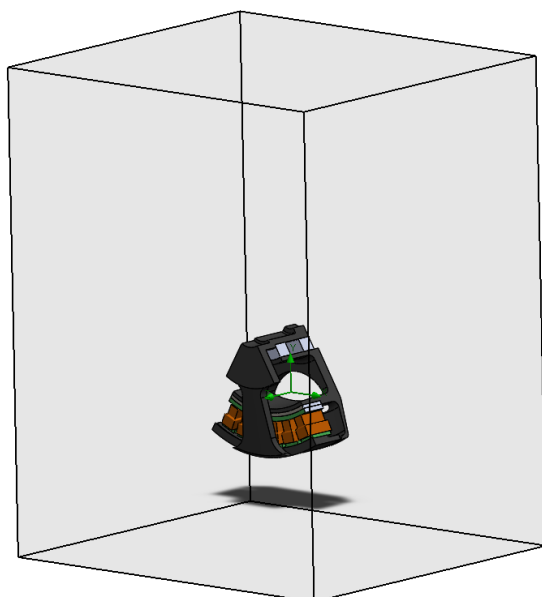


Σχήμα 3-5. Θερμική μοντελοποίηση του T Motor U8 KV100 σε περιβάλλον Comsol.

3.2.3 Μοντελοποίηση κινητήρα T Motor U8 KV100 στο λογισμικό Solidworks και χρήση της μεθόδου ανάλυσης με CFD

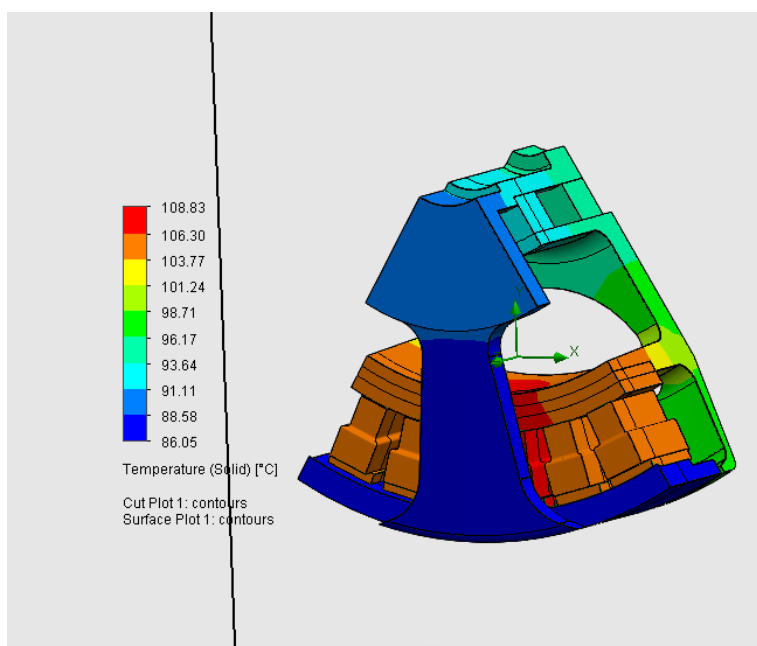
Στην περίπτωση της μεθόδου αυτής, η διαδικασία είναι συγκριτικά πιο απλή, διότι το πρόγραμμα κάνει τους περισσότερους υπολογισμούς χωρίς την παρέμβαση του χρήστη. Όπως και στην προηγούμενη μεθοδολογία, είναι απαραίτητος ο ορισμός κάποιων αρχικών συνθηκών, όπως τα ακριβή υλικά του μοντέλου, οι συνθήκες περιβάλλοντος, καθώς και τα θερμικά φορτία που εκλύουν τα πηνία του επενεργητή. Τα δεδομένα αυτά ορίστηκαν ίδια με αυτά που τέθηκαν και στην προηγούμενη μέθοδο. Το βασικό σκεπτικό είναι ότι αρχικά εισάγεται το τρισδιάστατο μοντέλο που πρόκειται να μελετηθεί, επομένως θα πρέπει να έχει προηγηθεί η κατά το δυνατόν πιστότερη αποτύπωσή του σε 3D μορφή. Με αντίστοιχο σκεπτικό με πριν, για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικής ισχύος, επιλέχθηκε να μελετηθεί μόνο ένα τμήμα του κινητήρα, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 3-6. Δεδομένου ότι ο επενεργητής έχει απόλυτη συμμετρικότητα, τα θερμικά φαινόμενα θα είναι όμοια σε κάθε τμήμα του.

Στην συνέχεια, ορίζεται γύρω από αυτό ένας πεπερασμένος όγκος αέρα μέσα στον οποίο θα γίνονται οι υπολογισμοί αναφορικά με την κίνηση και το ενεργειακό ισοζύγιο του ρευστού. Αναφορικά με το μέγεθος του όγκου ελέγχου που ορίστηκε, σε ιδανικές συνθήκες θα οριζόταν όγκος αέρα ίσος με αυτόν του δωματίου μέσα στο οποίο έγινε το πραγματικό πείραμα. Μια τέτοια θεώρηση όμως θα ήταν υπολογιστικά πολύ απαιτητική, διότι το μοντέλο επιλύεται με χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε CFD. Συνεπώς, θεωρείται όγκος αέρα κατά λίγο μεγαλύτερος από το μοντέλο που θα προσομοιωθεί. Στην ακραία περίπτωση όπου ο όγκος θα ήταν αρκετά μικρός, οι συνοριακές συνθήκες που επικρατούν στα όρια του όγκου θα επηρέαζαν κατά πολύ τα αποτελέσματα.



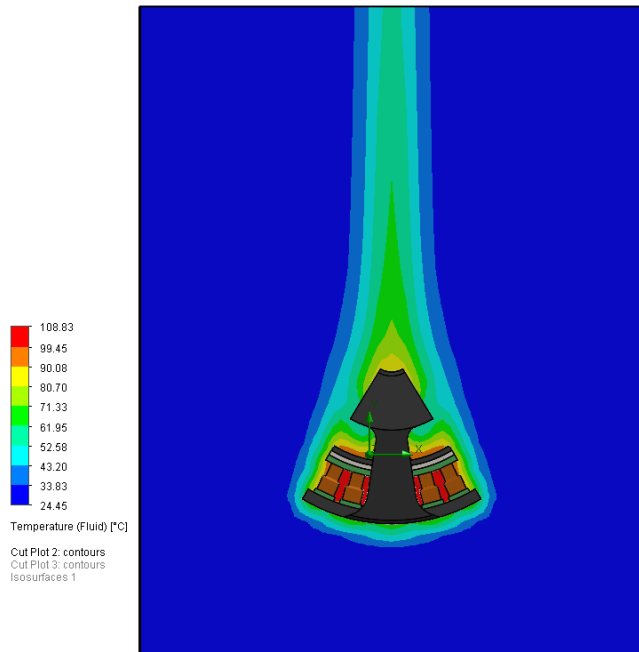
Σχήμα 3-6. Ορισμός κατάλληλου όγκου αέρα γύρω από το μοντέλο του επενεργητή.

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-7 που ακολουθεί. Διακρίνεται ότι οι θερμοκρασίες στα τυλίγματα κυμαίνονται σε λογικά πλαίσια. Βέβαια, τα αποτελέσματα δεν ταυτίζονται απόλυτα με τα πειραματικά, ενώ τα πηνία της φάσης A παρουσιάζουν σχεδόν ίδια θερμοκρασία με αυτά των φάσεων B και C, γεγονός που δεν συμβαίνει στην πράξη.



Σχήμα 3-7. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης του T Motor U8 KV100 με χρήση CFD σε περιβάλλον Solidworks

Στο Σχήμα 3-8 παρακάτω παρουσιάζεται η διαμόρφωσή της θερμοκρασίας του αέρα γύρω από το μοντέλο του κινητήρα. Δεδομένου ότι τα σημεία με υψηλή θερμοκρασία στο ρευστό είναι μακριά από τα άκρα του όγκου αέρα, δυνητικά θα ήταν σκόπιμη η θεώρηση μικρότερου όγκου αέρα, χωρίς να επηρεασθούν τα αποτελέσματα.



Σχήμα 3-8. Η διαμόρφωση της θερμοκρασίας στον αέρα γύρω από το μοντέλο του κινητήρα.

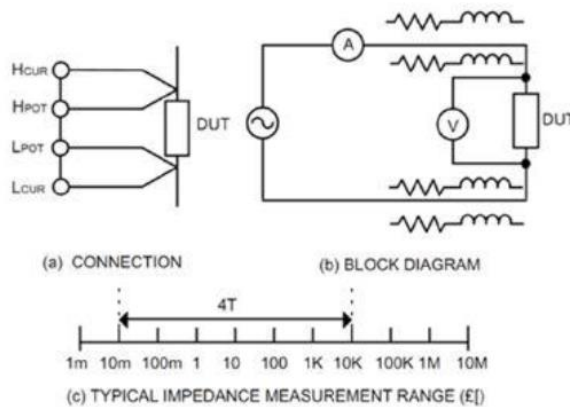
Συμπεραίνεται ότι με την χρήση των ελάχιστων δυνατών ρυθμίσεων για την υλοποίηση προσομοίωσης με CFD, τα αποτελέσματα είναι αρκετά ενθαρρυντικά. Κρίνεται σκόπιμο στο μέλλον να γίνει περαιτέρω διερεύνηση αναφορικά με τον βέλτιστο τρόπο υλοποίησης αυτής της μεθοδολογίας, ώστε να προκύπτουν πιο ακριβή αποτελέσματα κατά τις προσομοιώσεις.

3.3 Πειραματική μελέτη θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα T Motor U8

3.3.1 Πειραματικός προσδιορισμός αντίστασης τυλιγμάτων του κινητήρα T motor U8

Απαραίτητη προϋπόθεση για την πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς του κινητήρα T motor U8 αποτελεί η γνώση της ηλεκτρικής αντίστασης των τυλιγμάτων του. Δεδομένου ότι η πληροφορία αυτή δεν παρέχεται από τον κατασκευαστή του κινητήρα κρίθηκε απαραίτητος ο πειραματικός προσδιορισμός της. Δεδομένου ότι η αντίσταση αυτή έχει αρκετά μικρές τιμές, ήταν απαραίτητη η χρήση του ειδικού μετρητικού οργάνου RLC Meter.

Το μετρητικό αυτό είναι κατάλληλο για μετρήσεις χαμηλών αντιστάσεων της τάξης των 10mΩ-10kΩ. Η αρχή λειτουργίας του είναι ότι παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα και μετράει την εναλλασσόμενη τάση που δημιουργείται. Στο όργανο αυτό υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας εναλλασσόμενου σήματος, μεταβάλλοντας έτσι και την ακρίβεια της μέτρησης. Ένα άλλο χαρακτηριστικό αυτών των μετρητικών οργάνων είναι ότι χρησιμοποιούν την λεγόμενη 4 terminal sensing, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-9. Με την μέθοδο μέτρησης αυτή, η αντίσταση των καλωδίων του μετρητικού οργάνου δεν επηρεάζει την μέτρηση.



Σχήμα 3-9. Σχεδιάγραμμα μέτρησης με την μέθοδο 4 terminal sensing

Όπως διακρίνεται στο Σχήμα 3-10, έγινε χρήση του RLC Meter προκειμένου να μετρηθεί με ακρίβεια η αντίσταση τόσο του κινητήρα T Motor U8 KV100, όσο και του T Motor U8 Lite KV100.



Σχήμα 3-10. Μέτρηση της αντίστασης του T Motor U8 Lite με την χρήση του RLC Meter.

Κατά την μέτρηση των αντιστάσεων των κινητήρων μετρήθηκαν οι ακροδέκτες έκαστου κινητήρα ανά δύο και καταγράφηκε η μέση τιμή των μετρήσεων. Δεδομένου ότι η σύνδεση που υλοποιήθηκε κατά την μέτρηση είναι σύνδεση τριγώνου, αυτό που μετρήθηκε με το RLC Meter είναι η ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος R_{eq} , η οποία συνδέεται με την αντίσταση φάσης R_{ph} με την Εξ. (4-2).

$$R_{eq} = \frac{2}{3} * R_{ph} \quad (0-18)$$

Ο Πίνακας 3-1 παρουσιάζει τις τιμές των αντιστάσεων για έκαστο κινητήρα έπειτα από την λήψη των μετρήσεων και την χρήση της Εξ. (4-2).

Πίνακας 3-1. Οι αντιστάσεις των κινητήρων T Motor U8.

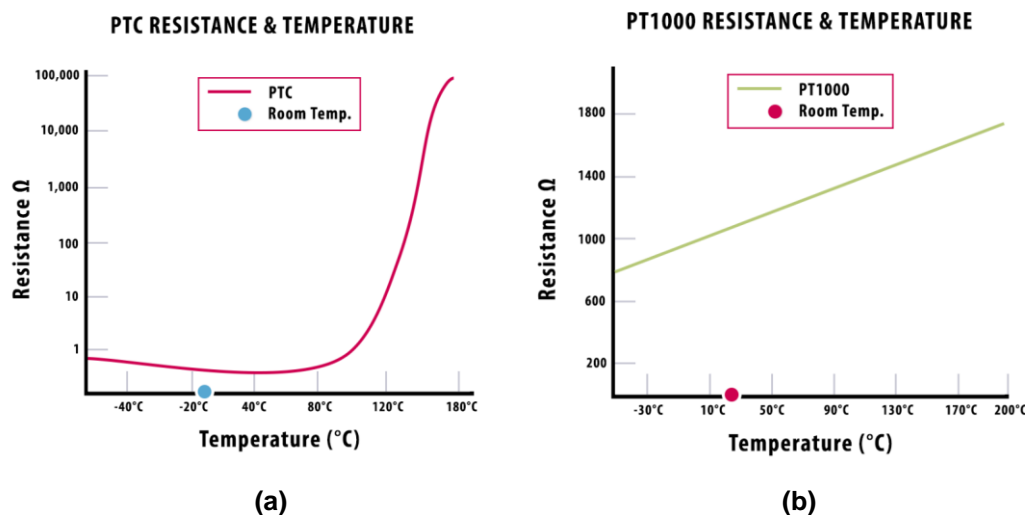
Κινητήρας	R_{eq} (mΩ)	R_{ph} (mΩ)
T Motor U8 KV 100	240	360
T Motor U8 lite KV100	180	270

3.3.2 Τα είδη αισθητήρων μέτρησης θερμότητας

Η μέτρηση θερμοκρασίας των τυλιγμάτων ενός ηλεκτρικού επενεργητή μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες επιλογές, αλλά η βασική αρχή είναι η ίδια. Με την χρήση αισθητήρων λαμβάνεται ακριβής μέτρηση της θερμοκρασίας των περιελίξεων του στάτη του κινητήρα. Τις μετρήσεις αυτές στην συνέχεια επεξεργάζονται κατάλληλα ελεγκτές, οι οποίοι διακόπτουν ή ρυθμίζουν την τροφοδοσία ρεύματος στον κινητήρα.

Οι βασικές ομάδες αισθητήρων είναι τα θερμίστορ τύπου PTC και NTC, οι αισθητήρες πυριτίου (ΚΤΥ), τα θερμόμετρα αντίστασης καλωδίου (PRT), καθώς και τα θερμοστοιχεία. Η γενική αρχή που διέπει όλους τους αισθητήρες αυτούς είναι ότι αποτελούν έναν αντιστάτη του οποίου η αντίσταση εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία εκτίθεται. Σε κάποιους αισθητήρες η αντίσταση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ σε άλλους η αντίσταση μειώνεται.

Ανάλογα το είδος των αισθητήρων και το υλικό τους, αλλάζει και η καμπύλη απόκρισης. Στο Σχήμα 3-11 διακρίνεται η καμπύλη απόκρισης αντίστασης των θερμίστορ και των θερμομέτρων αντίστασης καλωδίου (PRT) συναρτήσει της θερμοκρασίας. Παρατηρείται ότι η καμπύλη των θερμίστορ έχει μια αρκετά μη γραμμική συμπεριφορά, σε αντίθεση με τους αισθητήρες PRT που αποτελούνται από προηγμένα υλικά και συμπεριφέρονται απολύτως γραμμικά. Όσο αυξάνεται η γραμμικότητα της απόκρισης των αισθητήρων, τόσο αυξάνεται και η ακρίβειά τους, αλλά και το κόστος.



Σχήμα 3-11. Η μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας (a) Στα θερμίστορ (b) Στα θερμομέτρα αντίστασης καλωδίου(PRT).

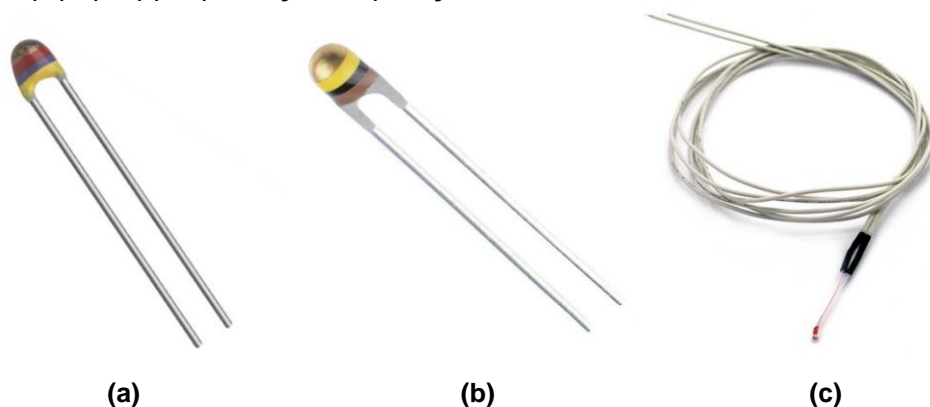
Για την επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα που θα ενσωματωθεί στην μονάδα επενέργησης, κρίθηκε σκόπιμο να ορισθούν ορισμένα κριτήρια που θα είναι αναγκαίο να πληροί. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου ότι γύρω από τα τυλίγματα του στάτη θα υπάρχει αρκετά περιορισμένος ελεύθερος χώρος, οι αισθητήρες θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν

μικρότεροι σε μέγεθος. Όπως αναφέρθηκε, η μέγιστη θερμοκρασία των τυλιγμάτων θα μπορεί να ανέλθει ακόμα και στους 135°C. Συνεπώς, οι αισθητήρες που θα επιλεγούν θα πρέπει να είναι ασφαλείς κατά την έκθεσή τους σε τέτοιες θερμοκρασίες. Ταυτόχρονα, είναι σημαντικό οι αισθητήρες να μην είναι ευαίσθητοι σε φαινόμενα στατικού ηλεκτρισμού, γεγονός που θα αύξανε την περιπλοκότητα τόσο της διαδικασίας δοκιμής, όσο και της ενσωμάτωσής τους στον επενεργητή.

Τέλος, ένα τετράποδο ρομπότ με πόδια τριών βαθμών ελευθερίας, θα φέρει συνολικά 12 μονάδες επενέργειας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι κάθε μονάδα θα ενσωματώνει τουλάχιστον τρεις αισθητήρες, κρίνεται σημαντικό το κόστος των αισθητήρων να διατηρηθεί κατά το δυνατόν χαμηλότερο. Λαμβάνοντας όλα τα προαναφερθέντα κριτήρια υπ' όψιν, επιλέχθηκαν τα θερμίστορ τύπου NTC ως επικρατέστερες επιλογές για την εν λόγω εφαρμογή.

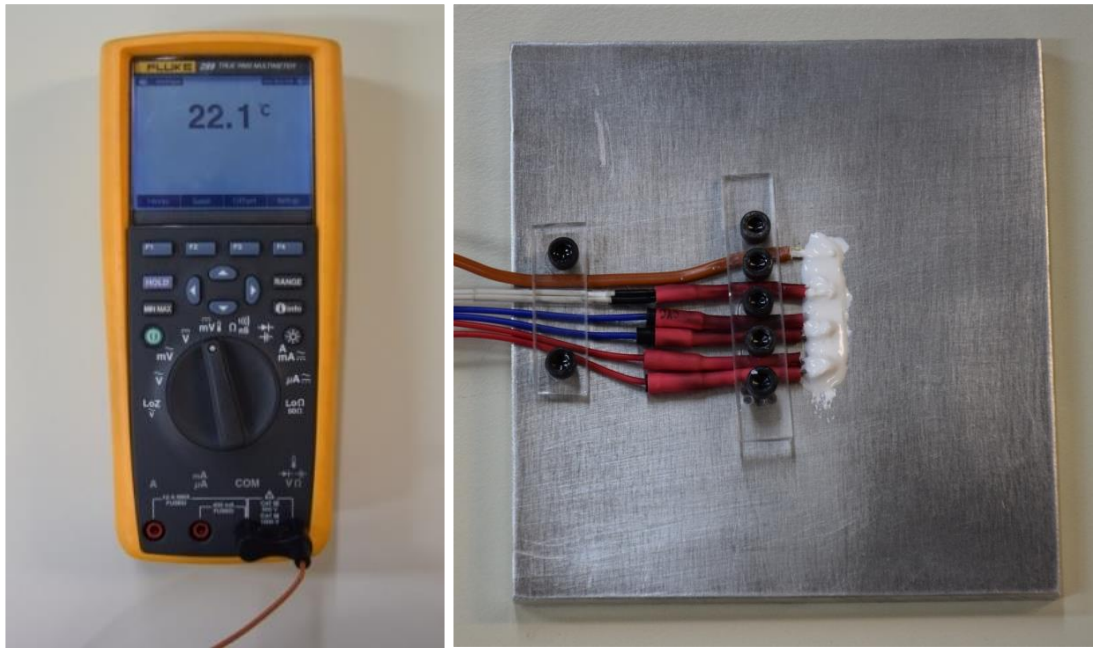
3.3.3 Πειραματική αξιολόγηση θερμίστορ

Δεδομένου ότι τα θερμίστορ τύπου NTC διατίθενται σε διάφορες παραλλαγές στην αγορά, κρίθηκε σκόπιμη η εύρεση της βέλτιστης επιλογής ανάμεσα στους αισθητήρες αυτούς. Υλοποιήθηκε πειραματική αξιολόγηση των επιδόσεων τριών διαφορετικών θερμίστορ τύπου NTC. Στο Σχήμα 3-12 παρουσιάζονται κατά σειρά οι αισθητήρες που δοκιμάστηκαν, δηλαδή ένα θερμίστορ 10KΩ, ένα 100KΩ, και ένα θερμίστορ 100KΩ που είναι κατασκευασμένο ειδικά για μέτρηση θερμοκρασίας σε κεφαλές 3D εκτυπωτών.



Σχήμα 3-12. Τα θερμίστορ NTC που αξιολογήθηκαν πειραματικά : (a) Θερμίστορ 10KΩ, (b) Θερμίστορ 100KΩ (c) Θερμίστορ 100KΩ για κεφαλές 3D εκτυπωτών.

Κατά την διάρκεια του πειράματος για την αξιολόγηση των θερμίστορ αυτών, έγινε χρήση του πολύμετρου Fluke 289 που φέρει ενσωματωμένο θερμοστοιχείο τύπου K. Τα τρία θερμίστορ μαζί με το θερμοστοιχείο τοποθετήθηκαν σε κατάλληλη δοκιμαστική πλάκα αλουμινίου και στηρίχθηκαν με μηχανικό τρόπο. Για την εξασφάλιση της ακρίβειας των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε θερμικά αγωγίμη πάστα ανάμεσα στους αισθητήρες και το προς μέτρηση δοκίμιο. Το γεγονός ότι η πλάκα εφαρμογής είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο (υλικό υψηλής θερμικής αγωγιμότητας), εξασφαλίζει σχεδόν ομοιόμορφη θερμοκρασία σε κάθε σημείο της, λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας που το χαρακτηρίζει. Ο στόχος του πειράματός ήταν η σύγκριση μιας πιστοποιημένης συσκευής μέτρησης θερμοκρασίας, με την αυτοσχέδια μετρητική διάταξη που απαρτίζεται από το εκάστοτε θερμίστορ και έναν μικροελεγκτή Arduino.

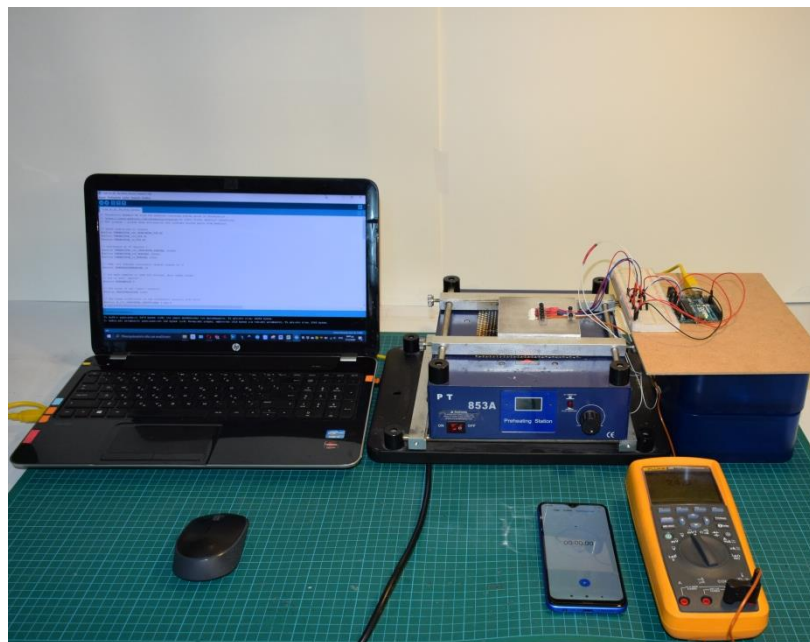


(α)

(β)

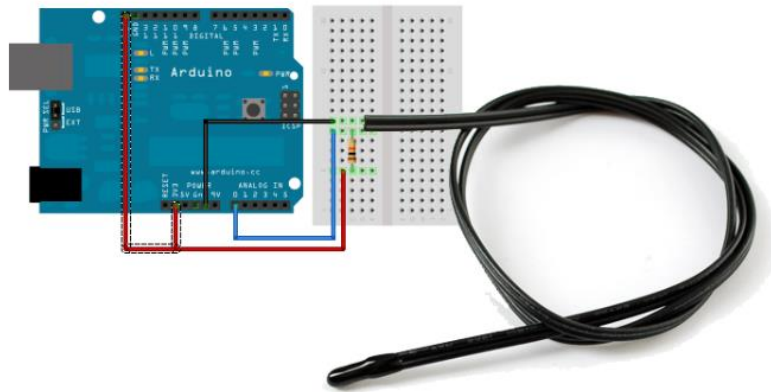
Σχήμα 3-13. (α) Πολύμετρο Fluke 289 με θερμοστοιχείο τύπου K. (β) Το δοκίμιο για την μέτρηση της θερμοκρασίας.

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-14, το δοκίμιο που φέρει τους αισθητήρες τοποθετήθηκε στον σταθμό θέρμανσης PT 853A, ώστε να αυξηθεί σταδιακά η θερμοκρασία του. Δίπλα στο πολύμετρο που εμφάνιζε τις μετρήσεις του θερμοστοιχείου, τοποθετήθηκε χρονόμετρο για τον έλεγχο του χρόνου. Οι μετρήσεις του χρονομέτρου και του πολύμετρου καταγράφονταν με χρήση κάμερας, για την μετέπειτα επεξεργασία τους. Τα τρία θερμίστορ ήταν συνδεδεμένα με τον μικροελεγκτή Arduino, ο οποίος με την σειρά του έστειλε τις μετρήσεις τους στον υπολογιστή.



Σχήμα 3-14. Η πειραματική διάταξη αξιολόγησης των θερμίστορ.

Αναφορικά με την καταγραφή της θερμοκρασίας των θερμίστορ με την χρήση του Arduino, αξίζει να τονισθεί ξανά ότι τα θερμίστορ αλλάζουν την αντίστασή τους με την αλλαγή της θερμοκρασίας. Από την άλλη, το Arduino δεν είναι σε θέση να αντιληφθεί την αντίσταση ενός στοιχείου, παρά μόνο την τάση στα άκρα του. Συνεπώς, για την καταγραφή της αντίστασης των θερμίστορ, υλοποιήθηκε ένα κύκλωμα διαιρέτη τάσης σε breadboard για έκαστο αισθητήρα, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 3-15.



Σχήμα 3-15. Το κύκλωμα σύνδεσης έκαστου θερμίστορ με το Arduino.

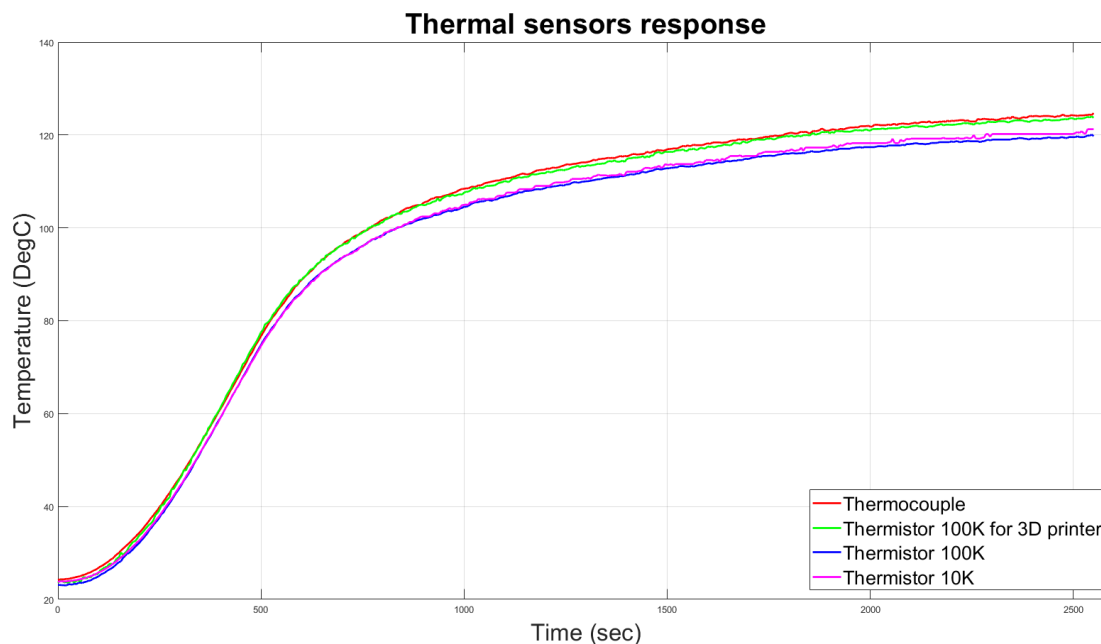
Στην συνέχεια, αναπτύχθηκε κατάλληλος κώδικάς, με τον οποίο υπολογιζόταν η αντίσταση στα άκρα των αισθητήρων κάθε ένα δευτερόλεπτο. Με χρήση της Εξ. (4-1) που ονομάζεται και σχέση Steinhart–Hart, ήταν δυνατή η μετατροπή της αντίστασης του θερμίστορ σε θερμοκρασία Kelvin.

Στην εξίσωση αυτή, όπου R , εισάγεται η μέτρηση της αντίστασης κάθε χρονική στιγμή. Όπου R_{ref} , εισάγεται η ονομαστική αντίσταση έκαστου αισθητήρα στην θερμοκρασία αναφοράς (συνήθως στους 25°C), δηλαδή 10.000 Ω για το πρώτο θερμίστορ και 100.000 Ω για τα άλλα δύο. Οι παράμετροι A_1 , B_1 , C_1 και D_1 δίνονται από αντίστοιχους πίνακες των κατασκευαστών των αισθητήρων και εξαρτώνται κυρίως από τα υλικά κατασκευής τους.

$$T_{(R)} = \left(A_1 + B_1 * \ln \left(\frac{R}{R_{ref}} \right) + C_1 * \ln^2 \left(\frac{R}{R_{ref}} \right) + D_1 * \ln^3 \left(\frac{R}{R_{ref}} \right) \right)^{-1} \quad (0-19)$$

Κατά την διάρκεια του πειράματος, ορίσθηκαν στο σταθμό θέρμανσης οι 125°C ως τελική θερμοκρασία μόνιμης κατάστασης. Η θερμοκρασία αυτή αποτελεί το άνω όριο λειτουργίας των δύο πρώτων θερμίστορ , δηλαδή αυτών με ονομαστικές αντιστάσεις 10 KΩ και 100KΩ. Ο τρίτος αισθητήρας, δηλαδή το θερμίστορ 100KΩ για 3D εκτυπωτές έχει άνω όριο λειτουργίας τους 300°C.

Έπειτα από την επεξεργασία των μετρήσεων του πειράματος, εξήχθησαν τα διαγράμματα που θα χρησιμοποιηθούν για την σύγκριση στον αισθητήρων. Στο Σχήμα 3-16 παρουσιάζεται η θερμοκρασία που μετρούν οι αισθητήρες συναρτήσει του χρόνου. Από αυτό παρατηρείται ότι οι μετρήσεις που λήφθηκαν και από τα τρία θερμίστορ είναι παραπλήσιες με τις μετρήσεις του θερμοστοιχείου. Διακρίνεται όμως ότι οι μετρήσεις του θερμίστορ 100KΩ για 3D εκτυπωτές είναι πιο κοντά στις μετρήσεις του θερμοστοιχείου σε σχέση με τους άλλους δύο αισθητήρες.



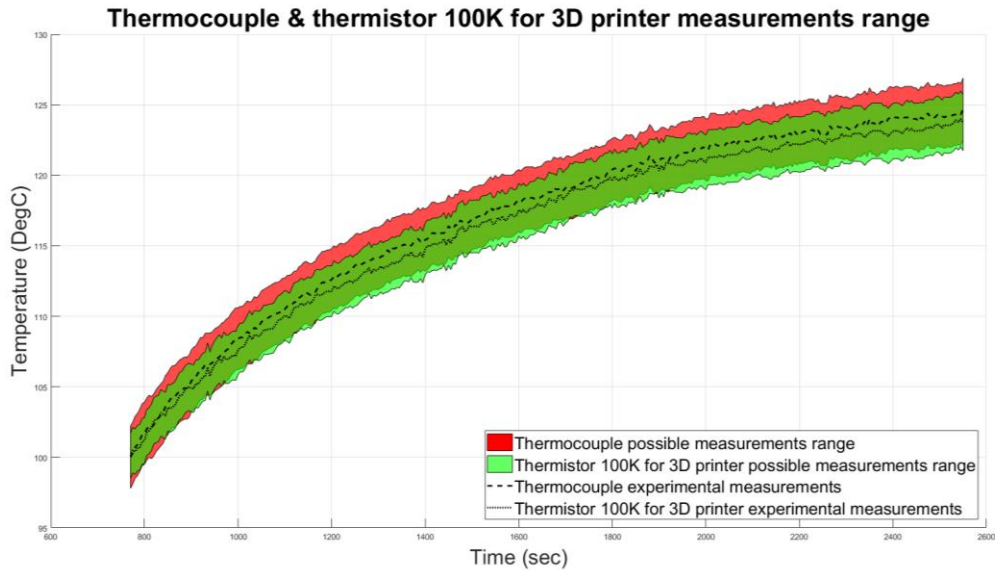
Σχήμα 3-16. Μετρήσεις θερμοκρασίας από τους τέσσερις αισθητήρες.

Συνεπώς, κρίθηκε άξιο περαιτέρω διερεύνησης το κατά πόσο οι μετρήσεις του θερμίστορ για 3D εκτυπωτές ταυτίζονται με αυτές το θερμοστοιχείου. Για τον σκοπό αυτό, επιλέχθηκε να μελετηθεί η περιοχή των τιμών τους για θερμοκρασίες άνω των 100°C, όπου το φαινόμενο ισορροπεί.

Δεδομένου ότι όλοι οι αισθητήρες, παρουσιάζουν πιθανό σφάλμα μέτρησης, τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από αυτούς θα κυμαίνονται εντός επιτρεπτών ορίων, με βάση τις προδιαγραφές των κατασκευαστών. Συνεπώς, στις τιμές που μετρήθηκαν πειραματικά προστέθηκαν και αφαιρέθηκαν τα αντίστοιχα σφάλματα. Με τον τρόπο αυτό προέκυψαν οι δύο περιοχές πιθανών τιμών μέσα στις οποίες θα βρίσκονται οι μετρήσεις. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το σφάλμα για το θερμοστοιχείο είναι της τάξης των $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ ενώ το σφάλμα του θερμίστορ 100KΩ για 3D εκτυπωτές κυμαίνεται από $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ έως $\pm 1,7^{\circ}\text{C}$.

Στο Σχήμα 3-17 παρακάτω, με διακεκομμένη μαύρη γραμμή με παύλες διαγράφονται οι πραγματικές μετρήσεις του θερμοστοιχείου και με μαύρη γραμμή με τελείες, οι πραγματικές μετρήσεις του θερμίστορ. Από αυτές, προκύπτει με κόκκινο χρώμα η περιοχή των πιθανών τιμών του θερμοστοιχείου και με πράσινο χρώμα η περιοχή πιθανών μετρήσεων του θερμίστορ 100KΩ για 3D εκτυπωτές.

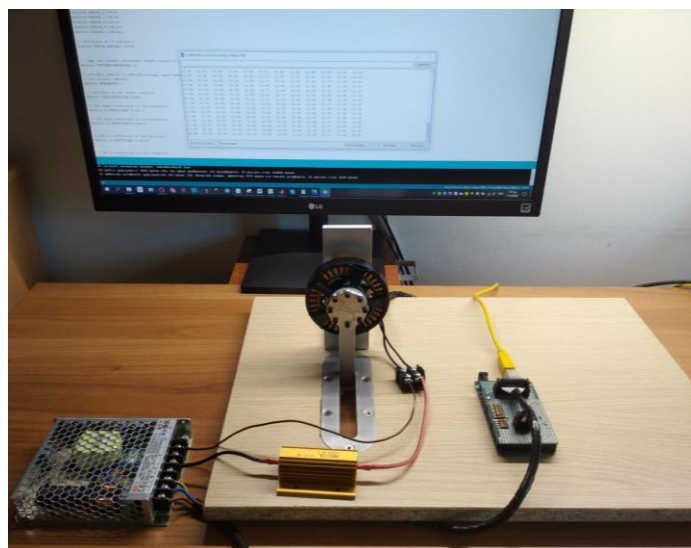
Από το εν λόγω διάγραμμα παρατηρείται ότι τα φάσματα τιμών των δύο αισθητήρων σχεδόν συμπίπτουν μεταξύ τους σε ένα πολύ μεγάλο ποσοστό. Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι για την ακριβή μέτρηση θερμοκρασιών, κρίνεται καταλληλότερος ο τρίτος αισθητήρας, δηλαδή το θερμίστορ NTC 100 KΩ για 3D εκτυπωτές.



Σχήμα 3-17. Το εύρος πιθανών μετρήσεων του θερμοστοιχείου και του θερμίστορ 100ΚΩ για 3D εκτυπωτές.

3.3.4 Μέτρηση θερμοκρασίας με θερμίστορ στον κινητήρα T Motor U8 KV100

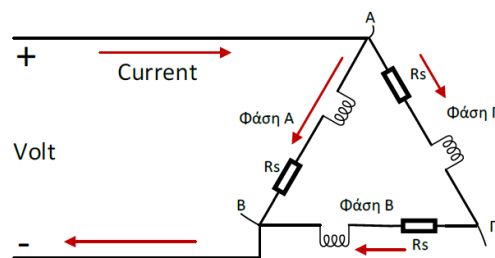
Έχοντας εξακριβώσει πειραματικά την αξιοπιστία των μετρήσεων του θερμίστορ 100ΚΩ για 3D εκτυπωτές, χρησιμοποιήθηκε ο εν λόγω αισθητήρας σε θερμικό πείραμα με τον επενεργητή T Motor U8 KV100. Στο Σχήμα 3-18 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη. Αριστερά διακρίνεται το τροφοδοτικό 5V στο οποίο συνδέονται οι δύο εκ των τριών φάσεων του κινητήρα. Σε σειρά με τον επενεργητή είναι συνδεδεμένη αντίσταση ισχύος, προκειμένου να ρυθμίζεται κατάλληλα το ρεύμα που τον τροφοδοτεί. Στα τυλίγματα του κινητήρα έχουν τοποθετηθεί θερμίστορ σε κατάλληλες θέσεις. Οι αισθητήρες αυτοί συνδέονται με τον μικροελεγκτή Arduino Mega μέσω μιας πλακέτας, όπου υλοποιείται κύκλωμα διαιρέτη τάσης για έκαστο θερμίστορ. Ο μικροελεγκτής συνδέεται με τον υπολογιστή, απ' όπου λαμβάνονται οι μετρήσεις μέσω σειριακής επικοινωνίας.



Σχήμα 3-18. Η διάταξη θερμικού πειράματος του κινητήρα T Motor U8 KV100.

Προκειμένου να διαμορφωθεί μια πλήρης εικόνα για την θερμική συμπεριφορά του κινητήρα T Motor U8 KV100, κρίθηκε σκόπιμο να επαναληφθεί το ίδιο πείραμα με διαφορετικά ηλεκτρικά φορτία. Γνωρίζοντας την αντίσταση του κινητήρα αυτού και την τάση τροφοδοσίας (5V), επιλέχθηκαν οι αντιστάσεις των 0,55Ω, των 0,26Ω και των 0,13Ω για σύνδεση σε σειρά με αυτόν. Με τον τρόπο αυτό, ο κινητήρας τροφοδοτήθηκε διαδοχικά με ρεύματα 6,43A, 10,16A και 13,73A.

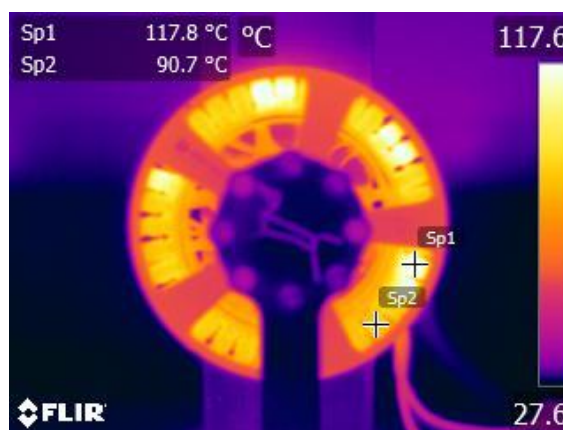
Για την τοποθέτηση των αισθητήρων θερμοκρασίας με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο, ήταν απαραίτητη η κατανόηση της θερμικής φόρτισης των πηνίων με βάση την συνδεσμολογία που υλοποιήθηκε. Δεδομένου ότι ο κινητήρας είναι τριφασικός και συνδέονται οι δύο εκ των φάσεων μόνο, πρόκειται για συνδεσμολογία τύπου τριγώνου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-19. Συνεπώς, αν η φάση A διαρρέεται με ρεύμα I_A , οι άλλες δύο θα διαρρέονται με ρεύμα $I_A/2$, όπως περιγράφεται και από την (4-3).



Σχήμα 3-19. Τα τυλίγματα του επενεργητή συνδέθηκαν με σύνδεση τριγώνου.

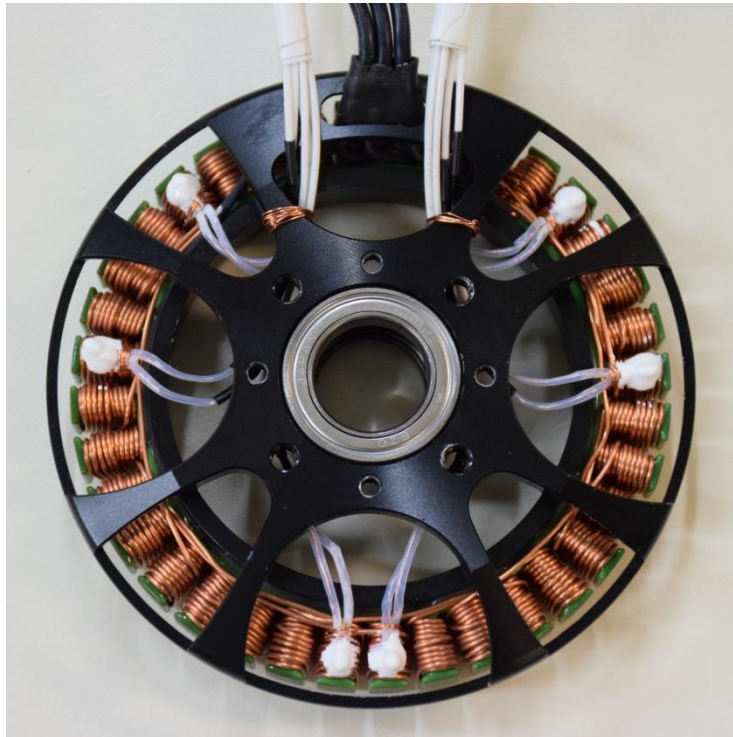
$$I_{ph} = \left\{ \begin{array}{l} I_A = \frac{2}{3} * I \\ I_B = I_C = \frac{1}{3} * I \end{array} \right\} \quad (0-20)$$

Ο εν λόγω κινητήρας έχει συνολικά 36 τυλίγματα. Τα 12 εξ αυτών ανήκουν στην φάση Α, ενώ τα υπόλοιπα δύο ζευγάρια των 12 τυλιγμάτων ανήκουν στις φάσεις Β και C, αντίστοιχα. Από πειράματα που έγιναν με την χρήση θερμικής κάμερας αποδείχθηκε ότι κατά την τροφοδοσία του κινητήρα με ρεύμα, τα πηνία του ενεργοποιούνται σε υποομάδες των 2, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 3-20. Διακρίνεται ότι ανά 6 πηνία επαναλαμβάνεται το ίδιο μοτίβο διαδοχής Α-Α-Β-Β-С-С. Συνεπώς, σε κάθε ομάδα των 6 πηνίων, τα δύο θα ανήκουν στην φάση Α και θα διαρρέονται με ρεύμα I_A , και τα άλλα 4 σε σειρά θα ανήκουν στις φάσεις Β και C και θα διαρρέονται με ρεύμα $I_A/2$.



Σχήμα 3-20. Η εικόνα του T Motor U8 KV100 μέσω θερμικής κάμερας.

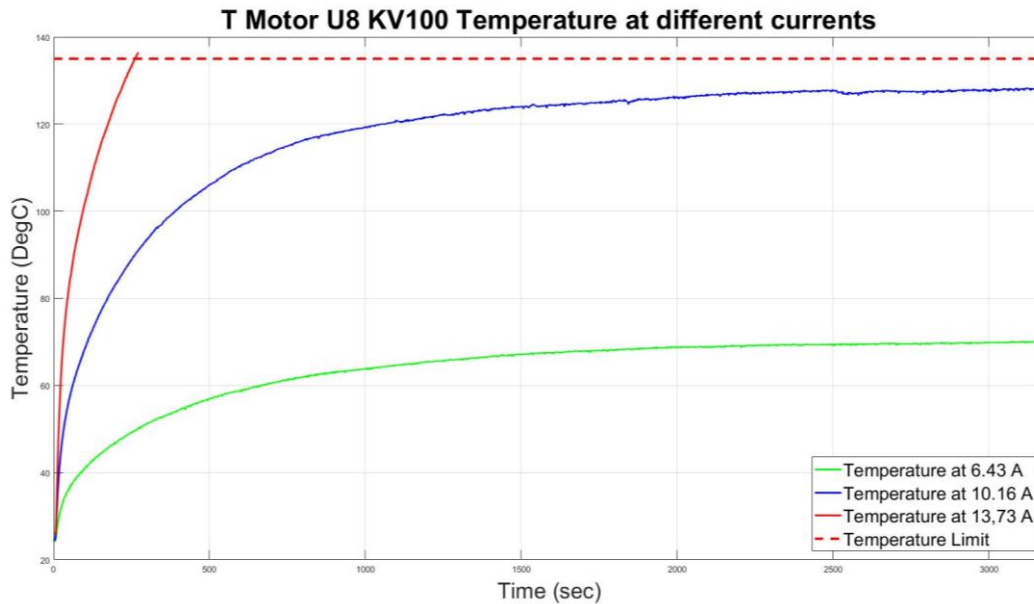
Αυτή η παρατήρηση επηρέασε τον τρόπο που τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες επάνω στα τυλίγματα του επενεργητή. Συνολικά τοποθετήθηκαν 6 αισθητήρες με τρόπο ώστε έκαστο θερμίστορ να απέχει από το προηγούμενό του κατά 6+1 θέσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-21. Με αυτή την μέθοδο, ο κάθε αισθητήρας μετράει ένα από τα 6 πηνία που απαρτίζουν το επαναλαμβανόμενο μοτίβο που αναφέρθηκε. Τα θερμίστορ συγκρατήθηκαν με μηχανικό τρόπο στην επιφάνεια των τυλιγμάτων, κάνοντας χρήση λεπτού πηνειοσύρματος. Για την εξασφάλιση της ακρίβειας των μετρήσεων, τοποθετήθηκε ειδική θερμικά αγωγίμη πάστα ανάμεσα στους αισθητήρες και τα προς μέτρηση πηνία.



Σχήμα 3-21. Τοποθέτηση των θερμίστορ στα τυλίγματα του T Motor U8 KV100.

Στο Σχήμα 3-22 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μετρήσεις θερμοκρασίας των τυλιγμάτων του επενεργητή κατά την τροφοδοσία του με ρεύμα έντασης 6,43A, 10,16A και 13,73A. Οι καμπύλες περιγράφουν τις μέγιστες μετρήσεις που λήφθηκαν κατά την υλοποίηση των τριών πειραμάτων. Συνεπώς, περιγράφεται η συμπεριφορά των πηνίων που διαρρέονται με τις υψηλές τιμές ρεύματος, δηλαδή αυτά της φάσης A.

Το μονωτικό βερνίκι των τυλιγμάτων του κινητήρα είναι τάξης F, γεγονός που σημαίνει ότι έχει όριο θερμοκρασίας τους 155 °C. Δεδομένου οι μετρήσεις θερμοκρασίας λαμβάνονται στην εξωτερική μεριά των τυλιγμάτων, ενδέχεται το εσωτερικό μέρος των πηνίων να λαμβάνει υψηλότερες θερμοκρασίες. Για λόγους ασφαλείας έναντι υπερθέρμανσης, ορίσθηκαν οι 135 °C ως άνω όριο θερμοκρασίας. Από το διάγραμμα συμπεραίνεται ότι ο εν λόγω κινητήρας είναι ασφαλής έναντι υπερθέρμανσης όταν τροφοδοτείται με ρεύμα μικρότερο ή ίσο των 10,16A. Αντίθετα, ο επενεργητής αυτός δεν πρέπει να εκτίθεται σε ρεύμα έντασης άνω των 13,73A για χρόνο μεγαλύτερο από 270 δευτερόλεπτα.



Σχήμα 3-22. Η θερμοκρασία τυλιγμάτων του T Motor U8 KV100 για τροφοδοσία με 6,43A, 10,16A και 13,73A.

3.3.5 Αρχές λειτουργίας των θερμικών καμερών

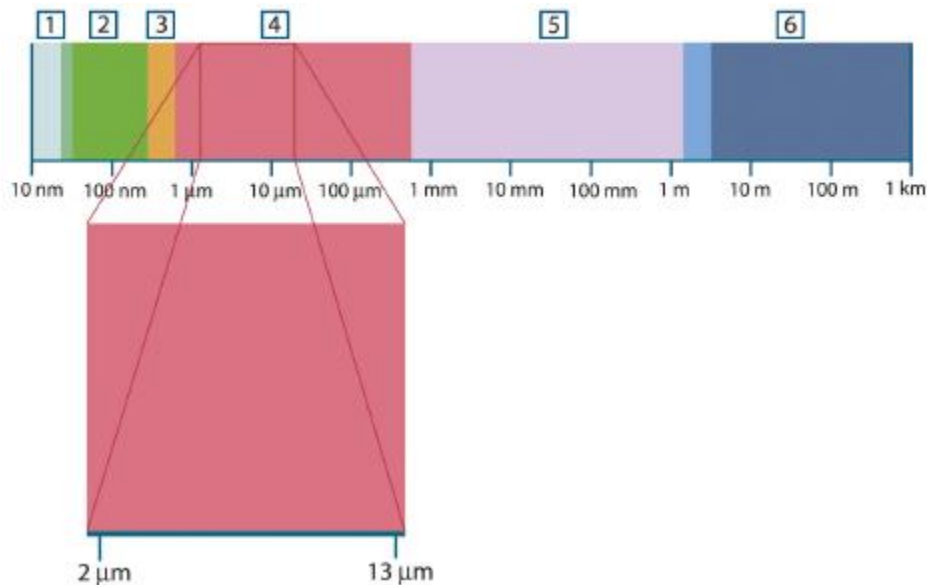
Ένας εναλλακτικός τρόπος μέτρησης θερμοκρασίας είναι με την χρήση διατάξεων όπως η θερμική κάμερα. Κατά την χρήση της θερμικής κάμερας, τα pixels θερμαίνονται από την εισερχόμενη infrared (IR) ακτινοβολία και έτσι αλλάζουν την αντίστασή τους. Η αλλαγή της αντίστασης αυτής μετρείται από την κάμερα, οπότε προκύπτει μια τιμή θερμοκρασίας για κάθε ένα pixel. Συνεπώς, η εικόνα που λαμβάνεται, δεν είναι μια απλή φωτογραφία, αλλά πρόκειται για μια ραδιομετρική εικόνα, όπου κάθε pixel περιέχει μια συγκεκριμένη πληροφορία θερμοκρασίας. Η τεχνική που ακολουθείται για την αποτύπωση της εικόνας αυτής ονομάζεται θερμογραφία. Η εικόνα που λαμβάνεται ως στιγμιότυπο, στην συνέχεια εισάγεται στο κατάλληλο πρόγραμμα για περαιτέρω επεξεργασία. Ρυθμίζοντας τις απαραίτητες παραμέτρους, λαμβάνονται οι επιθυμητές μετρήσεις.



Σχήμα 3-23. Η θερμική κάμερα FLIR E300.

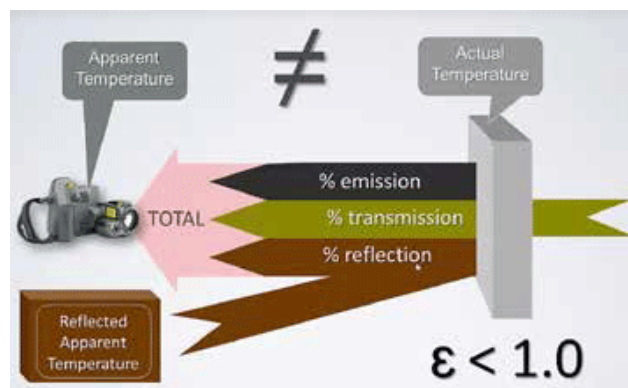
Η διέγερση των μορίων ενός σώματος όταν αυτό θερμαίνεται οδηγεί σε συγκρούσεις μεταξύ τους, οι οποίες απελευθερώνουν κάποια ενέργεια πρόσκρουσης με την μορφή πρωτονίων. Αυτό το φαινόμενο λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες άνω του απόλυτου μηδενός (-173,16°C) και γίνεται πιο έντονο με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η μεταφορά θερμότητας από την απελευθέρωση των πρωτονίων είναι γνωστή ως θερμική ακτινοβολία (ή αλλιώς ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία).

Παρατηρώντας το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα στο Σχήμα 3-24 παρακάτω, η περιοχή αυτή διακρίνεται ανάμεσα στο φάσμα ορατού φωτός και των μικροκυμάτων. Η ακτινοβολία αυτή μπορεί να μεταδοθεί με την ταχύτητα του φωτός, ενώ μπορεί να εσπιαστεί, να ανακλαστεί και να διαθλαστεί.



Σχήμα 3-24. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. (1) Ακτίνες Χ, (2) UV ακτινοβολία, (3) Ορατό φως, (4) IR ακτινοβολία, (5) Μικροκύματα, (6) Ραδιοκύματα.

Στην πράξη, η ακτινοβολία ενός σώματος είναι συνισταμένη τριών επιμέρους ακτινοβολιών, της εκπεμπόμενης, της μεταδιδόμενης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-25. Στις περιπτώσεις όπου το προς μέτρηση σώμα δεν είναι διάφανο, η μεταδιδόμενη ακτινοβολία αμελείται. Επομένως, τα μεγέθη που επηρεάζουν τα δύο αυτά είδη ακτινοβολιών θα πρέπει να είναι σωστά ορισμένα ώστε να επιτυγχάνονται ακριβείς μετρήσεις. Τα εν λόγω μεγέθη είναι ο συντελεστής εκπομπής (ϵ) και η θερμοκρασία ανάκλασης.



Σχήμα 3-25. Η εκπεμπόμενη, η μεταδιδόμενη και η ανακλώμενη θερμοκρασία σώματος.

Ο όρος εκπομπή (emissivity) εκφράζει τον λόγο της ακτινοβολίας από ένα σώμα προς την ακτινοβολία του ιδανικού μέλαν σώματος, για το ίδιο μήκος κύματος, γωνία και θερμοκρασία. Ως μέλαν σώμα θεωρείται το ιδανικό σώμα όπου απορροφά όλο το φως που προσπίπτει πάνω του και δεν το διαχέει ούτε το ανακλά, συνεπώς έχει $\epsilon=1$. Στην πραγματικότητα, όλα τα σώματα έχουν συντελεστή εκπομπής κάτω του 1.

Οι τιμές του συντελεστή ϵ μπορούν να επιλεγούν από έτοιμους εμπειρικούς πίνακες. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το υλικό του σώματος, η τραχύτητα επιφάνειας, το μήκος κύματος, την θερμοκρασία, καθώς και την γωνία του μετρητικού οργάνου ως προς το μετρούμενο σώμα. Τα περισσότερα μη μεταλλικά υλικά έχουν τιμές εκπομπής κοντά στο 0,9. Υλικά με συντελεστή εκπομπής κάτω του 0,7 είναι δύσκολο να μετρηθούν, ενώ υλικά με συντελεστή ϵ κάτω του 0,2 είναι σχεδόν αδύνατο να μετρηθούν χωρίς να αυξηθεί η τιμή εκπομπής με κάποιον τρόπο.

Υπάρχουν εύκολοι τρόποι για την αντιστάθμιση της χαμηλής εκπομπής σε στόχους τέτοιου είδους. Με τις μεθόδους αυτές μειώνεται η ανακλαστικότητα του στόχου, βελτιώνοντας την ακρίβεια της μέτρησης. Η πιο ευρέως εφαρμοσμένη από αυτές είναι η μέθοδος της "μονωτικής ταινίας", που είναι αρκετά ακριβής και οικονομική ταυτόχρονα. Για αυτή την χρήση προτείνονται οι μαύρες ταινίες βινυλίου Scotch 33, η μονωτική ταινία της 3M, καθώς και άλλες με όμοιες ιδιότητες. Οι περισσότερες τέτοιου είδους ταινίες υψηλής ποιότητας έχουν συντελεστή εκπομπής 0,97. Παρόμοια μέθοδος εφαρμόζεται και όταν δεν είναι γνωστό ακριβώς το υλικό του στόχου, αλλά ούτε και οι επιφανειακές του ιδιότητες. Στις περιπτώσεις αυτές ο συντελεστής εκπομπής υπολογίζεται με πειραματικό τρόπο.

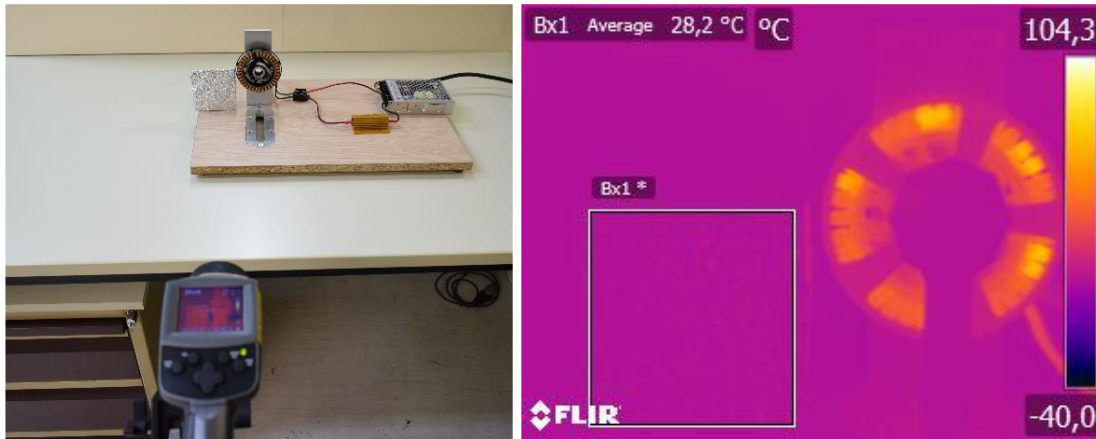
3.3.6 Μέτρηση θερμοκρασίας με χρήση θερμικής κάμερας στον κινητήρα T Motor U8 KV100

Στο σημείο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να υλοποιηθεί ξανά το θερμικό πείραμα στο οποίο τροφοδοτείται ο κινητήρας T Motor U8 KV100 με ρεύμα έντασης 10,16A. Στην προκειμένη περίπτωση, οι μετρήσεις θα λαμβάνονται μόνο με την χρήση θερμικής κάμερας. Με τον τρόπο αυτό θα είναι εφικτή η σύγκριση των μετρήσεων της κάμερας σε σχέση με αυτές του θερμίστορ, ώστε να διαπιστωθεί η αξιοπιστία της. Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο E300 του οίκου Flir, ενώ η επεξεργασία των λήψεων μετά το πέρας του πειράματος έγινε με την χρήση του αντίστοιχου προγράμματος που προσφέρει η εταιρεία.

Όπως εξηγήθηκε, για την εξασφάλιση της μέγιστης ακρίβειας μέτρησης, είναι απαραίτητος ο ακριβής υπολογισμός τόσο της θερμοκρασίας ανάκλασης, όσο και του συντελεστή εκπομπής, τα οποία στην περίπτωση που εξετάζεται ευρέθηκαν πειραματικά.

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας ανάκλασης, χρησιμοποιήθηκε ένα κομμάτι αλουμινόχαρτου, το οποίο τσαλακώθηκε τόσο ώστε να είναι δυνατή η επαναφορά του. Στην συνέχεια, το αλουμινόχαρτο αυτό ισιώθηκε και τυλίχθηκε γύρω από ένα κομμάτι χαρτόνι. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 3-26, ο στόχος αυτός τοποθετήθηκε δίπλα στο προς μέτρηση σώμα. Έπειτα από την εστίαση της κάμερας στον στόχο αλουμινόχαρτου, λήφθηκε στιγμιότυπο, το οποίο εισάχθηκε στη συνέχεια στο αντίστοιχο λογισμικό για περεταίρω επεξεργασία και υπολογισμό της επιθυμητής μέτρησης.

Κατά την επεξεργασία της εικόνας, απομονώθηκε ένα τετράγωνο τμήμα επάνω στην περιοχή του αλουμινόχαρτου και στην περιοχή αυτή τέθηκε το $\epsilon = 1$ και η απόσταση από τον φακό της κάμερας ίση με 0 m. Υπολογίζοντας την μέση τιμή της θερμοκρασίας στο εν λόγω τετράγωνο, βρίσκεται η θερμοκρασία ανάκλασης ίση με 28,2°C. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην εικόνα ο κινητήρας φαίνεται να βρίσκεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από τον στόχο αλουμινόχαρτου. Αυτό έγινε μόνο για λόγους επίδειξης, προκειμένου να διακρίνεται εύκολα ο κινητήρας δίπλα στον στόχο αυτό. Σε αντίθετη περίπτωση, στην εικόνα θα φαινόταν παντού το ίδιο χρώμα, δεδομένου ότι όλα τα σώματα είχαν την ίδια θερμοκρασία.



Σχήμα 3-26. Πειραματικός υπολογισμός της θερμοκρασίας ανάκλασης: (a) Η πειραματική διάταξη (b) Το στιγμιότυπο από την θερμική κάμερα

Όπως αναφέρθηκε, σκοπός του πειράματος είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας στα τυλίγματα του επενεργητή. Δεδομένου όμως ότι δεν είναι γνωστό ούτε το ακριβές κρέμα των τυλιγμάτων, αλλά ούτε και οι επιφανειακές τους ιδιότητες, κρίθηκε αναγκαίος ο πειραματικός υπολογισμός του συντελεστή εκπομπής. Για τον σκοπό αυτό, καλύφθηκε ένα από τα πηνία του κινητήρα με μονωτική ταινία όμοιων χαρακτηριστικών με την Scotch 33, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 3-27. Στην συνέχεια, τροφοδοτώντας τον επενεργητή, θερμάνθηκαν τα τυλίγματά του τουλάχιστον κατά 20°C πάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος και λήφθηκε στιγμιότυπο με την κάμερα.

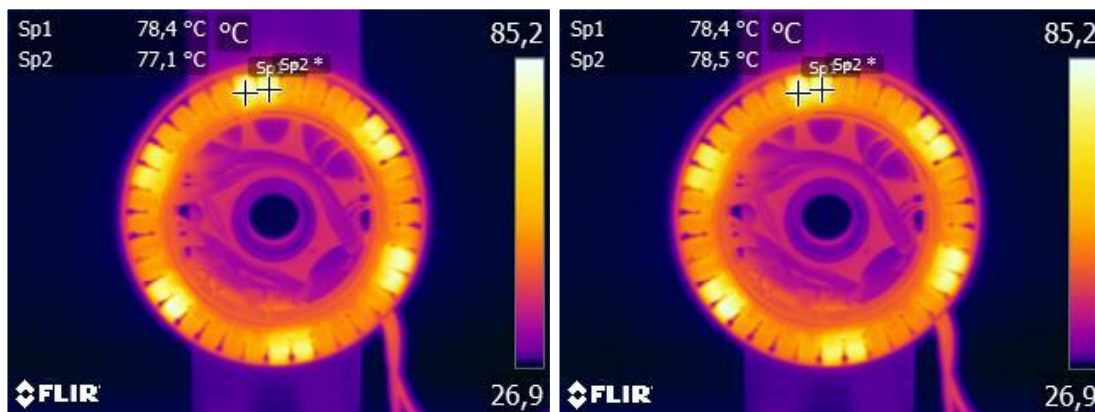


Σχήμα 3-27. Κάλυψη ενός εκ των τυλιγμάτων με μονωτική ταινία.

Το στιγμιότυπο αυτό στην συνέχεια υπέστη επεξεργασία στο αντίστοιχο λογισμικό. Πιο συγκεκριμένα, τέθηκε ένα σημείο μέτρησης θερμοκρασίας επάνω στην περιοχή της ταινίας (Sp1) και άλλο ένα στην καθαρή επιφάνεια του πηνίου (Sp2), όπως φαίνονται στο Σχήμα 3-28. Στα δύο αυτά σημεία τίθενται μόνο τοπικές συνθήκες αναφορικά με την θερμοκρασία ανάκλασης, το emissivity και την απόσταση από την κάμερα. Πιο συγκεκριμένα, η υπόλοιπη εικόνα πέραν των σημείων αυτών δεν περιέχει έγκυρες μετρήσεις, εκτός αν ρυθμισθούν κατάλληλα οι αντίστοιχες παράμετροι για έκαστο σημείο της εικόνας, γεγονός που δεν είναι εύκολο να συμβεί. Επομένως, οι μετρήσεις που λαμβάνουμε έχουν τοπικό χαρακτήρα.

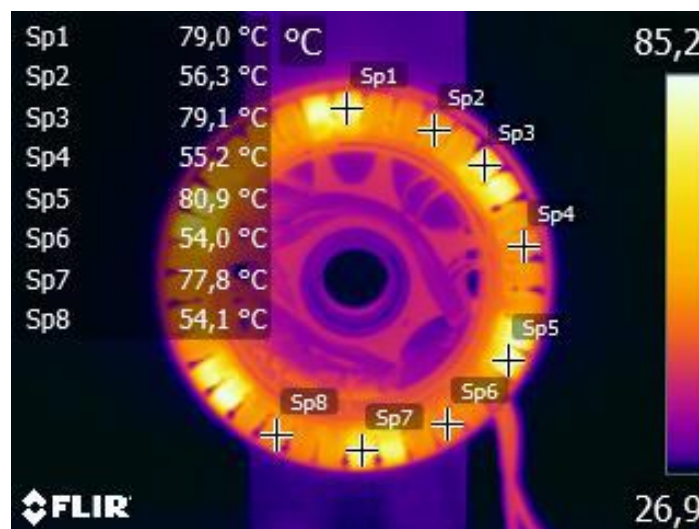
Στο σημείο Sp1 που βρίσκεται επάνω στο πηνίο που είναι καλυμμένο με μονωτική ταινία, ορίσθηκε τοπικά η απόσταση της κάμερας ίση με 0,5m, με βάση τις συνθήκες του πειράματος. Επίσης, η θερμοκρασία ανάκλασης τέθηκε στους 28,2°C, όπως υπολογίσθηκε πριν και το $\epsilon=0,97$, με βάση τις προδιαγραφές του κατασκευαστή της ταινίας. Στο σημείο Sp2 ορίσθηκαν τοπικά ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας ανάκλασης και απόστασης με το Sp1, ενώ στον συντελεστή εκπομπής ορίσθηκε αρχικά η τιμή 0,96. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι ενώ τα δύο σημεία θα έπρεπε να δίνουν ίδιες μετρήσεις λόγω ότι μετριόνται διπλανά πηνία, οι δύο θερμοκρασίες παρουσιάζουν διαφορές, επειδή η τιμή του ϵ που τέθηκε στο Sp2 δεν είναι η σωστή.

Έπειτα αλλάχθηκε ο συντελεστής ϵ για το σημείο Sp2, ώστε οι μετρήσεις θερμοκρασίας για τα δύο αυτά σημεία να πλησιάσουν όσο το δυνατόν περισσότερο. Η ακρίβεια του ϵ που είναι δυνατό να ορισθεί είναι της τάξεως των δύο δεκαδικών και για τον λόγο αυτό οι δύο θερμοκρασίες παρουσιάζουν μια μικρή διαφορά 0,1°C μετά από την ρύθμιση. Η τελική τιμή του ϵ για την επιφάνεια του γυμνού πηνίου είναι το 0,93.



Σχήμα 3-28. Μετρήσεις θερμοκρασίας του T Motor U8 KV100: (a) Πριν την ρύθμιση του ϵ στο Sp2 (b) Μετά την ρύθμιση του ϵ στο Sp2.

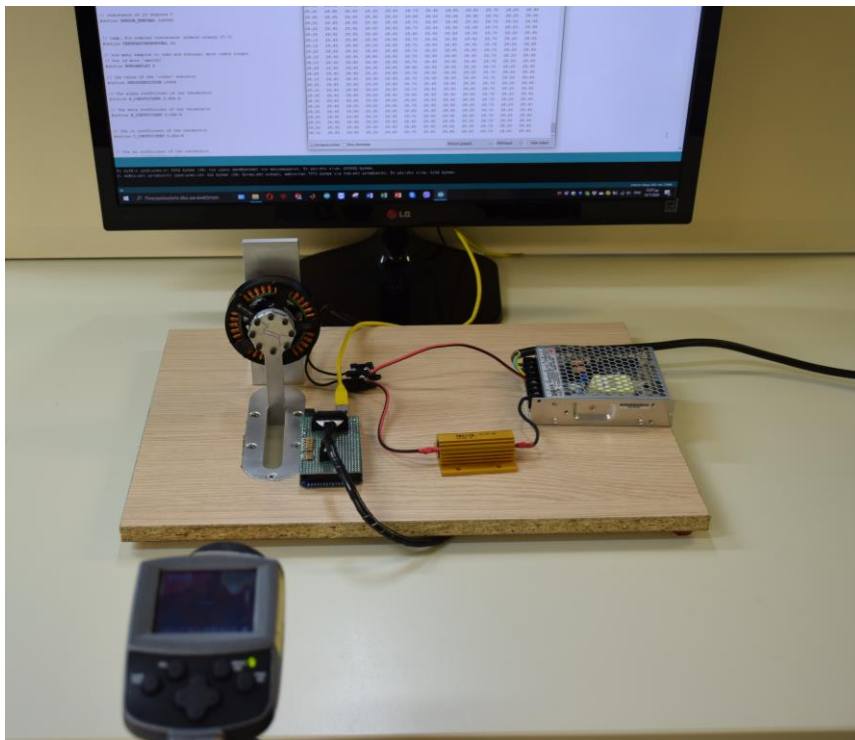
Έπειτα από τον πειραματικό υπολογισμό του συντελεστή των τυλιγμάτων του T Motor U8 KV100($\epsilon=0,93$), θα είναι δυνατή η λήψη έγκυρων μετρήσεων σε οποιοδήποτε σημείο των πηνίων του. Αυτό το γεγονός παρουσιάζεται ποιοτικά στο Σχήμα 3-29.



Σχήμα 3-29. Λήψη έγκυρων μετρήσεων σε οποιοδήποτε σημείο των πηνίων του T Motor U8 KV100 έπειτα από την πειραματική εύρεση του συντελεστή ϵ .

Στο σημείο αυτό κρίθηκε σκόπιμη η εκτέλεση όμοιας διαδικασίας για τον κινητήρα T Motor U8 Lite KV100, που θα ενσωματωθεί στην νέα μονάδα επενέργησης. Ακολουθώντας την ίδια ακριβώς μέθοδο, υπολογίστηκε πειραματικά ότι ο συντελεστής εκπομπής των τυλιγμάτων του είναι ίσος με 0,97.

Έπειτα από τον υπολογισμό των τιμών του συντελεστή εκπομπής, αλλά και της θερμοκρασίας ανάκλασης, εκπονήθηκε το θερμικό πείραμα με τον κινητήρα T Motor U8 KV100. Όπως διακρίνεται στο Σχήμα 3-30, ο κινητήρας τροφοδοτήθηκε με ρεύμα έντασης 10,16A, ενώ λαμβάνονταν ταυτόχρονα μετρήσεις τόσο με την θερμική κάμερα, όσο και με την χρήση θερμίστορ. Οι μετρήσεις θερμοκρασίας με την διάταξη Arduino – θερμίστορ λαμβάνονταν κάθε 1 δευτερόλεπτο, ενώ τα στιγμιότυπα της κάμερας λαμβάνονταν κάθε 2 λεπτά. Στην συνέχεια έγινε επεξεργασία των στιγμιότυπων της κάμερας στο αντίστοιχο λογισμικό, όπου ορίστηκαν οι τιμές του ϵ και της θερμοκρασίας ανάκλασης που υπολογίστηκαν.



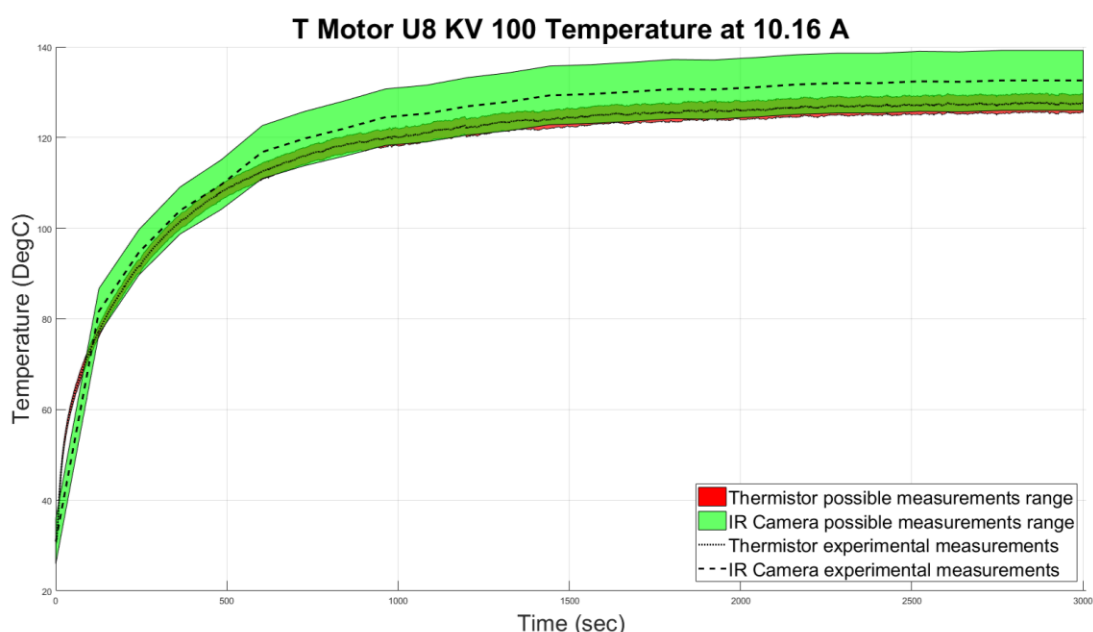
Σχήμα 3-30. Μέτρηση θερμοκρασίας με θερμική κάμερα και θερμίστορ στον T Motor U8 KV100

Αξίζει να σημειωθεί ότι η κάμερα διαθέτει δύο εύρη μέτρησης θερμοκρασίας, ένα εύρος από -20°C έως $+120^{\circ}\text{C}$ και δεύτερο εύρος από $+80^{\circ}\text{C}$ έως $+500^{\circ}\text{C}$. Επομένως, όταν η θερμοκρασία του κινητήρα ανέβηκε πάνω από 100°C , η κάμερα ρυθμίστηκε στο δεύτερο εύρος μέτρησης.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δύο διατάξεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-31. Προκειμένου να σχηματισθεί μια πιο πλήρης εικόνα για την σύγκριση των μετρήσεων του θερμίστορ με την θερμική κάμερα, λήφθηκαν υπ' όψιν και τα σφάλματα μέτρησης με βάσει τις προδιαγραφές των κατασκευαστών. Στο εν λόγω διάγραμμα σκιαγραφούνται οι καμπύλες των πραγματικών μετρήσεων με δύο είδη διακεκομμένων γραμμών. Από τις τιμές αυτές, με την πρόσθεση και αφαίρεση των επιτρεπτών σφαλμάτων προκύπτουν οι δύο ζώνες πιθανών μετρήσεων. Με κόκκινο χρώμα σκιαγραφείται το φάσμα μέτρησης του θερμίστορ, ενώ με πράσινο χρώμα το φάσμα της θερμικής κάμερας.

Άξιο λόγου είναι το γεγονός ότι ο κατασκευαστής της κάμερας αναφέρει ότι με την αλλαγή του εύρους μέτρησης της κάμερας από το εύρος για τις χαμηλές θερμοκρασίες στο εύρος για τις μεγάλες, το σφάλμα μέτρησης αυξάνει ελαφρά. Αυτό συνεπάγεται με την αύξηση του πλάτους της ζώνης πιθανών μετρήσεων της κάμερας, που είναι έκδηλη στο παρόν γράφημα. Από την εξέταση του διαγράμματος αυτού παρατηρείται ότι οι δύο ζώνες αλληλοκαλύπτονται σε όλο το εύρος θερμοκρασιών, με εξαίρεση το πεδίο για χρόνο μέχρι και περίπου τα 150 δευτερόλεπτα. Αυτή η αδυναμία αλληλοκάλυψης στην περιοχή αυτή εντοπίζεται διότι μέχρι και τα 800 δευτερόλεπτα το φαινόμενο εξελίσσεται αρκετά γρήγορα.

Συνεπώς, η λήψη στιγμιότυπων με την κάμερα κάθε 120 δευτερόλεπτα φαίνεται να μην επαρκεί για την παρακολούθηση του φαινομένου. Σε επόμενο πείραμα θα ήταν σκόπιμο να λαμβάνονταν ακόμα περισσότερες μετρήσεις, ειδικά για τα πρώτα 800 δευτερόλεπτα, πριν το φαινόμενο αρχίζει να ομαλοποιείται. Επομένως, η παρατήρηση αυτή δεν θα πρέπει να είναι ανησυχητική και θέτει αμφιβολίες για την ορθότητα των μετρήσεων της κάμερας.

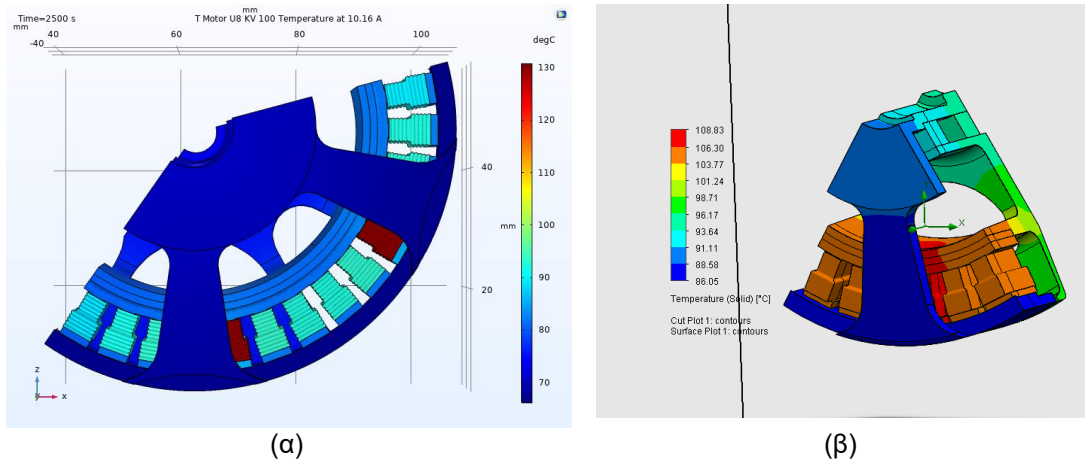


Σχήμα 3-31. Οι ζώνες πιθανών μετρήσεων έκαστου μετρητικού οργάνου.

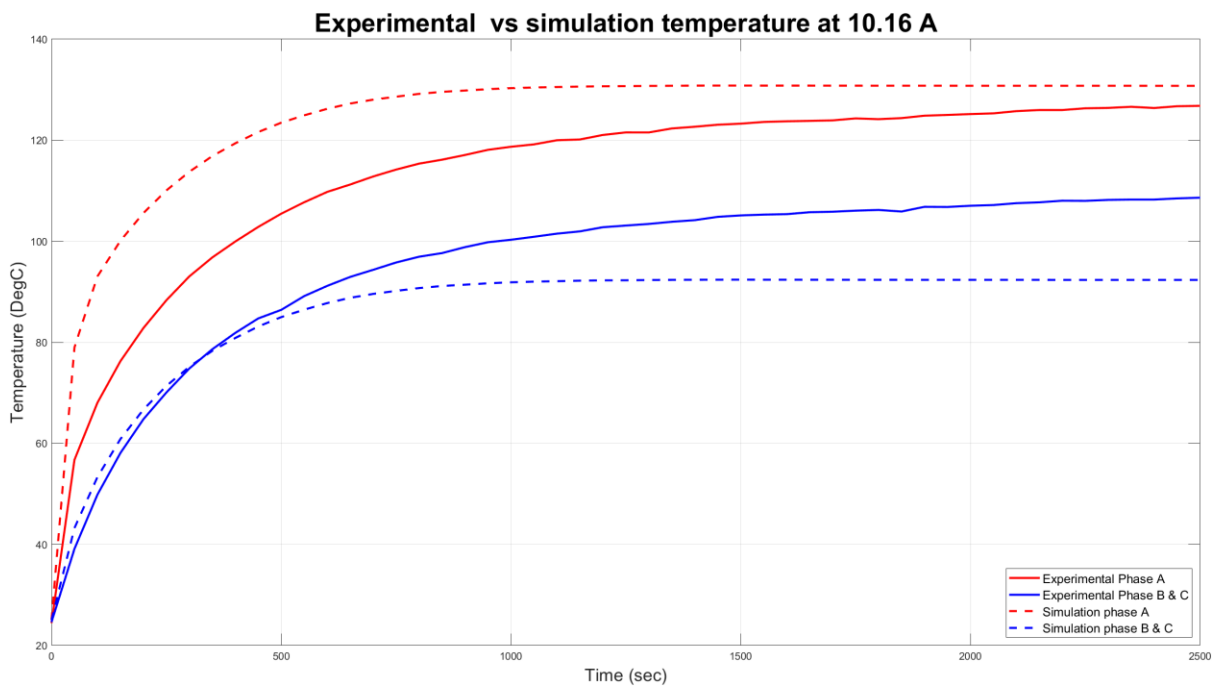
Το συμπέρασμα είναι ότι οι μετρήσεις με την θερμική κάμερα είναι εξίσου αξιόπιστες με τις μετρήσεις του θερμίστορ. Επομένως, στις περιπτώσεις όπου η μέτρηση θερμοκρασίας κρίνεται απαραίτητη σε ένα σημείο της κατασκευής που δεν έχει τοποθετηθεί κατάλληλος αισθητήρας, θα μπορεί να γίνεται χρήση της κάμερας με αρκετά καλή ακρίβεια των αποτελεσμάτων μέτρησης.

3.3.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πειραματικών αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση των μοντέλων που δημιουργήθηκαν στα λογισμικά Comsol και Solidworks καθώς και για την αξιολόγηση των μεθόδων προσομοίωσης στο παρόν υποκεφάλαιο πραγματοποιείται σύγκριση με πειραματικά δεδομένα από την περίπτωση φόρτισης του κινητήρα Tmotor U8 με ρεύμα έντασης 10,16 A. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με την χωρική κατανομή των θερμοκρασιών σε ένα χαρακτηριστικό τμήμα του κινητήρα καθώς και οι καταγραφές θερμοκρασίας από το πείραμα φαίνονται στα Σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 3-32. Χωρική κατανομή των θερμοκρασιών κατά την θερμική ισορροπία για το μοντέλο του κινητήρα (α) στο λογισμικό Comsol και (β) στο λογισμικό Solidworks.



Σχήμα 3-33. Χρονική εξέλιξη των θερμοκρασιακών μεταβολών των περιελίξεων των φάσεων A, B και C από την προσομοίωση στο Comsol (διακεκομμένη κόκκινη και μπλε γραμμή για τις περιελίξεις της φάσης A και B,C αντίστοιχα) και από τα πειραματικά δεδομένα (συνεχής κόκκινη και μπλε γραμμή για τις περιελίξεις της φάσης A και B,C αντίστοιχα).

Αναφορικά με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο λογισμικό Comsol, τα αποτελέσματα σχετικά με την τελική θερμοκρασία των περιελίξεων της φάσης A είναι αρκετά ενθαρρυντικά καθώς αυτή απέχει λιγότερο από 5 °C από την τελική θερμοκρασία που εμφανίστηκε στα πειράματα. Ωστόσο η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας είναι αρκετά απότομη σε σχέση με την πιο νωθρή μεταβολή της θερμοκρασίας του πειράματος. Μεγάλη διαφορά (της τάξης των 20 °C) εμφανίζεται στην θερμοκρασία των περιελίξεων των φάσεων B και C ανάμεσα στην προσομοίωση και την πειραματικά μετρούμενη. Η διαφορά αυτή είναι αναμενόμενη καθώς στην προσομοίωση στο λογισμικό Comsol για την συναγωγή θερμότητας των τμημάτων του

κινητήρα με το περιβάλλον χρησιμοποιήθηκαν μαθηματικές σχέσεις που ισχύουν για επιφάνειες μεγάλου μήκους οι οποίες δεν επηρεάζονται θερμικά από άλλες γειτονικές επιφάνειες. Έτσι στην προσομοίωση η θερμές επιφάνειες των περιελίξεων της φάσης A έχουν μειωμένη επίδραση στην ανάπτυξη θερμοκρασίας στις γειτονικές περιελίξεις.

Στην περίπτωση της προσομοίωσης με το λογισμικό Solidworks και την χρήση της μεθόδου CFD η θερμοκρασιακή διαφορά των περιελίξεων των φάσεων B και σε C με την φάση A κατά την θερμοκρασιακή ισορροπία είναι αισθητά μικρότερη. Η προσομοίωση της κίνησης του θερμού αέρα είναι η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο προσομοιώσεων και σε αυτή οφείλεται η βελτίωση των αποτελεσμάτων σε σχέση με την προσομοίωση του Comsol. Ωστόσο παρά την αντιμετώπιση του προβλήματος της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ των περιελίξεων στην προσομοίωση του Solidworks παρατηρούνται χαμηλότερες τελικές θερμοκρασίες σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα. Πιθανές διαφορές στις θερμικές ιδιότητες των εμπλεκόμενων υλικών (δεδομένου ότι δεν παρέχονταν από τον κατασκευαστή και εκτιμήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας) είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε τέτοιες διαφορές. Σε κάθε περίπτωση, παρά τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα της προσομοίωσης Solidworks με τη χρήση της μεθόδου CFD, απαιτείται μεγαλύτερη εμβάθυνση στην μεθοδολογία μοντελοποίησης και επίλυσης, πράγμα που ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας εργασίας.

4 Σχεδιασμός νέας μονάδας επενέργειας και ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας

4.1 Προδιαγραφές για τον σχεδιασμό της μονάδας

Έπειτα από την επιλογή των βασικών στοιχείων που θα απαρτίζουν τις νέες μονάδες επενέργειας, θα μελετηθεί η ενσωμάτωσή τους με τον καλύτερο δυνατό τρόπο σε ένα κοινό συναρμολόγημα. Έχοντας καταλήξει στα κατάλληλα συμπεράσματα με την εξέταση του συστήματος μετάδοσης κίνησης του τετραπόδου Laelaps II, είναι σκόπιμο να καθορισθούν οι σχεδιαστικές αρχές που θα διέπουν τις νέες μονάδες επενέργειας. Γνώμονας είναι η κατά το δυνατόν καλύτερη κάλυψη των επιμέρους ελλείψεων που εντοπίστηκαν στον προηγούμενο σχεδιασμό. Οι βασικοί άξονες σχεδίασης των μονάδων θα πρέπει να ικανοποιούν με τον βέλτιστο τρόπο τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

Εναλλαξιμότητα

Η εναλλαξιμότητα στο πλαίσιο των μονάδων επενέργειας περιγράφει την ικανότητά τους να χρησιμοποιηθούν σε μια ποικιλία από διαμορφώσεις. Σε ρομποτικές διατάξεις με πολλαπλούς αρθρωτούς συνδέσμους, ο ίδιος επενεργητής θα πρέπει να μπορεί να εφαρμοσθεί σε διαφορετικά σημεία της κατασκευής. Το βασικό χαρακτηριστικό που εξασφαλίζει την δυνατότητα αυτή είναι οι σαφώς καθορισμένες ηλεκτρικές και μηχανικές διεπαφές που θα φέρει η μονάδα επενέργειας.

Υψηλή ενσωμάτωση

Η σύνδεση και η επικοινωνία των μονάδων με την υπόλοιπη κατασκευή κρίνεται σκόπιμο να υλοποιείται με την χρήση ενός ελάχιστου αριθμού καλωδίων και σημείων μηχανικής στήριξης. Συνεπώς, θα πρέπει να είναι ανεξάρτητοι τόσο μηχανικά, όσο και ηλεκτρικά. Μια μονάδα επενέργειας πιθανώς να μην περιλαμβάνει μόνο τον κινητήρα και τον μειωτήρα, αλλά και αισθητήρες θέσης, ροπής και θερμοκρασίας.

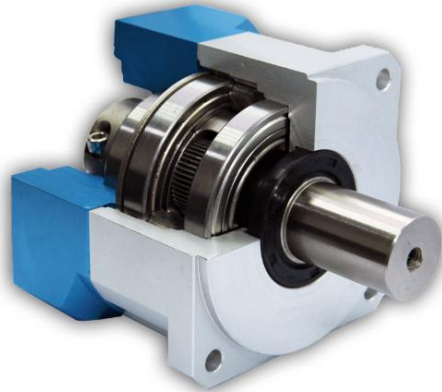
Ευρωστία και αξιοπιστία

Κατά τον σχεδιασμό των διατάξεων αυτών θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερα μεγάλη προσοχή στην επιλογή τόσο των κατάλληλων εξαρτημάτων που θα τις απαρτίζουν, όσο και του τρόπου με τον οποίο αυτά θα συνεργάζονται μεταξύ τους. Ο κύριος στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης σφαλμάτων. Ταυτόχρονα, είναι απαραίτητη η ύπαρξη κατάλληλης μέριμνας ώστε να μπορεί να γίνει εύκολα τόσο η διάγνωση, όσο και η αποκατάσταση πιθανών βλαβών.

4.2 Ενσωμάτωση μειωτήρα στην μονάδα επενέργειας

Οι επιμέρους αρθρώσεις ενός ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας παρουσιάζουν διαφορετικές απαιτήσεις σε συγκέντρωση ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, η απαγωγή και προσαγωγή του ισχίου έχει μικρότερη ζήτηση σε ροπή σε σχέση με τις αρθρώσεις του ισχίου και του γονάτου. Όπως αναφέρθηκε, για την υλοποίηση και των τριών μονάδων επενέργειας επιλέχθηκε ο ίδιος κινητήρας. Προκειμένου να εξασφαλισθούν υψηλότερα μεγέθη ροπής στο ισχίο και το γόνατο, κρίθηκε σκόπιμο να τοποθετηθούν κιβώτια μείωσης 1:10 στις αντίστοιχες μονάδες επενέργειας. Για την απαγωγή και προσαγωγή του ισχίου επιλέχθηκε μειωτήρας με λόγο 1:7.

Όπως διακρίνεται στο Σχήμα 4-1, ένα πλανητικό κιβώτιο περιλαμβάνει και άλλα δομικά στοιχεία εκτός των βασικών στοιχείων που δομούν το πλανητικό σύστημα. Τα κιβώτια αυτά απαρτίζονται επίσης από ρουλεμάν, εδράσεις, άξονες, σφήνες και συνδέσεις για την είσοδο και έξοδο της ισχύος. Τα εν λόγω στοιχεία όμως προσθέτουν ανεπιθύμητο όγκο και βάρος στο σύστημά. Στις περιπτώσεις όπου η υψηλή ενσωμάτωση αποτελεί μείζον θέμα, η εύρεση σχεδιαστικών λύσεων μικρού βάρους και όγκου αποτελεί σημαντική πρόκληση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο σχεδιασμός της νέας μονάδας επενέργειας που μελετάται.



Σχήμα 4-1. Πλανητικός μειωτήρας όμοιος με τους Varitron DH – 042.

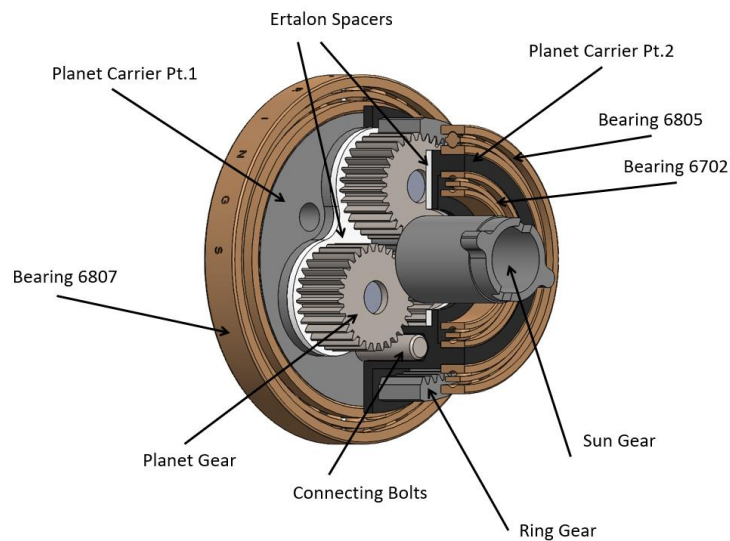
Προς αυτή την κατεύθυνση, έγινε πλήρης αποσυναρμολόγηση των μονάδων μείωσης, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 4-2. Ως αποτέλεσμα, επιτεύχθηκε μεγαλύτερη σχεδιαστική ευελιξία στον βαθμό ενσωμάτωσής των μειώσεων στις μονάδες επενέργειας. Στη συνέχεια, το κάθε ένα εκ των τριών πλανητικών συστημάτων αποτυπώθηκε σε τρισδιάστατη μορφή CAD με στόχο την βέλτιστη προσαρμογή στον σχεδιασμό.



Σχήμα 4-2. Πλήρης αποσυναρμολόγηση των πλανητικών μειωτήρων.

Με στόχο την αρμονική λειτουργία των μελών της μείωσης, αλλά και για εξοικονόμηση όγκου, σχεδιάστηκε νέος φορέας πλανητών. Το εν λόγω εξάρτημα αποτελεί και την έξοδο της μονάδας επενέργειας. Στο Σχήμα 4-3 διακρίνονται τα βασικά μέρη που απαρτίζουν την μονάδα μείωσης, δηλαδή ο ήλιος, οι πλανήτες και το δακτυλιοειδές γρανάζι. Ο φορέας αποτελείται από δύο επιμέρους τμήματα, το ένα είναι σκιαγραφημένο με γκρι χρώμα και το άλλο με μαύρο. Στο σώμα του εδράζονται τρία διαφορετικά ρουλεμάν, το 6807, το 6805 και το

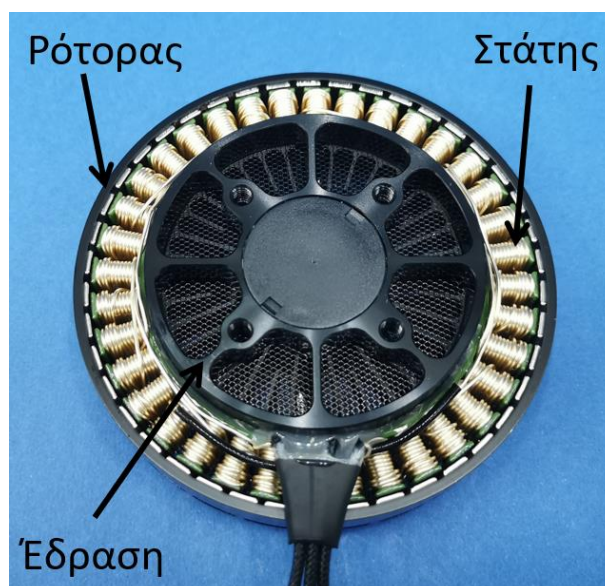
6702. Για την εξάλειψη φθορών του συστήματος λόγω τριβής, προσαρμόστηκαν κατάλληλα παρεμβύσματα από υλικό Ertalon.



Σχήμα 4-3. Η βαθμίδα πλανητικής μείωσης της μονάδας επενέργησης.

4.3 Ενσωμάτωση κινητήρα στην μονάδα επενέργησης

Παρόμοια λογική υιοθετήθηκε και στην ενσωμάτωση του κινητήρα T Motor U8 Lite KV100. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4-4, ο ρότορας του επενεργητή, καθώς και ο στάτης στηρίζονται σε κοινή έδραση, η οποία στο εσωτερικό της περικλείει ρουλεμάν, κοχλίες καθώς και ψήκτρες. Η ύπαρξη όλων των επιπλέον εξαρτημάτων πέραν του ρότορα και του στάτη θέτουν αρκετούς περιορισμούς όσον αφορά τον βαθμό ενσωμάτωσης του κινητήρα στην νέα μονάδα επενέργησης.



Σχήμα 4-4. Η έδραση του επενεργητή T Motor U8 Lite KV100.

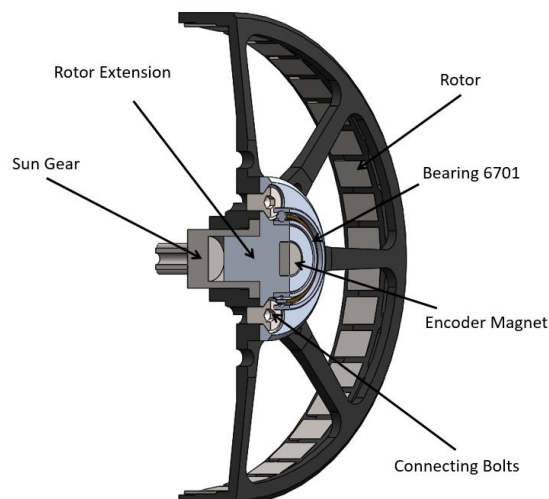
Για τον λόγο αυτό, όμοια με την περίπτωση του μειωτήρα, κρίθηκε σκόπιμο να αποδομηθεί πλήρως ο κινητήρας και να απομονωθούν μόνο τα βασικά του στοιχεία, δηλαδή

ο στάτης και ο ρότορας. Τα εξαρτήματα αυτά στην συνέχεια αποτυπώθηκαν σε τρισδιάστατη μορφή CAD, όπως διακρίνονται στο Σχήμα 4-5, για διευκόλυνση της ενσωμάτωσής τους στο νέο σχέδιο.



Σχήμα 4-5. Αποδόμηση του ρότορα και του στάτη.

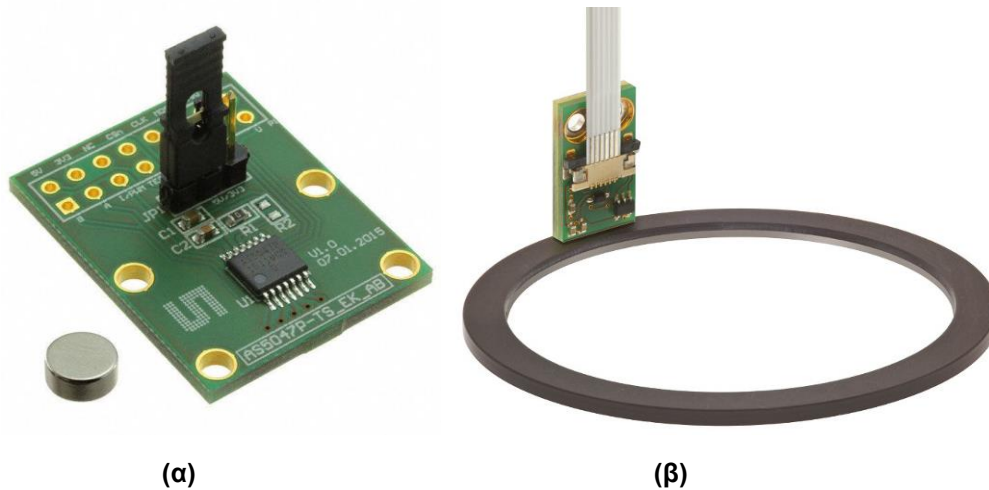
Προκειμένου να μεταδίδεται η ισχύς από τον επενεργητή στην πλανητική βαθμίδα μείωσης, κρίθηκε απαραίτητη η ενσωμάτωση του ήλιου στον ρότορα. Στο Σχήμα 4-6 παρουσιάζεται ο τρόπος σύνδεσης των δύο αυτών τεμαχίων. Συγκεκριμένα, ο ρότορας συνδέεται με τον ήλιο του πλανητικού συστήματος με σύνδεση μορφής και ελεύθερη συναρμογή. Στο συναρμολόγημα αυτό προστίθεται ένα εξάρτημα που αποτελεί προέκταση του ρότορα και επιτελεί δύο λειτουργίες. Εξασφαλίζει την διατήρηση της σύνδεσης μορφής ανάμεσα στον ρότορα και τον ήλιο, ενώ ταυτόχρονα φέρει στο σώμα του το ρουλεμάν 6701. Στο εξάρτημα αυτό βρίσκεται επίσης προσαρμοσμένος ο μαγνήτης του μαγνητικού αισθητήρα γωνίας (encoder), που θα χρησιμοποιείται για την ανάδραση της γωνιακής θέσης του ρότορα.



Σχήμα 4-6. Προσαρμογή του ήλιου στον ρότορα του κινητήρα.

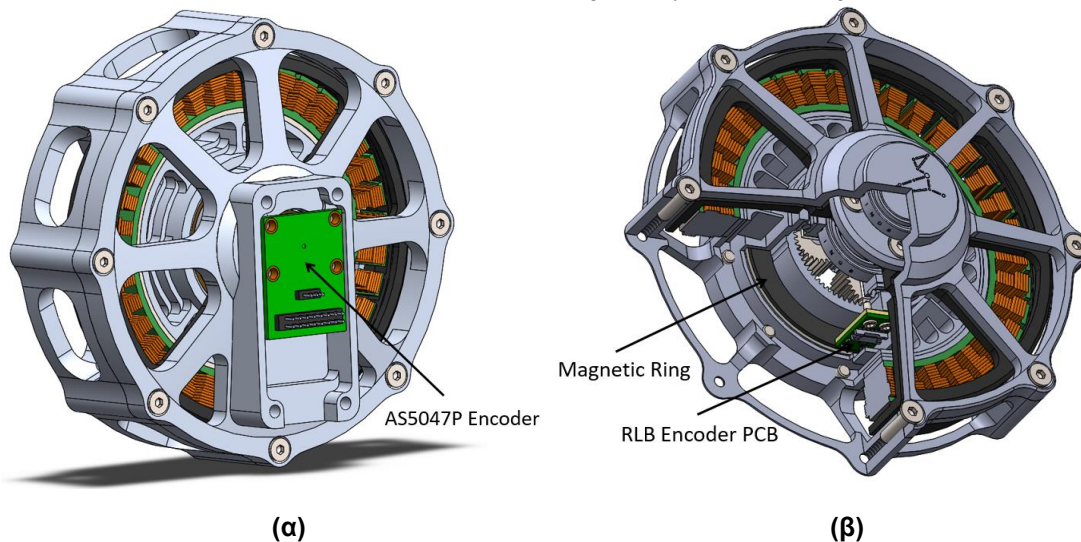
4.4 Ενσωμάτωση αισθητήρα μέτρησης γωνίας

Δεδομένου ότι είναι αναγκαία η ανάδραση γωνιακής θέσης και ταχύτητας του επενεργητή, κρίθηκε απαραίτητη η ενσωμάτωση κατάλληλου αισθητήρα γωνίας στην μονάδα. Επικρατέστερες επιλογές ήταν είτε η προσαρμογή ενός κλασικού μαγνητικού encoder, όπως ο AS5047P, είτε ενός δακτυλιοειδούς, όπως ο RLB, που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-7.



Σχήμα 4-7. (α) Ο κλασικός μαγνητικός encoder AS5047P, (β) Ο δακτυλιοειδής μαγνητικός encoder RLB.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των δύο αυτών τύπων encoder είναι το αρκετά μικρό τους μέγεθος. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ειδικά σε εφαρμογές όπου η εξοικονόμηση χώρου αποτελεί μείζον θέμα. Η βασική τους διαφορά είναι ότι οι κλασικοί encoders τοποθετούνται σε σειρά με το προς μέτρηση στρεφόμενο μέρος, ενώ οι δακτυλιοειδείς encoders τοποθετούνται παράλληλα με αυτό. Όπως διακρίνεται στο Σχήμα 4-8, η ενσωμάτωση δακτυλιοειδούς encoder αντί μαγνητικού, θα μείωνε αρκετά τον όγκο του συναρμολογήματος. Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι οι δακτυλιοειδείς encoders υπερτερούν έναντι των κλασικών σε θέματα ενσωμάτωσης και εξοικονόμησης όγκου.



Σχήμα 4-8. (α) Παράδειγμα έδρασης μαγνητικού encoder, (β) Παράδειγμα έδρασης δακτυλιοειδούς encoder.

Το βασικό μειονέκτημα των δακτυλιοειδών αισθητήρων είναι ότι έχουν μέγιστο όριο θερμοκρασίας λειτουργίας στους 85°C. Στον αντίποδα, οι κλασικοί μπορούν να εκτεθούν σε θερμοκρασίες που ανέρχονται ακόμα και στους 260°C. Για να ερμηνευθεί η αξία αυτού, αρκεί να ληφθεί υπ' όψιν ότι το άνω όριο θερμοκρασίας τυλιγμάτων του στάτη είναι περίπου 155°C. Με την μέτρηση της θερμοκρασίας στους αισθητήρες και με κατάλληλο έλεγχο ρεύματος, θα εξασφαλίζεται ότι τα τυλίγματα δεν θα εκτίθενται σε θερμοκρασίες άνω των 135°C, για λόγους ασφαλείας. Αυτό συνεπάγεται ότι το κέλυφος της μονάδας, με το οποίο θα βρίσκεται σε επαφή ο encoder, θα μπορεί να φτάσει ακόμα και τους 135°C. Δεδομένου ότι κάτι τέτοιο θα ήταν καταστροφικό για έναν δακτυλιοειδή encoder, στην δεδομένη φάση του σχεδιασμού επιλέχθηκε η ενσωμάτωση του μαγνητικού encoder AS5047P.

4.5 Σχεδιασμός του κελύφους της μονάδας επενέργειας

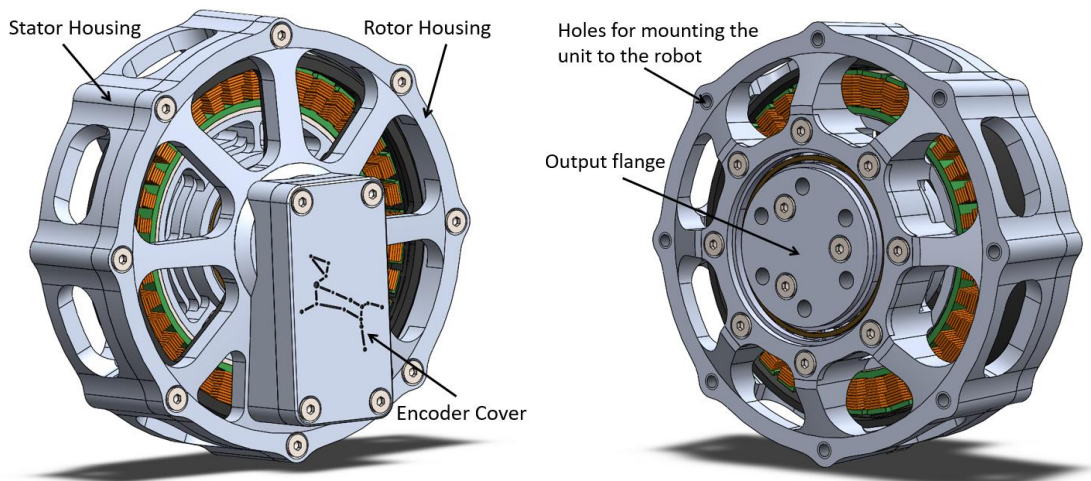
Προκειμένου να εδραστούν τα κύρια συστήματα και να συνεργάζονται αρμονικά μεταξύ τους, σχεδιάστηκε το κέλυφος της μονάδας επενέργειας. Αυτό αποτελείται από τρία βασικά εξαρτήματα, την έδραση του στάτη, την έδραση του ρότορα, καθώς και το κάλυμμα του αισθητήρα γωνίας (encoder), τα οποία διακρίνονται στο Σχήμα 4-9. Κατά την υλοποίηση, δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στην τήρηση των βασικών αρχών σχεδίασης που ορίστηκαν στην αρχή του κεφαλαίου.

Πιο συγκεκριμένα, κάθε μία εκ των τριών μονάδων επενέργειας φέρει καθορισμένες μηχανικές διεπαφές για την εύκολη ενσωμάτωσή της στην άρθρωση που θα επενεργεί. Στο σχέδιο έχουν διαμορφωθεί κατάλληλες οπές με σπείρωμα στην φλάντζα εξόδου για την πρόσδεση των κινούμενων μελών. Η μονάδα περιφερειακά φέρει αντίστοιχες οπές με σπείρωμα, ώστε να καθίσταται δυνατή η έδραση στο σώμα του ρομπότ ή σε οποιοδήποτε άλλο σταθερό σημείο της κατασκευής.

Ταυτόχρονα, υπήρξε μέριμνα ώστε να προσαρμοσθεί ο μαγνητικός αισθητήρας γωνίας (encoder). Επιπρόσθετα, στα τυλίγματα του στάτη είναι τοποθετημένοι αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας, ώστε να ελέγχεται κάθε στιγμή η θερμοκρασία των τυλιγμάτων. Με τον τρόπο αυτό προστατεύεται ο κινητήρας έναντι υπερθέρμανσης.

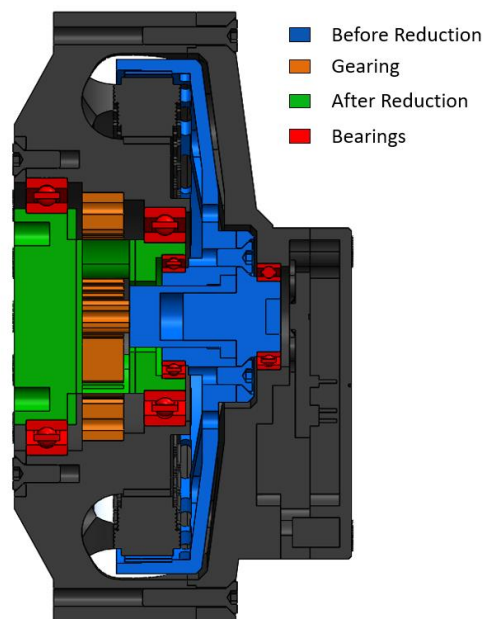
Επίσης, έγιναν οι κατάλληλες σχεδιαστικές επιλογές, ώστε να αυξηθεί τόσο η ευρωστία, όσο και η αξιοπιστία της μονάδας επενέργειας. Τα στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα μετάδοσης ισχύος, καθώς και τον αισθητήρα γωνίας βρίσκονται προστατευμένα εντός του κελύφους, ώστε να μην διατρέχουν κίνδυνο σε περίπτωση πτώσης. Ο σχεδιασμός προσαρμόστηκε με τρόπο ώστε να είναι εύκολη τόσο η διάγνωση τυχόν σφαλμάτων της μονάδας, όσο και η συντήρησή της. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκαν προσεκτικά οι συναρμογές και υπολογίσθηκαν οι κατάλληλες ανοχές σε κάθε τεμάχιο, ώστε να γίνεται εύκολα η συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση της κατασκευής.

Έπειτα από την κατανόηση των θερμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την λειτουργία ενός επενεργητή, ενσωματώθηκε η νέα γνώση στον κατάλληλο σχεδιασμό των μερών του επενεργητή. Βασικός στόχος είναι η διευκόλυνση της διέλευσης αέρα μέσα από το κυρίως σώμα της μονάδας επενέργειας, αλλά και η αύξηση της επιφάνειας ανταλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον για την διευκόλυνση του φαινομένου της συναγωγής. Στα δομικά εξαρτήματα που απαρτίζουν το σώμα της μονάδας έχουν διαμορφωθεί κατάλληλα ανοίγματα τόσο περιφερειακά, όσο και εγκάρσια, για τον σκοπό αυτό.



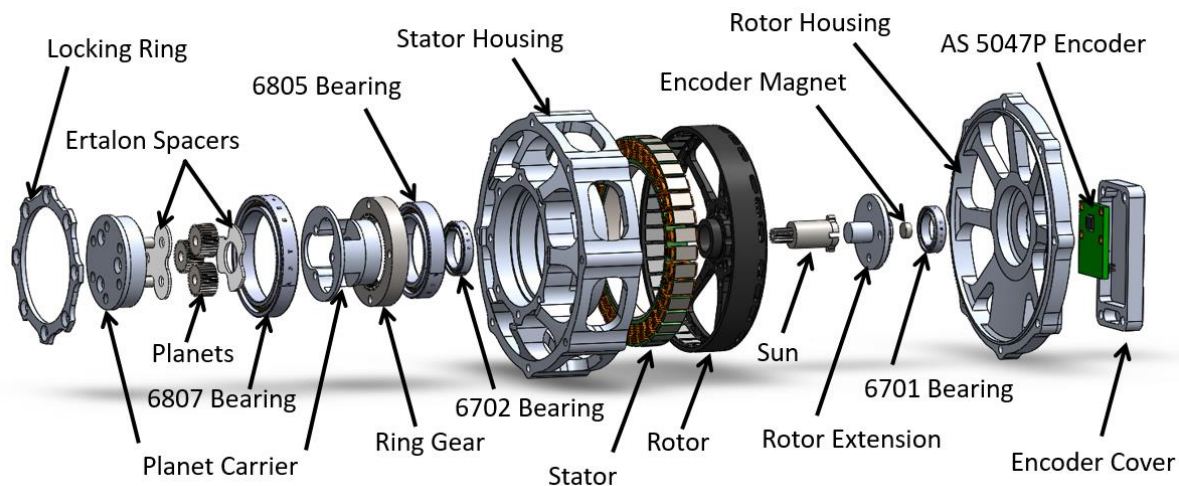
Σχήμα 4-9. Το κέλυφος της μονάδας επενέργησης.

Στο Σχήμα 4-10 που ακολουθεί παρουσιάζεται το πλήρες συναρμολόγημα της μονάδας επενέργησης σε τομή. Με μπλε χρώμα σκιαγραφείται το τμήμα υψηλών στροφών του επενεργητή πριν τη μείωση, με πορτοκαλί χρώμα τα δομικά μέρη του πλανητικού συστήματος, ενώ με πράσινο χρώμα διακρίνεται το μέρος που είναι μετά την βαθμίδα μείωσης και αποτελεί την έξοδο της μονάδας. Με κόκκινο χρώμα έχουν σκιαγραφηθεί τα ρουλεμάν της μονάδας, ενώ με μαύρο τονίζονται όλα τα σταθερά μέρη.



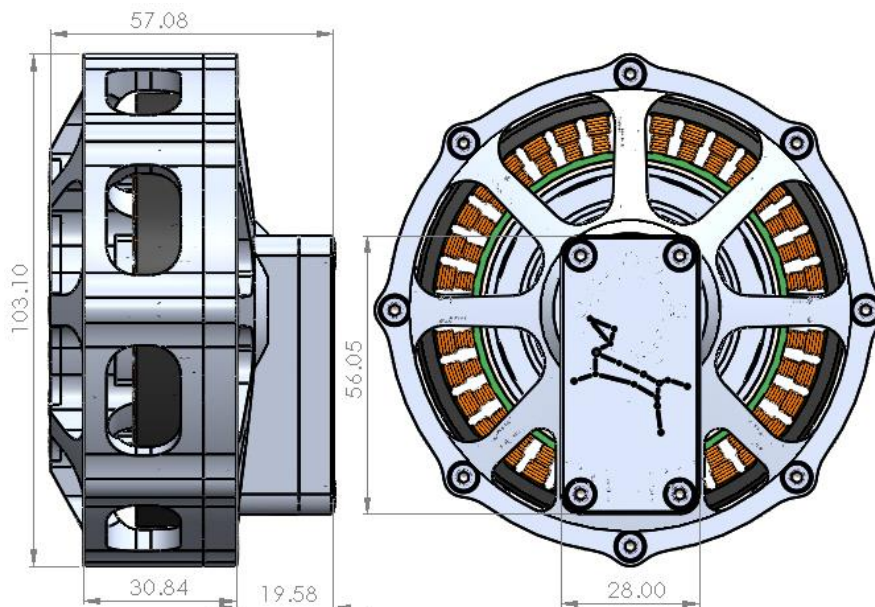
Σχήμα 4-10. Η μονάδα επενέργησης σε τομή.

Στο Σχήμα 4-11 παρουσιάζονται τα μέρη της μονάδας επενέργησης. Διακρίνονται τα επιμέρους στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα μείωσης, τα βασικά μέρη του κινητήρα T Motor U8 Lite KV100, καθώς και ο αισθητήρας μέτρησης γωνίας που ενσωματώθηκε στο σχέδιο. Όλα τα στοιχεία αυτά εδράζονται σε κατάλληλα σχεδιασμένα εξαρτήματα που αποτελούν το κέλυφος της μονάδας.



Σχήμα 4-11. Τα μέρη της μονάδας επενέργησης.

Για την καλύτερη κατανόηση του μεγέθους της μονάδας επενέργησης, στο Σχήμα 4-12 παρατίθενται δύο όψεις του συναρμολογήματος, όπου και σημειώνονται τα βασικά κατασκευαστικά μεγέθη. Το βάρος έκαστης μονάδας μαζί με τα ηλεκτρονικά και τους αισθητήρες ανέρχεται στα 750 g. Για την καλύτερη κατανόηση του μεγέθους αυτού, αξίζει να συγκριθεί με το βάρος της μονάδας επενέργησης του τετραπόδου Laelaps II, το οποίο ανερχόταν στα 1800 g. Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι με τον νέο σχεδιασμό, εκτός από την πληθώρα πλεονεκτημάτων που τονίσθηκαν, μειώνεται σημαντικά το βάρος της κατασκευής.



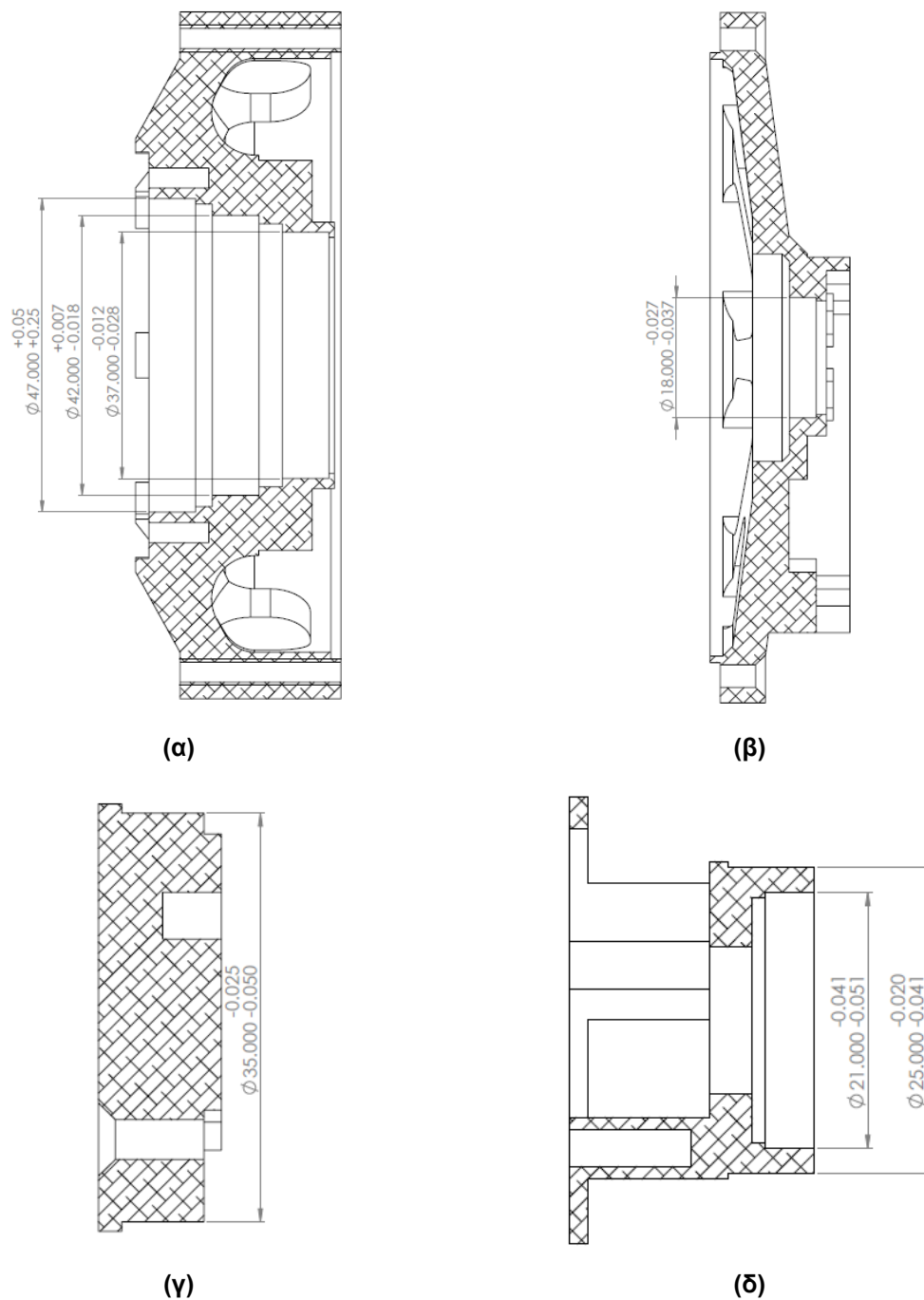
Σχήμα 4-12. Οι βασικές διαστάσεις της μονάδας επενέργησης.

Με γνώμονα την μεγιστοποίηση τη ευρωστίας και της αξιοπιστίας κατά τον σχεδιασμό της μονάδας επενέργησης, δόθηκε μεγάλη προσοχή στην επιλογή των κατάλληλων συναρμογών σε κάθε σημείο της κατασκευής. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίσθηκε όχι μόνο η σωστή συνεργασία ανάμεσα στα κινητά μέρη της κατασκευής, αλλά και ο εύκολος τρόπος συναρμολόγησης.

Όπως παρατηρήθηκε, ο παρόν σχεδιασμός ενσωματώνει αρκετά εξαρτήματα που επρόκειτο να αγοραστούν, όπως ρουλεμάν και γρανάζια. Συνεπώς, για τον σωστό

υπολογισμό των ανοχών στα εξαρτήματα που θα κατασκευασθούν, ήταν αναγκαίο να ληφθούν υπ' όψιν οι κλάσεις ανοχών των έτοιμων στοιχείων. Προκειμένου να υλοποιηθούν κατάλληλα οι σφικτές και ελεύθερες συναρμογές που ήταν άλλοτε βασικού άξονα και άλλοτε βασικού τρίμματος, υπολογίσθηκαν τα απαραίτητα πεδία ανοχών για τα εξαρτήματα όπου αυτό ήταν αναγκαίο. Τέτοια τεμάχια είναι η έδραση του στάτη και του ρότορα, καθώς και τα δύο μέρη του φορέα των γραναζιών.

Στο Σχήμα 4-13 παρακάτω, παρατίθενται τα πεδία ανοχών σε κάθε σημείο των εν λόγω τεμαχίων. Για λόγους διευκόλυνσης, τα τεμάχια παρουσιάζονται σε τομή.



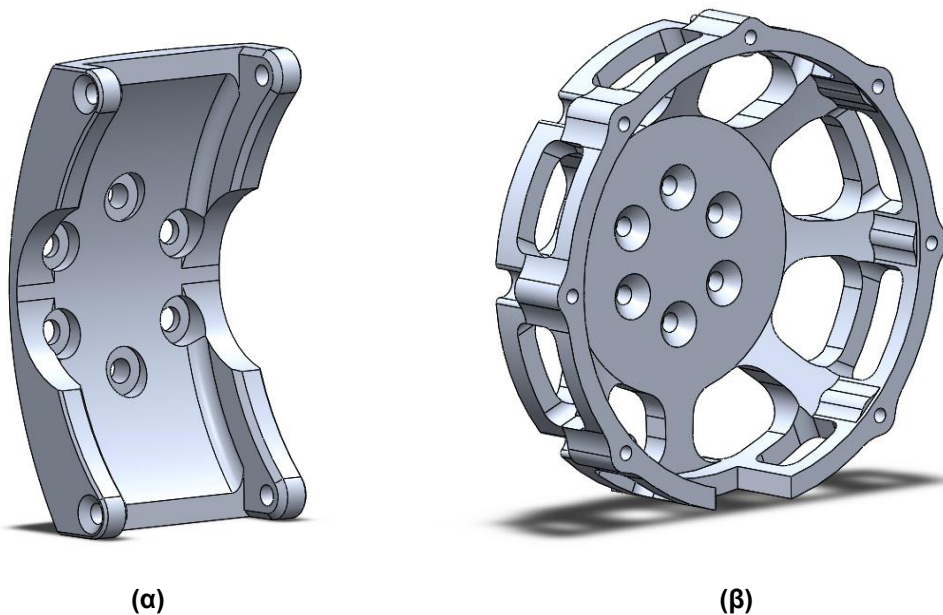
Σχήμα 4-13. Οι κατασκευαστικές ανοχές των τεμαχίων της μονάδας επενέργειας.

4.6 Σχεδιασμός ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας

Όπως τονίσθηκε, μια από τις βασικές σχεδιαστικές αρχές της μονάδας επενέργησης είναι η δυνατότητα εναλλαξιμότητας. Αυτό συνεπάγεται ότι η ίδια μονάδα επενέργησης θα είναι σε θέση να τοποθετηθεί σε κατάλληλα σημεία ενός ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας με την χρήση ελάχιστου αριθμού μηχανικών διεπαφών, προκειμένου να κινούνται τα αντίστοιχα μέλη. Στο σημείο αυτό θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο οι μονάδες αυτές συνδυάσθηκαν, ώστε να υλοποιηθεί το εν λόγω πόδι.

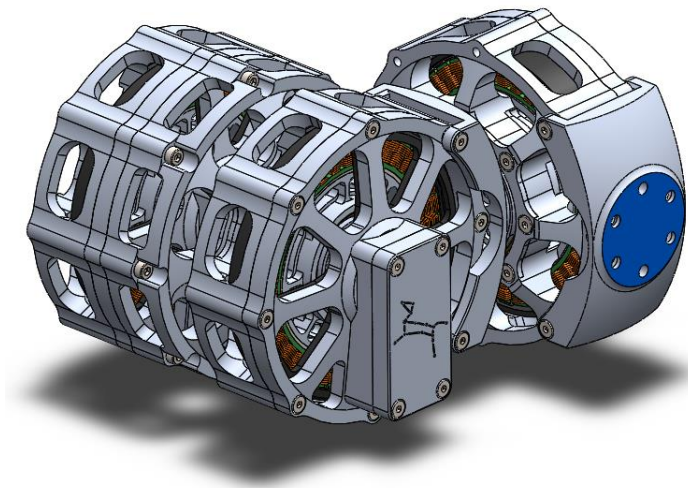
Στον παρόντα σχεδιασμό, επιλέχθηκε οι μονάδες να αποτελούν και δομικό μέρος ολόκληρης της κατασκευής του ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας. Συνεπώς, ήταν σκόπιμο να ευρεθεί κατάλληλος τρόπος ώστε να συνδεθούν τρεις όμοιες μονάδες επενέργησης μεταξύ τους. Για τον σκοπό αυτό, σχεδιάστηκαν δύο συνδετικά τεμάχια, τα οποία διακρίνονται στο Σχήμα 4-14. Το εξάρτημα (α) θα χρησιμοποιηθεί για την μηχανική σύνδεση της μονάδας απαγωγής και προσαγωγής του ισχίου (μονάδα 1) με την δεύτερη μονάδα κίνησης του ισχίου (μονάδα 2). Το εξάρτημα (β) θα χρησιμοποιηθεί για την μηχανική σύνδεση της δεύτερης μονάδας κίνησης του ισχίου (μονάδα 2) με την μονάδα επενέργησης του γονάτου (μονάδα 3). Το εξάρτημα (α) θα χρησιμοποιηθεί και για την πρόσδεση ολόκληρης της κατασκευής του ποδιού στο μελλοντικό σώμα του ρομπότ.

Όπως παρατηρείται, ο σχεδιασμός τους έγινε με βάση την γενική φιλοσοφία σχεδιασμού των επενεργητών. Τα τεμάχια αυτά είναι σχεδιασμένα με τρόπο ώστε να είναι εύκολη η διέλευση αέρα για την ψύξη των επενεργητών.



Σχήμα 4-14. (α) Το συνδετικό τεμάχιο ανάμεσα στις μονάδες 1 και 2. (β) Το συνδετικό τεμάχιο ανάμεσα στις μονάδες 2 και 3.

Κάνοντας χρήση των τεμαχίων αυτών, υλοποιείται η σύνδεση των τριών μονάδων μεταξύ τους, καταλήγοντας στο συναρμολόγημα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-15, παρακάτω. Στην εικόνα αυτή διακρίνονται από τα δεξιά προς τα αριστερά κατά σειρά οι μονάδες επενέργησης 1, 2 και 3, ενώ το σημείο που είναι σκιαγραφημένο με μπλε χρώμα είναι το σημείο όπου θα συνδέεται μηχανικά το πόδι πάνω στο μελλοντικό σώμα του ρομπότ.



Σχήμα 4-15. Το συναρμολόγημα των τριών μονάδων επενέργηση.

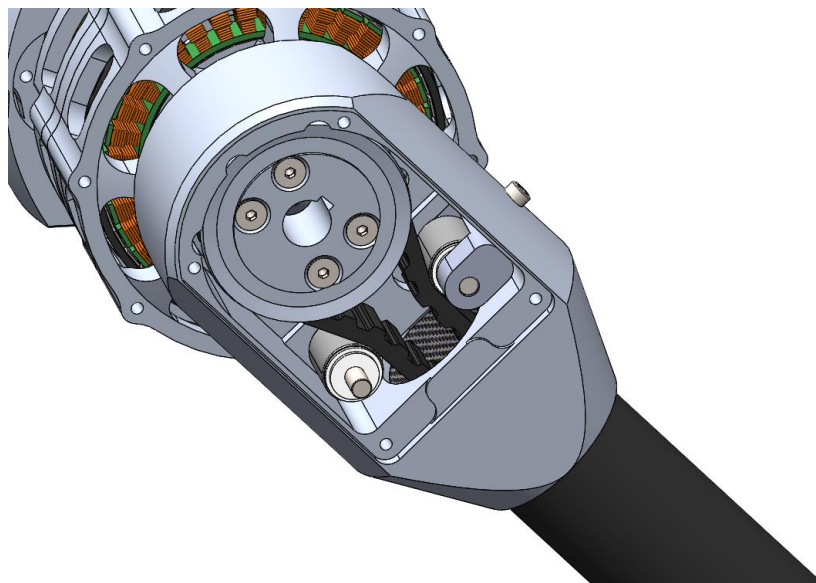
Έχοντας ως βάση το συναρμολόγημα που μόλις εξετάσθηκε, στην συνέχεια προστέθηκε το σχέδιο του υπόλοιπου ποδιού του ρομπότ, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-16 παρακάτω. Κατά τον σχεδιασμό του εν λόγω ποδιού, κρίθηκε σκόπιμο να διατηρηθεί η γενικότερη δομή και η φιλοσοφία που υιοθετήθηκε και στο πόδι του τετραπόδου Laelaps II, λόγω της πληθώρας των πλεονεκτημάτων του. Πιο συγκεκριμένα, ως βασικά στοιχεία των μελών χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες από ανθρακόνημα, με σκοπό να επιτευχθεί μέγιστη αντοχή των μελών του ποδιού και ελαχιστοποίηση του βάρους. Στα άκρα του κάθε μέλους σχεδιάστηκαν κατάλληλα άκρα από αλουμίνιο 7075 υψηλής αντοχής. Δεδομένου ότι το πόδι αυτό θα υπόκειται σε μεγάλες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις, δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στην εξοικονόμηση βάρους στα άκρα έκαστου μέλους. Με τον τρόπο αυτό, ελαχιστοποιήθηκε κατά το δυνατόν η ροπή αδράνειας του ποδιού. Τα τεμάχια από αλουμίνιο θα πακτώνονται εσωτερικά του σωλήνα carbon με την χρήση ειδικής εποξειδικής κόλλας δύο συστατικών.



Σχήμα 4-16. Ενσωμάτωση του ποδιού στο συναρμολόγημα των τριών μονάδων επενέργησης.

Αναφορικά με την άρθρωση του γονάτου, δόθηκε μεγάλη σημασία στην μεγιστοποίηση του εύρους κίνησής της. Στην παρούσα υλοποίηση του ποδιού επιλέχθηκε η μετάδοση κίνησης από την μονάδα 3 στο γόνατο να υλοποιηθεί με χρήση ιμάντα και ζεύγους τροχαλιών. Ταυτόχρονα, τα εξαρτήματα που απαρτίζουν την άρθρωση αυτή σχεδιάστηκαν με αρκετά μεγάλη προσοχή, ώστε να μεγιστοποιούνται οι δυνατότητες κίνησης. Η τροχαλία που επιλέχθηκε είναι της σειράς S8M και πλάτους 15 mm, σε συνδυασμό με τον αντίστοιχο ιμάντα MTS8M, διότι βρέθηκε ότι είναι η μικρότερη σε μέγεθος και όγκο που αντέχει να μεταφέρει ροπή 30 Nm που είναι η μέγιστη ροπή που θα αναπτυχθεί από τον επενεργητή 3 με βάση τις προδιαγραφές του κινητήρα και του μειωτήρα.

Κατά τον σχεδιασμό του προαναφερθέντος συστήματος μετάδοσης κίνησης, επιλέχθηκε ο ιμάντας να διέρχεται εντός του σωλήνα ανθρακονήματος, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 4-17. Με την σχεδιαστική αυτή λύση, όχι μόνο υλοποιείται πιο κομψός σχεδιασμός του συστήματος, αλλά ταυτόχρονα ο ιμάντας είναι προστατευμένος έναντι εισχώρησης ανεπιθύμητων σωμάτων στην τροχιά του. Δεδομένου ότι ο ιμάντας πρέπει να διέρχεται από το στενό εσωτερικό τμήμα του ανθρακονήματος, κρίθηκε αναγκαία η ύπαρξη σημείων ολίσθησης αυτού. Ως πλέον κατάλληλα για την εφαρμογή αυτή κρίθηκαν τα βελονοειδή ρουλεμάν NKI 5/16 TN. Για την επίτευξη της τάνισης του ιμάντα, το ένα εκ των τεσσάρων ρουλεμάν τοποθετήθηκε σε κινούμενο φορείο. Με την σύσφιξη κατάλληλου ακέφαλου κοχλία επιτυγχάνεται η τάνιση του ιμάντα.



Σχήμα 4-17. Οδήγηση του ιμάντα εντός του σωλήνα ανθρακονήματος.

4.7 Αναλύσεις δυνάμεων στα στοιχεία των μονάδων επενέργησης

Έπειτα από την υλοποίηση του σχεδιασμού του ποδιού, είναι δυνατή η πρόβλεψη του βάρους που θα έχει το μελλοντικό ρομπότ που θα φέρει το εν λόγω πόδι. Με βάση τον παρόντα σχεδιασμό, το κάθε πόδι ζυγίζει περίπου 3 kg. Δεδομένου ότι ένα τελικό τετράποδο ρομπότ θα φέρει τέσσερα τέτοια πόδια, το βάρος των μονάδων επενέργησης μαζί με τα πόδια θα ανέρχεται στα 12 kg. Προκειμένου να γίνει κατάλληλη πρόβλεψη για την μελλοντική ενσωμάτωση μπαταριών, ηλεκτρονικών, κάμερών και άλλων στοιχείων, τότε θα γίνει η παραδοχή ότι το βάρος του ρομπότ θα ανέλθει στα 20 kg. Επομένως, οι υπολογισμοί καταπονήσεων θα γίνουν με βάση αυτό το μέγεθος.

Από προηγούμενη έρευνα που έχει γίνει αναφορικά με τις καταπονήσεις των ποδιών σε ρομποτικές διατάξεις, βρέθηκε ότι η μέγιστη φόρτιση που θα λαμβάνει το πόδι θα είναι κατά την περίπτωση όπου το ρομπότ πέσει βίαια στο έδαφος. Στην περίπτωση αυτή το φορτίο στιγμιαία θα καταπονήσει μόνο ένα από τα τέσσερα πόδια, ενώ θα ανέλθει σε μια τιμή που θα είναι περίπου τρεις φορές το βάρος του ρομπότ. Αυτό σημαίνει, ότι εφόσον το σώμα ζυγίζει 20 kg, και άρα το βάρος του είναι 200 N, τότε το φορτίο που θα καταπονήσει στιγμιαία το πόδι θα είναι 600 N. Επομένως, έγινε η υπόθεση ότι κατά την εφαρμογή του φορτίου αυτού, όλα τα δομικά μέρη της κατασκευής θα καταπονηθούν στιγμιαία με το κατακόρυφο φορτίο αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-18. Όλες οι αρθρώσεις θα καταπονηθούν με ροπή μέγιστου μεγέθους 30 Nm κατά την φορά περιστροφής τους, που είναι και η μεγαλύτερη ροπή που μπορεί να μεταφέρει ο επενεργητής. Αν εμφανισθούν ροπές μεγαλύτερες από την τιμή αυτή, τότε πρακτικά οι αντίστοιχες αρθρώσεις θα κινηθούν.



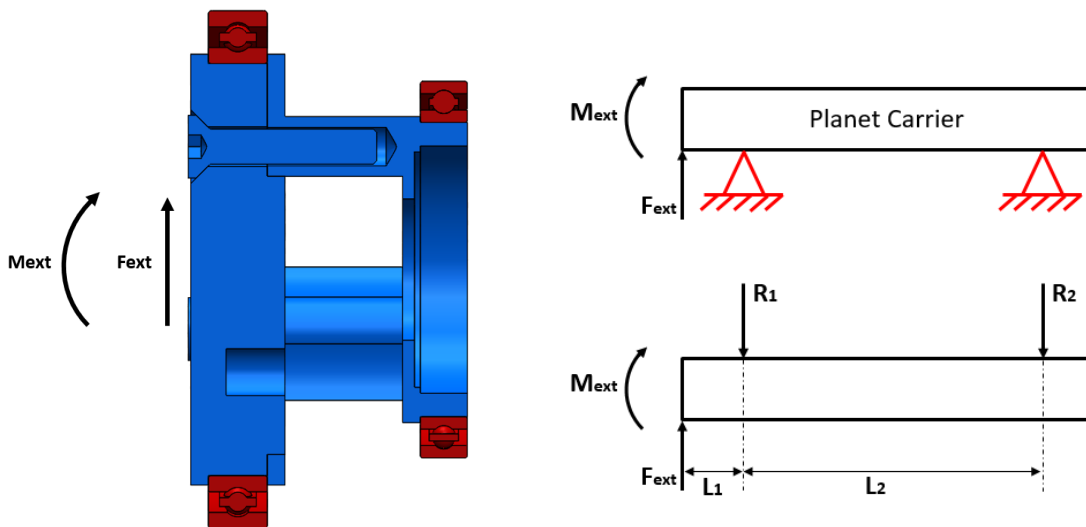
Σχήμα 4-18. Κρουστική φόρτιση του ποδιού κατά την πτώση στο έδαφος.

Με αυτή τη μέθοδο ξεχωρίστηκαν τα επιμέρους στοιχεία που χρήζουν ελέγχου. Η κατακόρυφη δύναμη που θα ασκείται σε αυτά θα ισούται με τα 600 N, ενώ οι ροπές θα εξαρτώνται από τον μοχλοβραχίονα της δύναμης ως προς κάθε στοιχείο. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντίστοιχες αναλύσεις που έγιναν σε κάθε στοιχείο ξεχωριστά.

4.7.1 Ανάλυση δυνάμεων στα ρουλεμάν

Τα στοιχεία που μελετήθηκαν αρχικά ως τα πιο ευπαθή είναι τα ρουλεμάν που θα χρησιμοποιηθούν στο σύστημα μετάδοσης της κάθε μονάδας επενέργησης. Κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθούν πρώτα, διότι κάθε αλλαγή στα μεγέθη τους θα οδηγούσε σε αλλαγή και στην υπόλοιπη δομή του επενεργητή. Τα ρουλεμάν θεωρούνται ότι είναι πακτωμένα εσωτερικά στον φορέα τους και εξωτερικά στην έδραση του στάτη. Στο Σχήμα 4-19, αποτυπώνεται ο φορέας των γραναζιών με μπλε χρώμα και τα ρουλεμάν με κόκκινο, ενώ η έδραση του στάτη παραλείπεται για αποφυγή τυχόν παρερμηνειών. Στην παρούσα ανάλυση θεωρείται ο φορέας των γραναζιών ως απαραμόρφωτο σώμα που καταπονείται από μια ροπή και μια κατακόρυφη

δύναμη. Με βάση το Διάγραμμα Ελευθέρου Σώματος, υπολογίζονται οι αντιδράσεις στήριξης R_1 και R_2 που καταπονούν τα ρουλεμάν 6807 και 6805, αντίστοιχα.



Σχήμα 4-19. Το Διάγραμμα Ελευθέρου Σώματος του φορέα των γραναζιών.

Αναφορικά με την κατακόρυφη δύναμη F_{ext} , εκείνη θα είναι ίση με 600 N, ενώ η ροπή M_{ext} θα εξαρτάται από την απόσταση του φορέα έκαστου Unit από το σημείο εφαρμογής της δύναμης. Έπειτα από διερεύνηση, η μέγιστη ροπή αυτή θα εμφανίζεται στην μονάδα 2 και θα είναι ίση με 50,4 Nm. Επομένως, σχηματίζονται οι εξισώσεις (4-1).

$$\begin{cases} \sum F_z = 0 \\ \sum M = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} -R_1 - R_2 + F_{ext} = 0 \\ -R_2 * l_2 - F_{ext} * l_1 - M_{ext} = 0 \end{cases} \quad (0-21)$$

Οι εξισώσεις θα ανασχηματισθούν στην μορφή ακόλουθη μορφή, όπου R_1 και R_2 είναι οι αντιδράσεις στήριξης.

$$0 = \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 0 & -l_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{ext} \\ -F_{ext} * l_1 - M_{ext} \end{pmatrix} \quad (0-22)$$

Για $M_{ext} = 50,4 \text{ Nm}$, $F_{ext} = 600 \text{ N}$, $l_1 = 0,005 \text{ m}$, και $l_2 = 0,02 \text{ m}$, από την Εξ.(4-2) προκύπτει:

$$0 = \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 0 & -0,02 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 600 \\ -600 * 0,005 - 50,4 \end{pmatrix} \quad (0-23)$$

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3270 \text{ N} \\ -2670 \text{ N} \end{pmatrix} \quad (0-24)$$

Δεδομένου ότι στα σημεία με αντιδράσεις στήριξης R_1 και R_2 έχουν τοποθετηθεί με βάση το σχέδιό τα ρουλεμάν 6807 και 6805, αντίστοιχα, σύμφωνα με τον κατασκευαστή τους, αυτά έχουν Dynamic Load Rating (Cr) ίσο με:

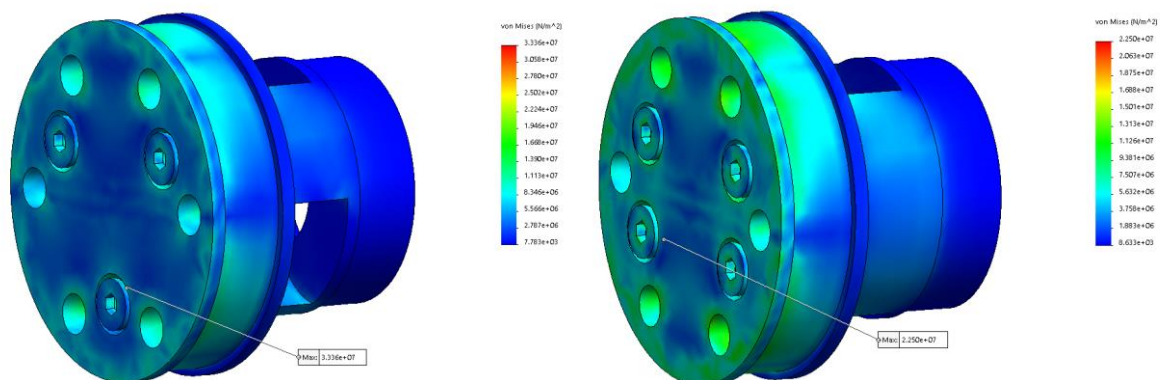
$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4729 \text{ N} \\ 4303 \text{ N} \end{pmatrix} \quad (0-25)$$

Συγκρίνοντας τα μεγέθη αυτά με τα φορτία που υπολογίσθηκαν παραπάνω στην Εξ.(4-4), συμπεραίνεται ότι το συναρμολόγημα της μονάδας είναι ασφαλές με την επιλογή των ρουλεμάν.

4.7.2 Ανάλυση δυνάμεων στον φορέα των πλανητών

Έχοντας εξασφαλίσει την ασφαλή λειτουργία των ρουλεμάν, είναι χρήσιμο να ελεγχθεί και η αντοχή του φορέα των γραναζιών, ο οποίος προηγουμένως θεωρήθηκε ως απαραμόρφωτος για χάρη απλοποίησης. Σε αντιστοιχία με όσα εξετάσθηκαν πριν, η μέγιστη ροπή M_{ext} που θα καταπονεί τον φορέα θα εμφανισθεί στο Unit 2 και θα ισούται με 50,4 Nm και η κατακόρυφη δύναμη F_{ext} θα ισούται με 600 N.

Όπως αναφέρθηκε κατά την παρουσίαση του σχεδίου του κάθε επενεργητή, ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν τις μονάδες επενέργησης είναι ότι έχουν την δυνατότητα της εναλλαξιμότητας. Με άλλα λόγια, ένας επενεργητής μπορεί να τοποθετηθεί στη θέση του άλλο, εάν αυτό κριθεί σκόπιμο. Επομένως, δεδομένου ότι ο φορέας στους επενεργητές που έχουν μείωση 1:10 (ισχίου και γονάτου) παρουσιάζει κάποιες μικρές διαφορές σε σχέση με τον φορέα του επενεργητή με μείωση 1:7 (απαγωγής/ προσαγωγή), κρίθηκε σκόπιμο να ελεγχθούν και οι δύο φορείς. Στο Σχήμα 4-20 παρακάτω παρουσιάζονται αποτελέσματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA) τόσο στον φορέα της μείωσης 7:1 (α), όσο και στον φορέα μείωσης 10:1 (β). Το συμπέρασμα από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, είναι ότι οι φορείς αντέχουν τις καταπονήσεις που ορίσθηκαν.

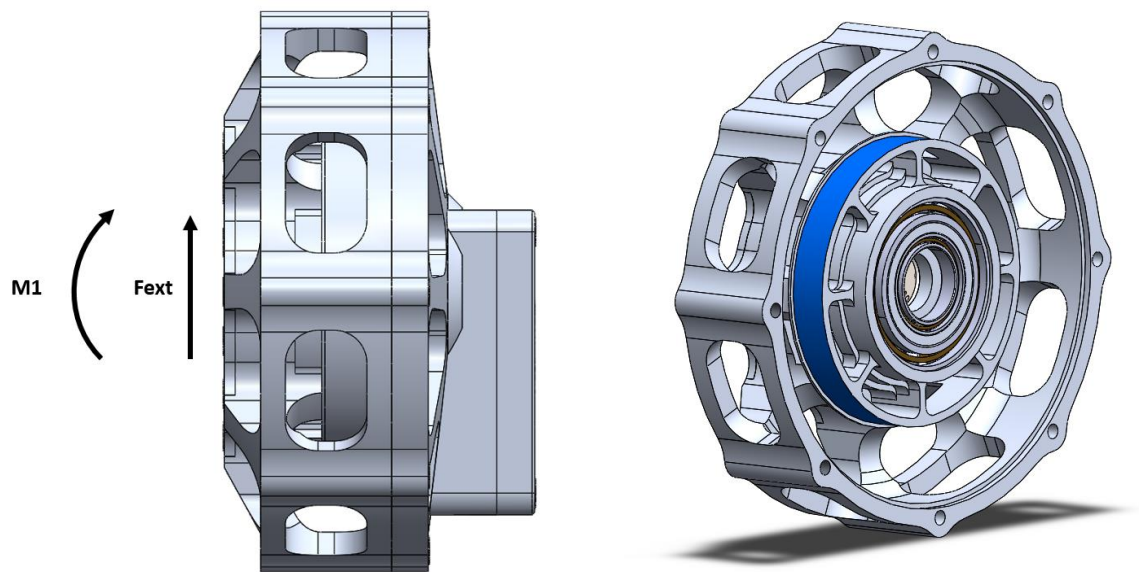


Σχήμα 4-20. Ανάλυση δυνάμεων με χρήση FEA (α) Στον φορέα των γραναζιών μείωσης 7:1. (β) Στον φορέα των γραναζιών μείωσης 10:1.

4.7.3 Ανάλυση στο κέλυφος

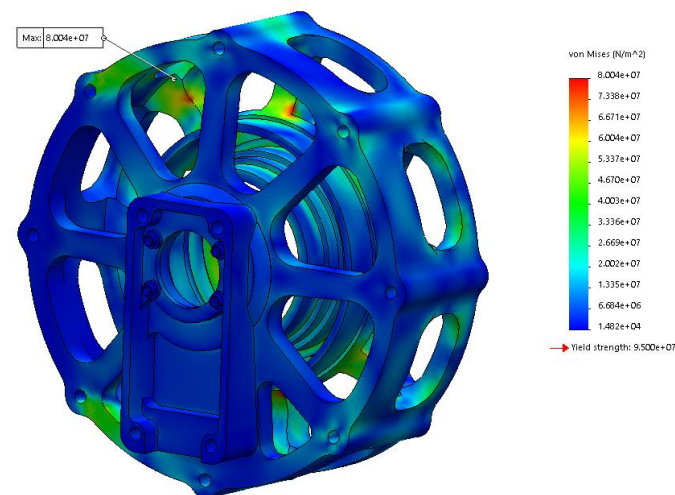
Έχοντας αναλύσει τα εσωτερικά στοιχεία έκαστου επενεργητή, ακολούθως θα ελεγχθούν και τα στοιχεία που αποτελούν το κέλυφος της μονάδας επενέργησης, που είναι το συναρμολόγημα της έδρασης του στάτη και της έδρασης του ρότορα. Όμοια με πριν, το συναρμολόγημα θα καταπονείται από μια εξωτερική δύναμη F_{ext} που θα ισούται με 600 N και από μια ροπή M_1 , όπως διακρίνεται στο Σχήμα 4-21 παρακάτω, η οποία θα εξαρτάται από την απόσταση του επενεργητή από το σημείο εφαρμογής της εξωτερικής δύναμης στο πόδι. Η ροπή M_1 θα λαμβάνει μέγιστη τιμή στην περίπτωση του επενεργητή 1, όπου και θα ισούται με 46,2 Nm. Ταυτόχρονα με τις άλλες δύο καταπονήσεις, η έδραση του στάτη θα υπόκειται και σε στρεπτική καταπόνηση από μια ροπή M_2 που θα εφαρμόζεται στο σημείο που εδράζεται

ο στάτης του κινητήρα ως προς τον άξονα της μονάδας και θα ισούται με 3 Nm, όση είναι περίπου η μέγιστη ροπή που μπορεί να προσφέρει ο κινητήρας με βάση τον κατασκευαστή.



Σχήμα 4-21. Τα φορτία που ασκούνται στο κέλυφος της μονάδας επενέργησης.

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-22, το κέλυφος του επενεργητή είναι και αυτό ασφαλές για τις καταπονήσεις που θεωρήθηκαν, καθώς η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του αλουμινίου 7075, που επιλέχθηκε για την εν λόγω κατασκευή.

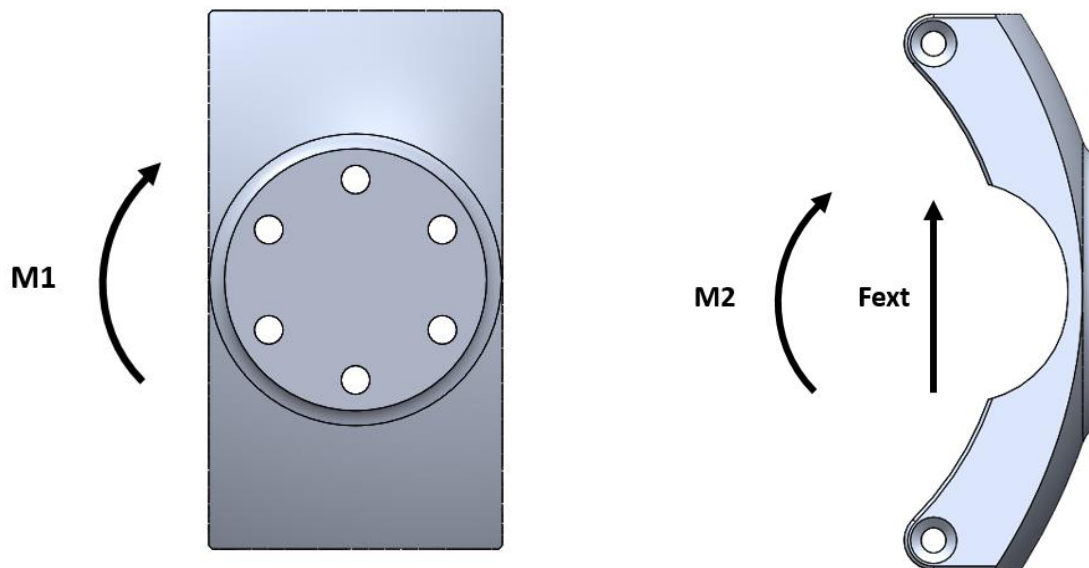


Σχήμα 4-22. Ανάλυση δυνάμεων με χρήση FEA στο κέλυφος του επενεργητή.

4.7.4 Ανάλυση στα συνδετικά τεμάχια ανάμεσα στις μονάδες

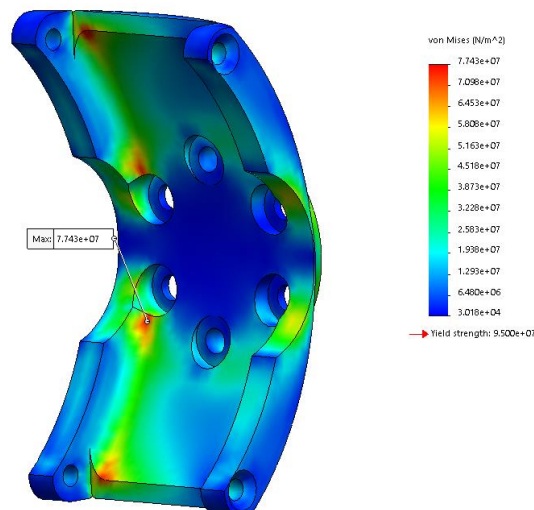
Τα τελευταία τεμάχια που χρήζουν ελέγχου αντοχής είναι τα τεμάχια που θα συνδέουν τις μονάδες τόσο μεταξύ τους, όσο και με το υπόλοιπο σώμα του ρομπότ. Αναφορικά με το εξάρτημα που θα τοποθετηθεί στην σύνδεση του σώματος του ρομπότ με την μονάδα 1, αλλά και στην σύνδεση των μονάδων 1 και 2, υπολογίστηκε ότι αυτό θα λάβει μέγιστες τιμές καταπόνησης όταν βρίσκεται στο σημείο ένωσης του σώματος του ρομπότ με την μονάδα

επενέργησης 1. Στην περίπτωση αυτή, θα εφαρμοσθούν σε αυτό μια ροπή M_1 ίση με 45 Nm, ταυτόχρονα με μια ροπή M_2 ίση με 30 Nm και μια δύναμη F_{ext} ίση με 600 N, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4-23 παρακάτω.



Σχήμα 4-23. Τα φορτία που ασκούνται στο εξάρτημα σύνδεσης της μονάδας 1 με το μελλοντικό σώμα του ρομπότ.

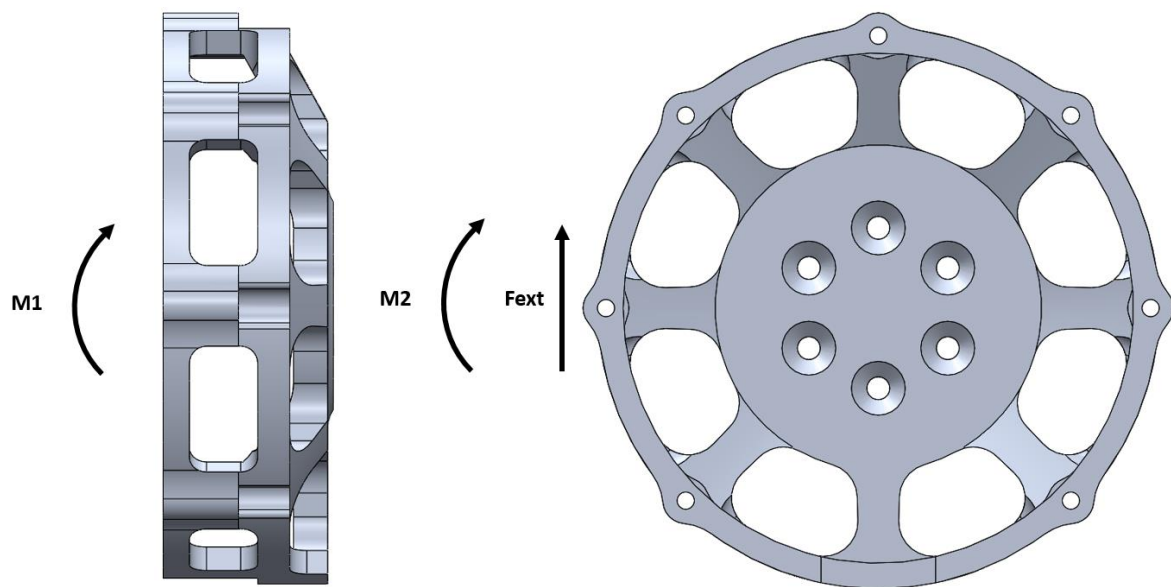
Από τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν με την χρήση προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA), συμπεραίνεται ότι το εξάρτημα αυτό αντέχει με επιτυχία την καταπόνηση στις δυνάμεις που τέθηκαν προηγουμένως, όπως διακρίνεται από στο Σχήμα 4-24.



Σχήμα 4-24. Ανάλυση δυνάμεων με χρήση FEA στο εξάρτημα σύνδεσης της μονάδας 1 με το μελλοντικό σώμα του ρομπότ.

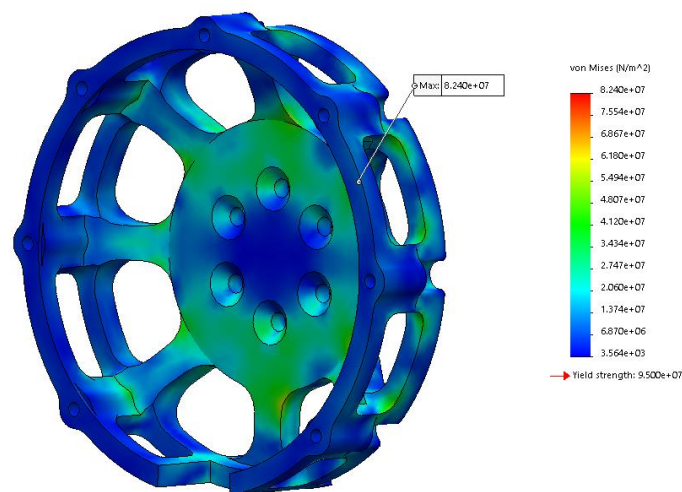
Με όποιο τρόπο εξετάζεται και το εξάρτημα που συνδέει την μονάδα 2 με την μονάδα 3, το οποίο κατά την μία διεύθυνση θα υποβάλλεται σε φόρτιση με ροπή M_1 ίση με 28,2 Nm,

όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-25, ενώ κατά την άλλη διεύθυνση θα καταπονείται με ροπή M_2 ίση με 30 Nm και με κατακόρυφη δύναμη F_{ext} ίση με 600 N.



Σχήμα 4-25. Τα φορτία που ασκούνται στο εξάρτημα σύνδεσης της μονάδας 2 με την μονάδα 3.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης, στο Σχήμα 4-26, κρίνεται ότι το τεμάχιο περνάει με επιτυχία τον έλεγχο σε αντοχή στα σενάρια φόρτισης που τέθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 4-26. Ανάλυση δυνάμεων με χρήση FEA στο εξάρτημα σύνδεσης της μονάδας 2 με την μονάδα 3.

5 Υλοποίηση ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας

5.1 Κατασκευή των μονάδων επενέργειας

Στο σημείο αυτό θα παρουσιασθεί η πορεία και τα βήματα που ακολουθήθηκαν ώστε να υλοποιηθεί το τελικό συναρμολόγημα για έκαστη εκ των τριών μονάδων επενέργειας. Αξίζει να τονισθεί ότι όλες οι κατεργασίες των τεμαχίων πραγματοποιήθηκαν εντός του μηχανουργείου του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου Ε.Μ.Π. Ως βασική εργαλειομηχανή χρησιμοποιήθηκε το κέντρο κατεργασιών τριών αξόνων Haas Mini Mill. Βοηθητικό ρόλο στην επεξεργασία των τεμαχίων διαδραμάτισαν και άλλες συμβατικές εργαλειομηχανές, όπως ο τόννος και το φρεζοδράπανο, που βρίσκονται εγκατεστημένα στο μηχανουργείο.

5.1.1 Το σύστημα μετατροπής ισχύος του επενεργητή

Ένα από τα πλέον βασικότερα τμήματα του επενεργητή είναι το σύστημα μετατροπής ισχύος που αποτελείται από δύο βασικά μέρη, τα συστήματα πριν και μετά την βαθμίδα μείωσης. Το πρώτο συναρμολόγημα που θα εξετασθεί είναι αυτό που παρουσιάζεται στο . Απαρτίζεται κυρίως από τον ρότορα του επενεργητή T Motor U8 Lite KV100 και τον ήλιο του συστήματος μείωσης. Για την συγκράτηση του ήλιου εντός του ρότορα κατασκευάσθηκε συνδεδετικό τεμάχιο, που συνδέεται με κοχλίες πάνω στο σώμα του ρότορα. Στην εμπρόσθια μεριά του τεμαχίου έχει τοποθετηθεί ο μαγνήτης του αισθητήρα γωνιακής θέσης.



Σχήμα 5-1. Το συναρμολόγημα του ρότορα με τον ήλιο του συστήματος μείωσης.

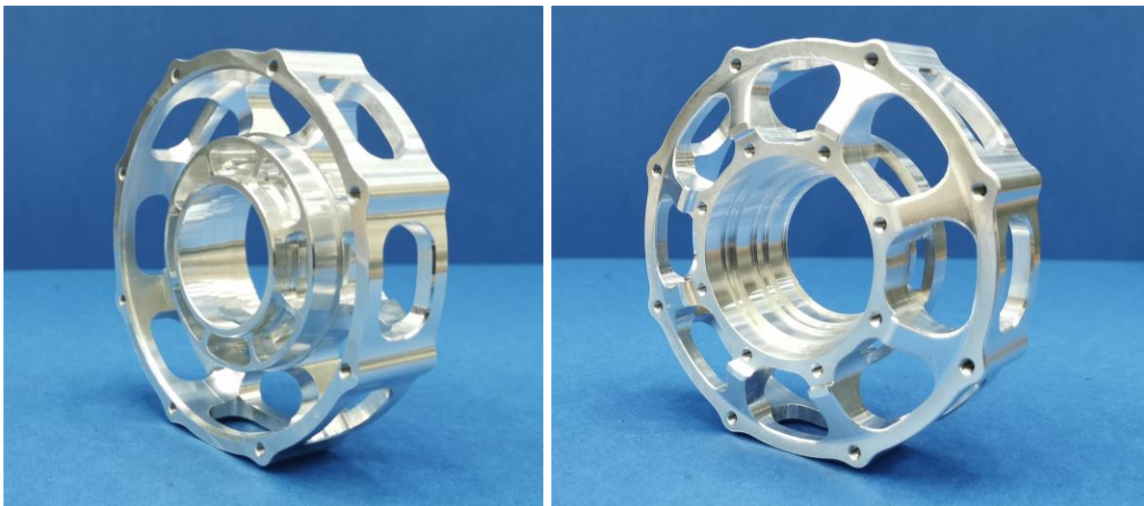
Το δεύτερο βασικό μέρος του συστήματος μετατροπής ισχύος είναι το συναρμολόγημα των πλανητών της βαθμίδας μείωσης μαζί τον αντίστοιχο φορέα τους. Ο φορέας επιτελεί τον ρόλο της εξόδου της μονάδας επενέργειας. Η ύπαρξη οπών με σπείρωμα στην ίσια πλευρά του, σχηματίζει κατάλληλες μηχανικές διεπαφές για την πρόσδεση φορτίου στην φλάντζα εξόδου της μονάδας. Αποτελείται από δύο επιμέρους τμήματα, τα οποία συνδέονται με κοχλίες, όπως παρουσιάζεται στο . Στο σώμα του βρίσκονται προσαρμοσμένα με τα ρουλεμάν 6807 και 6702.



Σχήμα 5-2. Το συναρμολόγημα των πλανητών του συστήματος μείωσης με τον φορέα τους.

5.1.2 Οι εδράσεις του στάτη και του ρότορα

Ένα από τα βασικότερα εξαρτήματα της μονάδας επενέργειας είναι η έδραση του στάτη που αποτελεί και τμήμα του κελύφους της μονάδας. Το εξάρτημα που παρουσιάζεται στο αποτέλεσμα κατασκευαστική πρόκληση. Ο λόγος δεν είναι μόνο η ιδιαίτερη μορφή του. Δεδομένου ότι πάνω του εδράζονται αρκετά επιμέρους εξαρτήματα πέραν του ρότορα, ήταν αναγκαία η τήρηση πολλών και αυστηρών ανοχών σε διάφορα σημεία του. Στον σχεδιασμό του εν λόγω τεμαχίου παρατηρείται έντονα η προσπάθεια επίτευξης βέλτιστων συνθηκών ψύξης του στάτη, που θα εδράζεται σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα, έχουν διαμορφωθεί κατάλληλα ανοίγματα τόσο περιφερειακά, όσο και στο κέντρο, ώστε να διευκολύνεται η διέλευση του αέρα για την απαγωγή θερμότητας από τα τυλίγματα.

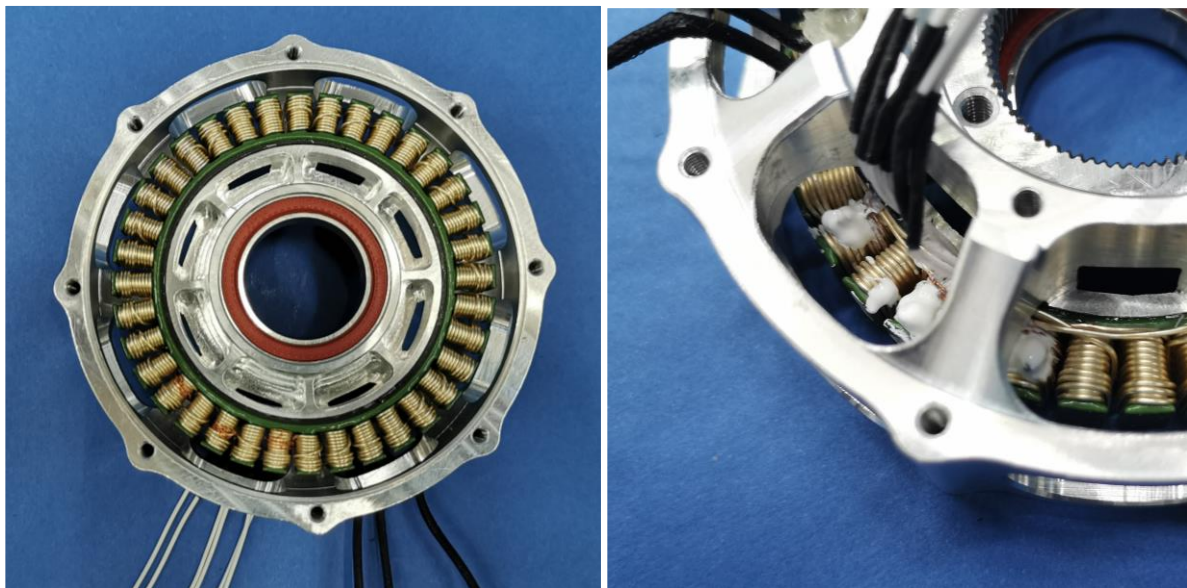


Σχήμα 5-3. Η έδραση του στάτη.

Στην εμπρόσθια μεριά της έδρασης αυτής τοποθετήθηκε ο στάτης του κινητήρα, και συγκολλήθηκε με την χρήση του προϊόντος Loctite 638, όπως ενδείκνυται σε τέτοιες περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, σε εφαρμογές όπου εδράζεται στάτης σε έδρανο, προτείνεται ύπαρξη ελεύθερης συναρμογής και χρήση ειδικού συγκολλητικού, όπως το παραπάνω. Στην

περίπτωση όπου ανάμεσά τους υπήρχε σφικτή συναρμογή, ο στάτης θα δεχόταν μηχανικές τάσεις, οι οποίες και θα τον παραμόρφωναν ανεπιθύμητα.

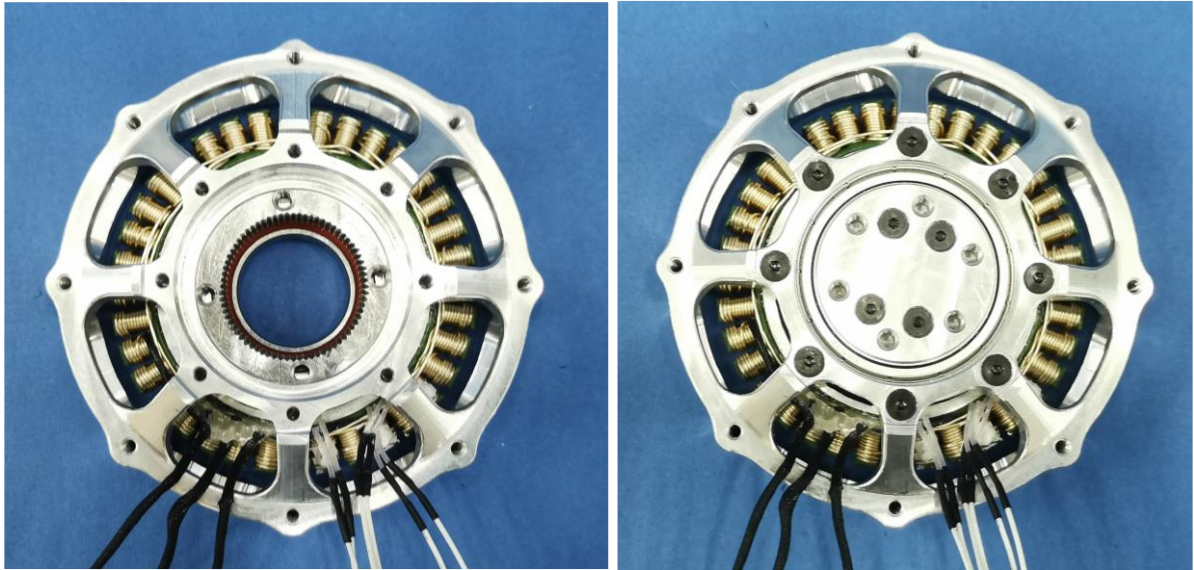
Στο διακρίνονται τρία θερμίστορ που τοποθετήθηκαν στο πίσω μέρος του στάτη για την μέτρηση θερμοκρασίας κατά την λειτουργία του επενεργητή. Πρόκειται για τα θερμίστορ 100K για 3D εκτυπωτές, τα οποία επιλέχθηκαν ως καταλληλότερα για την εφαρμογή αυτή. Η συγκράτησή τους έγινε με την χρήση πηνιοσύρματος. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε διαδοχικά πηνία με διαδοχή ένα παρά ένα, ώστε σε κάθε χρονική στιγμή να λαμβάνονται μετρήσεις και από τις τρεις φάσεις ξεχωριστά. Ο αριθμός τους, αλλά και η τοποθεσία εφαρμογής τους επιλέχθηκε με τρόπο ώστε να γίνει χρήση του ελάχιστου αριθμού θερμίστορ. Προκειμένου να εξασφαλισθούν αξιόπιστες μετρήσεις, τοποθετήθηκε θερμικά αγωγή πάστα ανάμεσα στους αισθητήρες και τα πηνία.



Σχήμα 5-4. (α) Τοποθέτηση του στάτη στο έδρανο. (β) Τοποθέτηση θερμίστορ στα τυλίγματα του στάτη.

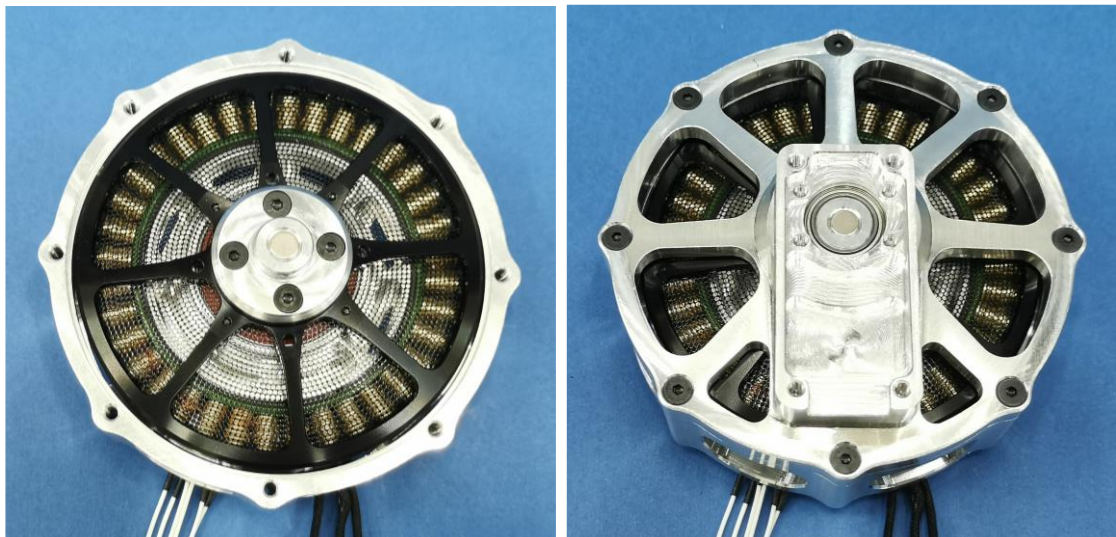
Στην συνέχεια, στην πίσω μεριά της έδρασης του στάτη τοποθετήθηκαν με σφικτή συναρμογή το ρουλεμάν 6805, καθώς και το δακτυλιοειδές γρανάτζι του πλανητικού συστήματος μείωσης. Για την εφαρμογή τους στο σώμα του στάτη κατασκευάστηκαν κατάλληλες ιδιοσκευές ώστε να επιτευχθεί με τον κατάλληλο τρόπο το πρεσάρισμά τους στην έδραση. Στο (α) διακρίνεται η ύπαρξη οπών με σπείρωμα στο σώμα του δακτυλιοειδούς γραναζιού. Οι διαμορφώσεις αυτές υλοποιήθηκαν για την εύκολη αφαίρεση του εν λόγω εξαρτήματος από την έδραση με την χρήση απλών κοχλιών.

Στην συνέχεια τοποθετήθηκε ελεύθερα ο φορέας μαζί με την βαθμίδα πλανητικής μείωσης. Η εξασφάλιση της μόνιμης σύνδεσης του εν λόγω εξαρτήματος με την έδραση του στάτη επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ενός δακτυλίου που ασφαλίζει τον φορέα εντός του συναρμολογήματος.



Σχήμα 5-5. (α) Τοποθέτηση του ρουλεμάν 6805 και του δακτυλιοειδούς γραναζιού. (β) Τοποθέτηση της βαθμίδας μείωσης στην έδραση του στάτη.

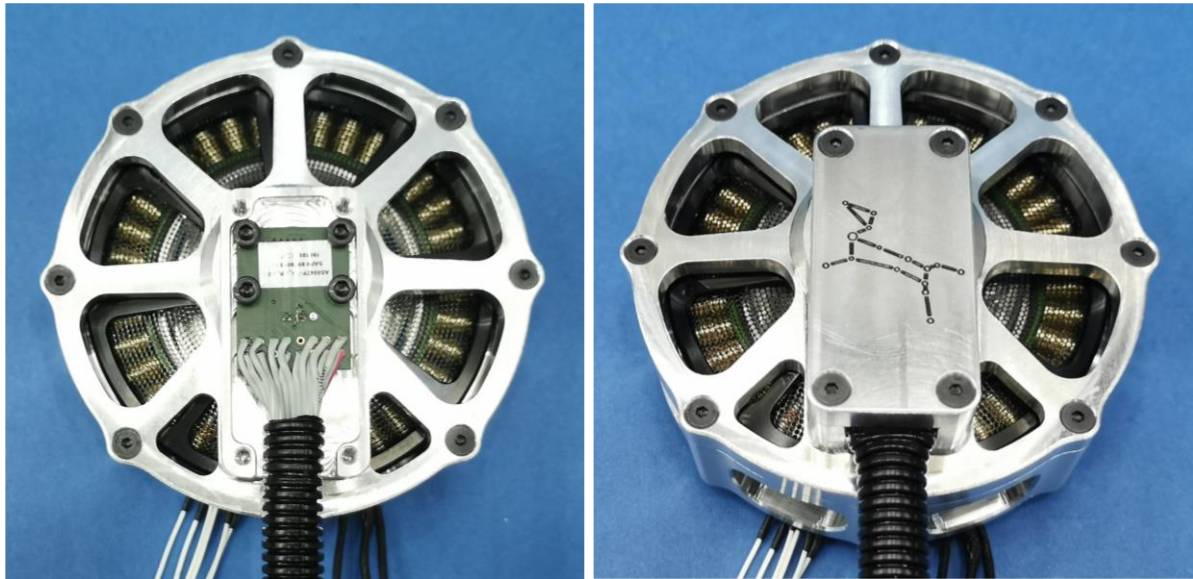
Ακολούθως, τοποθετήθηκε το συναρμολόγημα του ρότορα με τον ήλιο του μειωτήρα στην εμπρόσθια μεριά του εδράνου, όπως φαίνεται στο . Η εφαρμογή αυτή έγινε με μεγάλη προσοχή, διότι οι μαγνητικές δυνάμεις που έλκουν τον ρότορα επάνω στον στάτη είναι δυνατό να προκαλέσουν βίαιες προσκρούσεις ανάμεσα στα δύο αυτά εξαρτήματα. Με την χρήση περιφερειακών κοχλιών, συνδέθηκε η έδραση του ρότορα με την έδραση του στάτη. Το εν λόγω τεμάχιο πλαισιώνει την εμπρόσθια μεριά του επενεργητή, προστατεύοντας τα εξαρτήματα στο εσωτερικό της μονάδας. Επίσης, σχηματίζει και κατάλληλη υποδοχή για την έδραση του ρουλεμάν 6701 που στηρίζει κατάλληλα τον ρότορα.



Σχήμα 5-6. (α) Τοποθέτηση του ρότορα με τον ήλιο στην έδραση. (β) Τοποθέτηση της έδρασης του ρότορα.

Τέλος, τοποθετήθηκε ο αισθητήρας γωνιακής θέσης AS5047P στην κατάλληλα διαμορφωμένη υποδοχή του εδράνου του ρότορα. Η συγκράτησή του υλοποιήθηκε με την χρήση κοχλιών. Για τη σύνδεσή του στο σύστημα ελέγχου, συγκολλήθηκε κατάλληλη καλωδιοταινία στις επαφές της πλακέτας. Για την προστασία του μετρητικού αυτού διαμορφώθηκε κατάλληλο κάλυμμα, το οποίο συνδέθηκε με την έδραση του ρότορα με χρήση κοχλιών. Για την

ανακούφιση των μηχανικών τάσεων από την πλακέτα του μετρητή, τοποθετήθηκε κατάλληλο ελαστικό υλικό στο κάτω μέρος του καλύμματος, το οποίο και παραλαμβάνει οποιαδήποτε φόρτιση αναπτυχθεί στο σημείο. Για την προστασία της καλωδιοταινίας από τυχόν εκδορές, έγινε χρήση εύκαμπτου σπιράλ.



Σχήμα 5-7. Τοποθέτηση του μετρητικού γωνιακής θέσης AS5047P και του καλύμματός του.

Αξίζει να τονισθεί ότι από κάθε μονάδα επενέργησης εξέρχονται τρεις ομάδες καλωδίων. Πρόκειται για τα καλώδια του αισθητήρα γωνιακής θέσης, τα καλώδια των αισθητήρων μέτρησης θερμοκρασίας, καθώς και τα τρία καλώδια της παροχής ρεύματος. Δεδομένου ότι το πόδι που θα υλοποιηθεί φέρει τρεις μονάδες για την επενέργηση, η κατάλληλη οργάνωση και προστασία των καλωδίων αποτελεί μείζον θέμα. Σε αντίθετη περίπτωση, τυχόν εκδορές και τραβήγματα κατά την λειτουργία του ποδιού θα μπορούσαν να δράσουν καταστροφικά για τις καλωδιώσεις. Για τον σκοπό αυτό έγινε χρήση εύκαμπτου σπιράλ για την οργάνωση και την προστασία των καλωδίων. Για την οδήγηση των καλωδίων από και προς τις μονάδες επενέργησης, καθώς και για την στήριξη των σπιράλ, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν με χρήση 3D εκτυπωτή τα κατάλληλα άκρα που διακρίνονται στο .

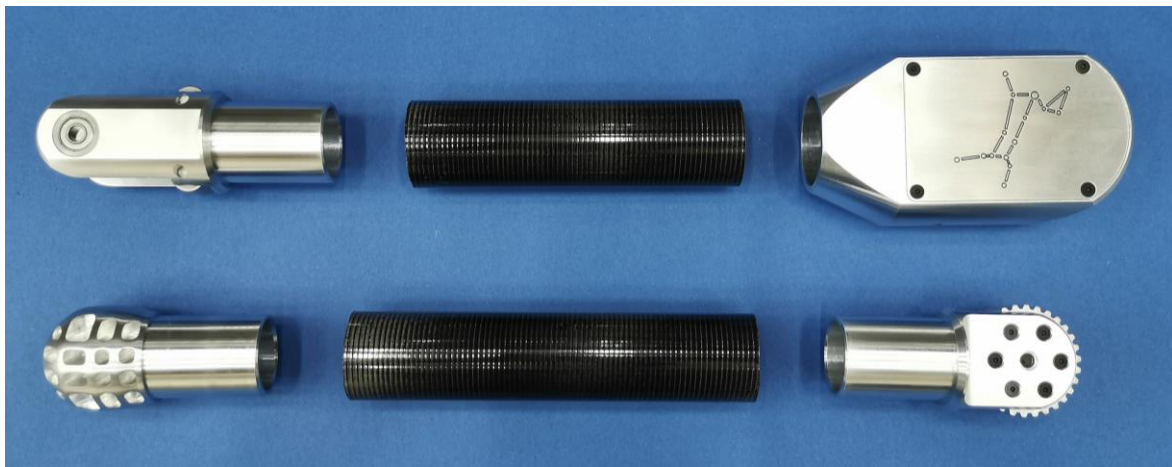


Σχήμα 5-8. Οργάνωση και προστασία των καλωδίων με την χρήση σπιράλ και κατάλληλων πλαστικών άκρων.

5.2 Κατασκευή των βασικών στοιχείων του ποδιού

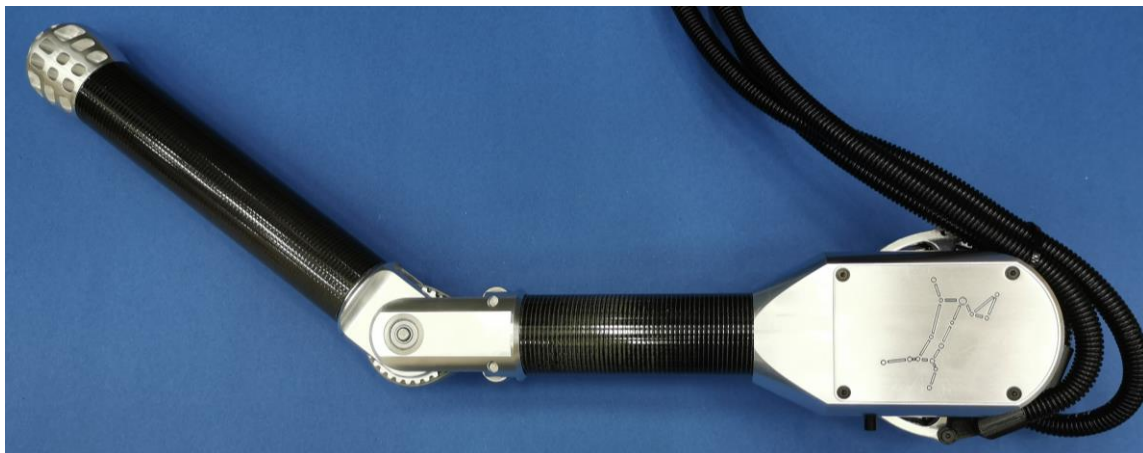
Έπειτα από την κατασκευή των μονάδων επενέργησης, ακολούθησε η κατασκευή των τμημάτων του ποδιού, καθώς και η συναρμολόγησή του. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν όμοια υλικά και σχεδιαστικές λύσεις που είχαν εφαρμοσθεί στο πόδι του τετραπόδου ρομπότ Laelaps II. Όπως διακρίνεται στο , χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες από ανθρακόνημα ως δομικό στοιχείο των μελών του ποδιού.

Για την κατάλληλη διαμόρφωση των άκρων έκαστου μέλους κατασκευάστηκαν ειδικά εξαρτήματα από αλουμίνιο 7075 υψηλής αντοχής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η σύνδεση και η συνεργασία των δύο μελών μεταξύ τους, καθώς και η μηχανική σύνδεση του ποδιού με τις τρεις μονάδες επενέργησης. Στην επάνω συστοιχία εξαρτημάτων της εικόνας βρίσκονται τα τμήματα του άνω μέλους του ποδιού (Ισχίο), ενώ στην κάτω συστοιχία βρίσκονται τα εξαρτήματα που απαρτίζουν το κάτω μέλος του ποδιού (Γόνατο).



Σχήμα 5-9. Τα δομικά μέρη του ποδιού.

Τα επιμέρους εξαρτήματα αλουμινίου συγκολλήθηκαν εσωτερικά με τους σωλήνες από ανθρακόνημα κάνοντας χρήση ειδικής εποξειδικής κόλλας δύο συστατικών. Ακολούθως, τα δύο μέλη συναρμολογήθηκαν με τη προσθήκη των απαραίτητων συνδετικών εξαρτημάτων, όπως άξονες, ρουλεμάν, τροχαλίες και κοχλίες. Τελικά, το πόδι έλαβε την μορφή που φαίνεται στο .



Σχήμα 5-10. Η μορφή του ποδιού έπειτα από την συναρμολόγηση του ισχίου και του γονάτου.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναλυθεί το σύστημα μετάδοσης κίνησης με ιμάντα από τον επενεργητή 3 προς το γόνατο του ποδιού. Το βασικό γνώρισμα του παρόντος σχεδιασμού

είναι ότι επιλέχθηκε να γίνει η οδήγησή του ιμάντα εντός του σωλήνα ανθρακονήματος, όπως παρατηρείται στο . Η οδήγηση του ιμάντα έγινε με την χρήση κατάλληλων βελονοειδών ρουλεμάν, με τα οποία καθορίστηκε το περιβάλλον εργασίας του. Τα ρουλεμάν αυτά εδράζονται σε άξονες, οι οποίοι εφαρμόστηκαν πάνω στα εξαρτήματα αλουμινίου με σφικτή συναρμογή. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι δεν είναι απαραίτητη η χρήση κοχλιών για την πάκτωση των αξόνων, γεγονός που απλοποιεί κατά πολύ το συναρμολόγημα.



Σχήμα 5-11. Οδήγηση του ιμάντα εντός του σωλήνα ανθρακονήματος.

Η τάνυση του ιμάντα υλοποιείται στο πάνω άκρο του ισχίου. Στο εν λόγω εξάρτημα, το ένα εκ των δύο βελονοειδών ρουλεμάν επιλέχθηκε να ενσωματωθεί σε μια κινούμενη έδραση. Όπως παρατηρείται στο , με την σύσφιξη ακέφαλου κοχλία είναι δυνατή η εκτροπή του ρουλεμάν, τανύοντας έτσι τον ιμάντα. Στο άκρο αυτό του ισχίου τοποθετείται ακολούθως κατάλληλο κάλυμμα, το οποίο προστατεύει τα κινούμενα μέρη από εισχώρηση ξένων σωμάτων και στηρίζει την κινούμενη έδραση του βελονοειδούς ρουλεμάν.



Σχήμα 5-12. Το εσωτερικό τμήμα του άνω άκρου του ισχίου.

5.3 Συναρμολόγηση του ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας

Έπειτα από την υλοποίηση τόσο των μονάδων επενέργησης, όσο και του ποδιού, ακολούθησε η κατασκευή δύο τελευταίων ειδών εξαρτημάτων. Το πρώτο εξάρτημα που φαίνεται στο (α), προορίζεται για την μετάδοση κίνησης από την μονάδα 1 στην μονάδα 2. Το ίδιο εξάρτημα θα χρησιμοποιηθεί και για την πρόσδεση του ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας πάνω σε ειδική βάση που θα παρουσιασθεί στην συνέχεια. Το εξάρτημα που διακρίνεται στο (β) θα χρησιμοποιηθεί στην μετάδοση κίνησης από την μονάδα 2 στην μονάδα 3. Κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή των εν λόγω τεμαχίων δόθηκε σημασία στην τήρηση των αρχικά ορισμένων προδιαγραφών, όχι μόνο για λόγους ομοιομορφίας, αλλά και για την εξασφάλιση της εύκολης διέλευσης αέρα για την ψύξη των επενεργητών.



Σχήμα 5-13. (α) Το εξάρτημα για την σύνδεση των μονάδων 1 και 2. (β) Το εξάρτημα για την σύνδεση των μονάδων 2 και 3.

Πριν το εν λόγω πόδι μπορέσει να αποτελέσει μέρος μιας ευρύτερης ρομποτικής διάταξης, κρίθηκε σκόπιμο να δοκιμασθούν πρώτα πειραματικά οι επιδόσεις του, αλλά και να αναπτυχθούν σε αυτό νέες μεθοδολογίες ελέγχου. Συνεπώς, θα ήταν επικίνδυνο τόσο για τον χρήστη της διάταξης, όσο και για την ίδια την κατασκευή, το πόδι να είναι αστήρικτο, ενώ διαρρέεται από ρεύμα. Έτσι, με στόχο την εύκολη και ασφαλή διεξαγωγή πειραμάτων, κατασκευάστηκε ειδική βάση στήριξης όπου εδράστηκε το συναρμολόγημα.

Στο παρουσιάζεται το τελικό συναρμολογημένο πόδι τοποθετημένο στην βάση στήριξης που αναφέρθηκε. Η έδραση της βάσης έχει μεγάλο πλάτος, ώστε να μην είναι εύκολη η εκτροπή της. Στο πάνω μέρος της υπήρξε κατάλληλη μέριμνα ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν και να λειτουργήσουν με ασφάλεια τα ηλεκτρονικά που θα χρειασθούν για τον έλεγχο του ποδιού. Όλα τα σπιδάλ που οργανώνουν τα καλώδια οδηγήθηκαν στην ξύλινη πλατφόρμα, ώστε να είναι εύκολη η ηλεκτρολογική σύνδεση έκαστης μονάδας επενέργειας. Ταυτόχρονα, με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι τα καλώδια θα είναι ασφαλή κατά την κίνηση των αρθρώσεων του ποδιού έναντι τυχόν εκδορών και μηχανικών φορτίσεων.



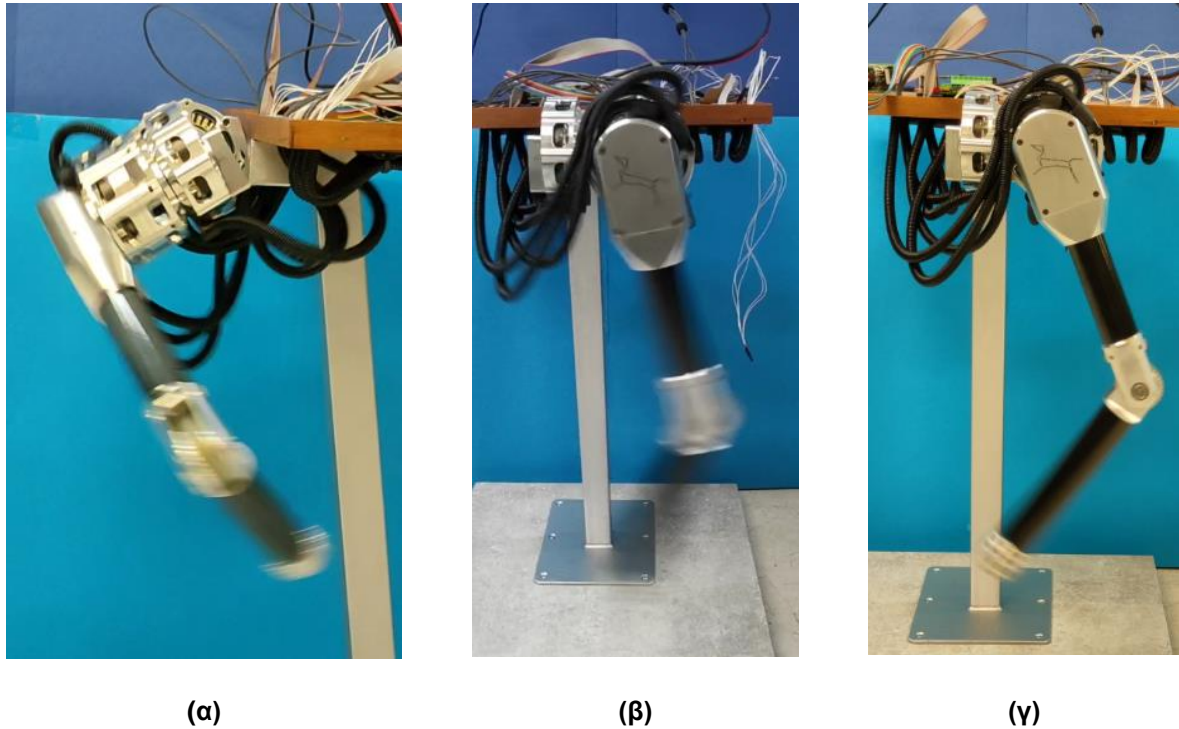
Σχήμα 5-14. Το συναρμολογημένο πόδι τριών βαθμών ελευθερίας πάνω στην ειδική βάση.

5.4 Πειράματα με το φυσικό μοντέλο του ποδιού

5.4.1 Πείραμα 1 – Δοκιμή του ποδιού τριών βαθμών ελευθερίας

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, υλοποιήθηκαν ορισμένα βασικά πειράματα ώστε να εξακριβωθεί η ομαλή λειτουργία του ποδιού. Για τον σκοπό αυτό, επιχειρήθηκαν μεμονωμένες κινήσεις σε κάθε άρθρωση. Συνολικά εκπονήθηκαν τρία πειράματα, ένα για την απαγωγή και προσαγωγή του ισχίου, ένα για την κίνηση του ισχίου και ένα για την κίνηση του γονάτου. Κατά την κίνηση κάθε μίας εκ των τριών αρθρώσεων, οι άλλες θέτονταν σε κατάσταση ακινησίας με ηλεκτρικό τρόπο πέδησης. Στο παρατηρούνται τα στιγμιότυπα που λήφθηκαν κατά την λειτουργία έκαστης άρθρωσης. Σε κάθε ένα από τα στιγμιότυπα, διακρίνονται περιοχές σημείων όπου η εικόνα θολώνει. Οι περιοχές αυτές υποδεικνύουν ότι τα αντίστοιχα μέλη τίθενται κάθε φορά σε κίνηση.

Έπειτα από την επιτυχή εκτέλεση των πειραμάτων, πιστοποιήθηκε ότι τόσο οι μονάδες επενέργειας, όσο και οι αρθρώσεις του ποδιού υλοποιήθηκαν επιτυχώς όπως προβλέφθηκε κατά τον σχεδιασμό.

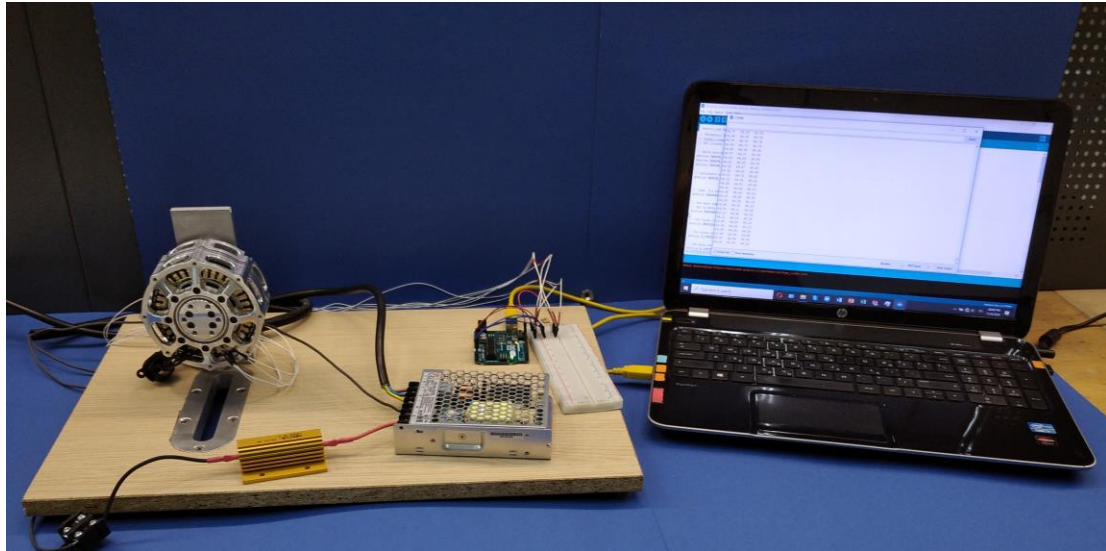


Σχήμα 5-15. (α) Η κίνηση απαγωγής και προσαγωγής του ισχίου, (β) η δεύτερη κίνηση του ισχίου, και (γ) η κίνηση του γονάτου.

5.4.2 Πείραμα 2 – Τροφοδοσία μονάδας με ρεύμα διαφορετικών εντάσεων

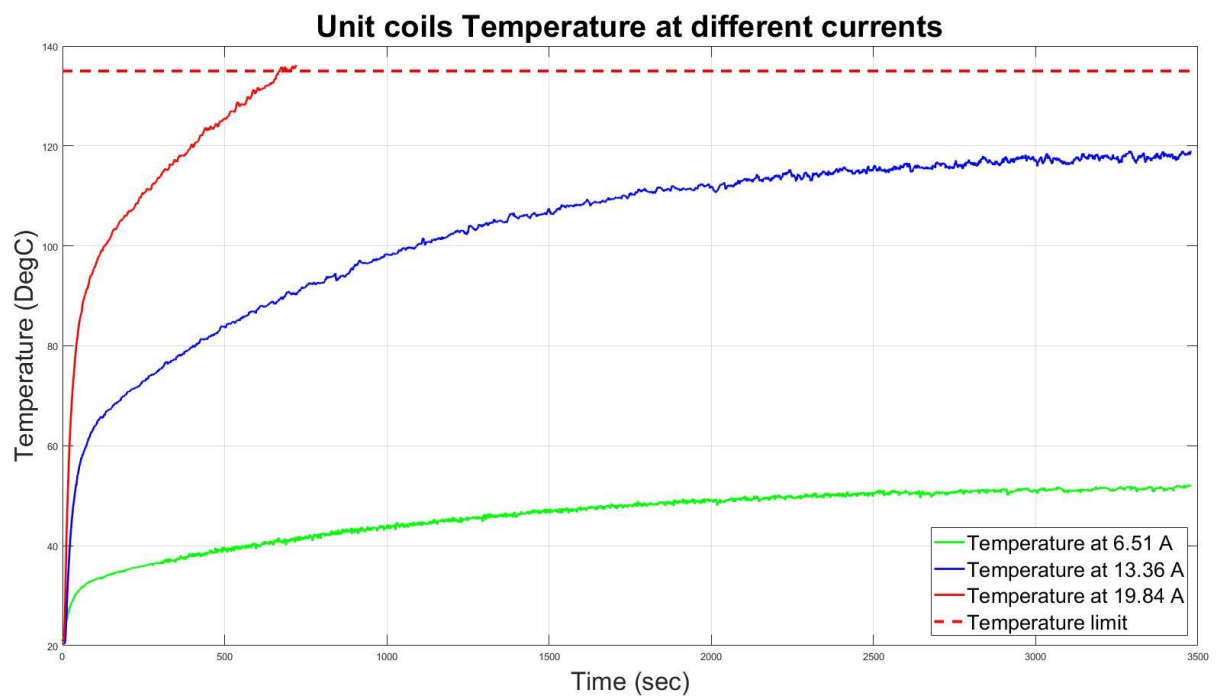
Το δεύτερο κατά σειρά πείραμα που υλοποιήθηκε, αφορά την εξακρίβωση της θερμικής συμπεριφοράς των τυλιγμάτων του επενεργητή που τοποθετήθηκε εντός της μονάδας. Κατά το πείραμα αυτό, ο κινητήρας τροφοδοτήθηκε ακινητοποιημένος με ρεύμα διαφορετικών εντάσεων, ώστε να μετρηθεί η θερμοκρασία στα τυλίγματά του με την χρήση των αισθητήρων θερμοκρασίας που έχουν τοποθετηθεί επάνω στον στάτη.

Στο , διακρίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Η μονάδα επενέργειας βρίσκεται στηριγμένη σε κατάλληλη βάση. Οι δύο εκ των τριών φάσεων του κινητήρα τροφοδοτούνται με ρεύμα εντάσεων 6,51 A, 13,36 A και 19,84 A με την χρήση τροφοδοτικού και συνδυασμό αυτού με κατάλληλη αντίσταση ισχύος σε σειρά. Τα τρία θερμίστορ συνδέονται με τον μικροελεγκτή Arduino μέσω απλού κυκλώματος διαιρέτη τάσης για έκαστο αισθητήρα. Μέσω της σειριακής επικοινωνίας, μεταφέρονται οι μετρήσεις στον υπολογιστή και καταγράφονται για περεταίρω επεξεργασία.



Σχήμα 5-16. Η πειραματική διάταξη μέτρησης θερμοκρασίας στα τυλίγματα του στάτη για τροφοδοσία με διάφορες τιμές ρεύματος.

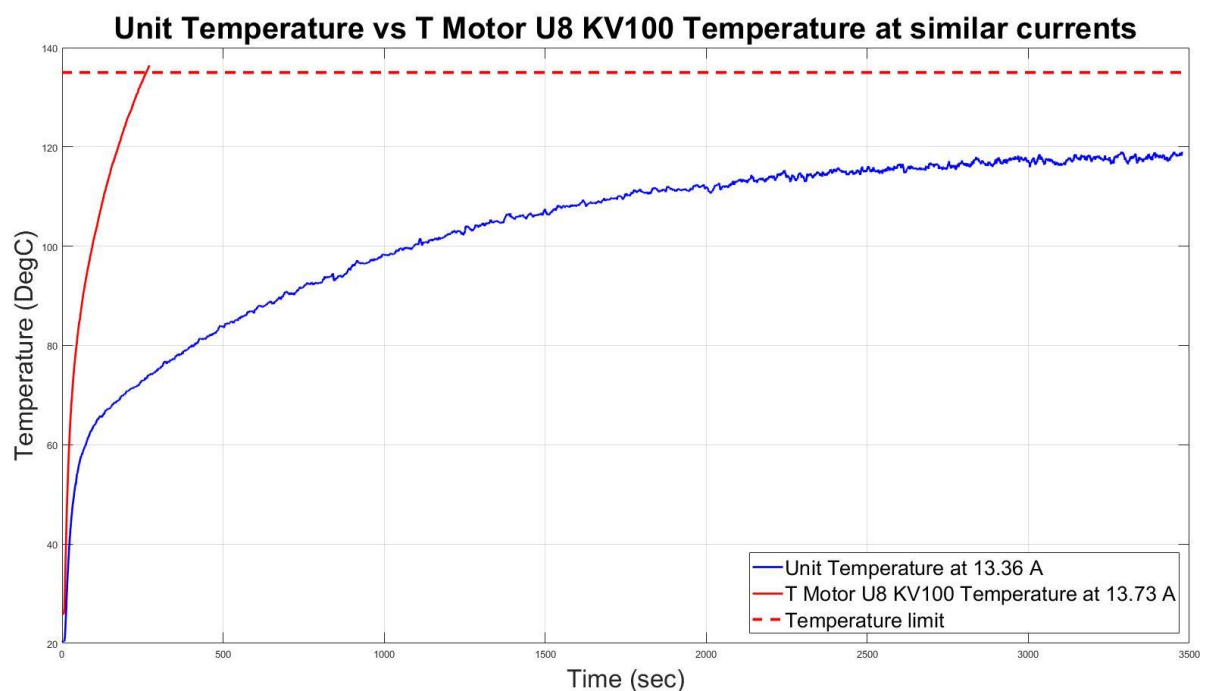
Στο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των αισθητήρων για τις τρεις διαφορετικές τιμές ρεύματος. Στο γράφημα αυτό, με πράσινο χρώμα παρουσιάζεται η μέτρηση για το πείραμα των 6,51 A, με μπλε χρώμα η μέτρηση για το πείραμα των 13,36 A και με κόκκινο οι μετρήσεις του πειράματος των 19,84 A. Με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή παριστάνεται το όριο θερμοκρασίας για την ασφαλή λειτουργία του κινητήρα, που τέθηκε στους 135 °C. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο εν λόγω γράφημα, αφορούν την μέγιστη από τις τρεις μετρήσεις των αισθητήρων. Επομένως, οι τιμές αυτές αφορούν την φάση A των τυλιγμάτων του στάτη.



Σχήμα 5-17. Οι μετρήσεις θερμοκρασίας κατά την τροφοδοσία της μονάδας με ρεύματα διαφορετικών εντάσεων.

Από τα αποτελέσματα του πειράματος συμπεραίνεται ότι ο επενεργητής θα μπορεί να διαρρέεται με ρεύμα μικρότερο ή ίσο των 13,36 A για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να διατρέχει κίνδυνο υπερθέρμανσης. Αντίθετα, θα μπορεί να τροφοδοτείται με ρεύμα μεγαλύτερο ή ίσο των 19,84 A για χρόνο που δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 720 δευτερόλεπτα, ώστε να εργάζεται με ασφάλεια. Αυτό στην πράξη σημαίνει ότι αν οι μονάδες του ποδιού τροφοδοτούνται με ρεύμα εντάσεων κάτω των 13,36 A, τότε το ρομπότ που θα φέρει το πόδι θα επιτελεί όλες του τις λειτουργίες με ασφάλεια για απεριόριστο χρόνο. Στην περίπτωση όπου το ρομπότ χρειαστεί να εκτελέσει κάποια εργασία που απαιτεί μεγαλύτερες ροπές στις αρθρώσεις, όπως να υπερπηδά εμπόδια, τότε θα μπορεί να εργασθεί με ασφάλεια μόνο για περιορισμένο χρόνο.

Είναι χρήσιμο να σχολιασθεί ότι από προηγούμενα θερμικά πειράματα στον κινητήρα T Motor U8 KV100 είχε βρεθεί ότι κατά την τροφοδοσία με ρεύμα έντασης 13,73 A, έπειτα από περίπου 250 δευτερόλεπτα η θερμοκρασία στα τυλίγματα ξεπερνά το όριο των 135°C. Το γεγονός αυτό παρουσιάζεται ξεκάθαρα και στο , όπου με κόκκινο χρώμα παριστάνεται η καμπύλη θερμοκρασίας των τυλιγμάτων του T Motor U8 όταν διαρρέεται από ρεύμα 13,73 A, ενώ με μπλε χρώμα η καμπύλη θερμοκρασίας των τυλιγμάτων του T Motor U8 Lite που είναι εδρασμένος στην μονάδα, όταν διαρρέεται από σχεδόν ίδιο ρεύμα 13,36 A.



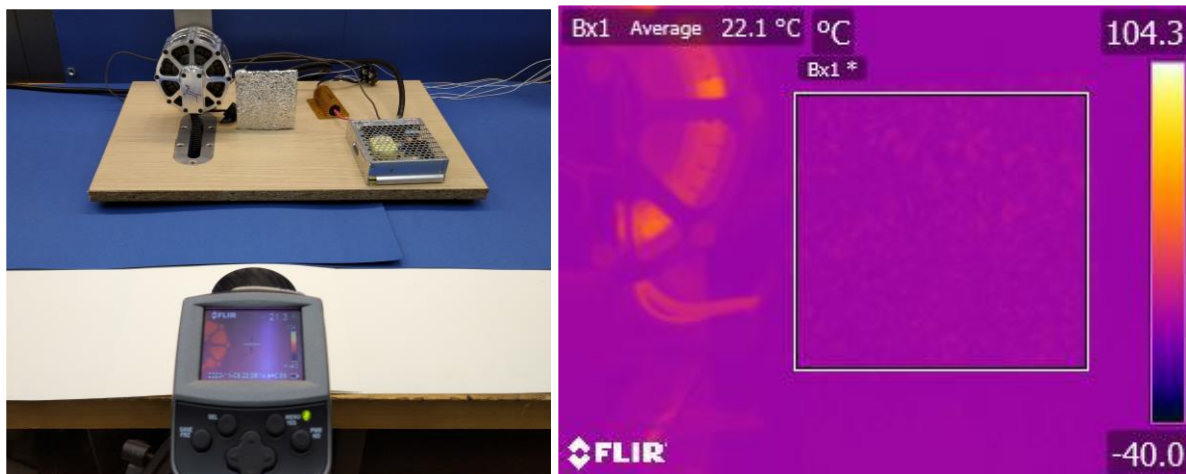
Σχήμα 5-18. Σύγκριση της θερμοκρασίας τυλιγμάτων του επενεργητή της μονάδας και του T Motor U8 KV100, έπειτά από τροφοδοσία με κοντινές τιμές ρεύματος.

Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται σε δύο αιτίες. Η πρώτη είναι ότι ο κινητήρας T Motor U8 KV100 έχει αντίσταση τυλιγμάτων ίση με 0,23 Ω, σε αντίθεση με τον κινητήρα T Motor U8 Lite KV100 που έχει αντίσταση τυλιγμάτων ίση με 0,18 Ω. Αυτό σημαίνει ότι για τι ίδιες τιμές ρεύματος ο πρώτος κινητήρας θα εκλύει μεγαλύτερη θερμική ισχύ προς το περιβάλλον, σε αντίθεση με τον δεύτερο. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι το κέλυφος της μονάδας στην οποία έχει εδραστεί ο στάτης του U8 Lite έχει μεγαλύτερη ψυκτική επιφάνεια από το αντίστοιχο σώμα του απλού U8. Επομένως, στην περίπτωση του κινητήρα U8 Lite γίνεται πιο αποτελεσματικά η απαγωγή της θερμότητας από τα τυλίγματα του στάτη προς το περιβάλλον.

5.4.3 Πείραμα 3 – Μέτρηση θερμοκρασίας στο κέλυφος του επενεργητή

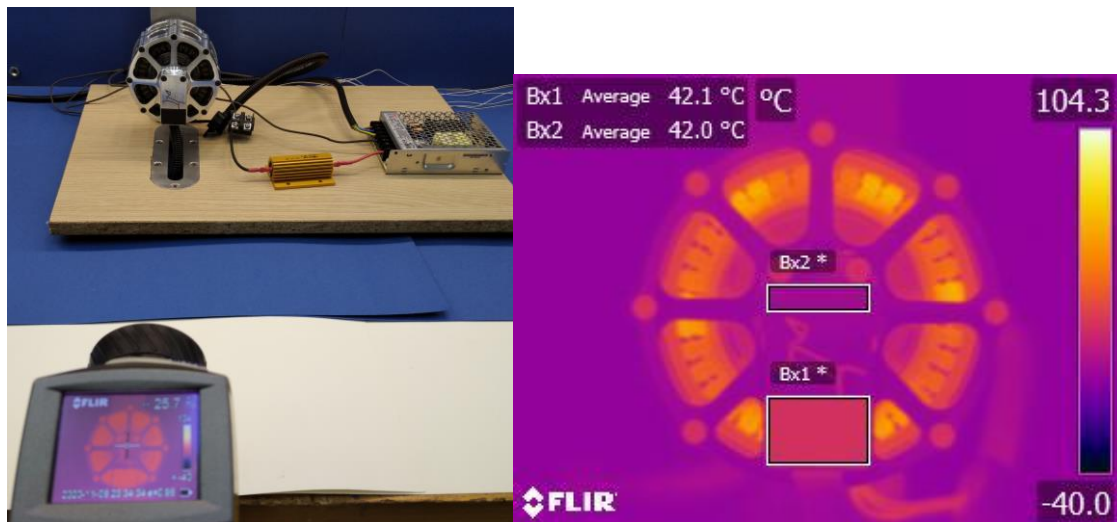
Το τελευταίο πείραμα που κρίθηκε σκόπιμο να υλοποιηθεί ήταν η μέτρηση θερμοκρασίας στο κάλυμμα του αισθητήρα γωνίας (encoder) κατά την τροφοδοσία του επενεργητή με ρεύμα συγκεκριμένης έντασης. Με τον τρόπο αυτό αξιολογήθηκε η επιλογή που έγινε κατά την φάση του σχεδιασμού για την χρήση του μαγνητικού encoder AS5047P αντί κάποιου δακτυλιοειδούς encoder για λόγους ασφαλείας έναντι υπερθέρμανσης.

Στο εν λόγω πείραμα, η μονάδα διαρρέεται με ρεύμα έντασης 13,36 A, που ορίστηκε ως ασφαλές για την λειτουργία του κινητήρα στην μόνιμη κατάσταση. Στην περίπτωση αυτή λαμβάνονται μετρήσεις κάθε 2 λεπτά μόνο με την θερμική κάμερα, διότι στο κέλυφος δεν έχουν προσαρμοσθεί αισθητήρες θερμοκρασίας. Σε αντιστοιχία με προηγούμενες μετρήσεις με την θερμική κάμερα, για την επεξεργασία των μετρήσεων με το λογισμικό της FLIR είναι απαραίτητος ο πειραματικός υπολογισμός του συντελεστή εκπομπής, καθώς και της θερμοκρασίας ανάκλασης. Για την εύρεση της θερμοκρασίας ανάκλασης, όπως είχε υποδειχθεί και σε προηγούμενο πείραμα, τοποθετήθηκε ειδικά διαμορφωμένος στόχος από τσαλακωμένο αλουμινόχαρτο δίπλα στον επενεργητή, όπως φαίνεται στο . Έπειτα λήφθηκε στιγμιότυπο με την θερμική κάμερα, το οποίο υπέστη επεξεργασία με το αντίστοιχο λογισμικό. Εκεί ορίστηκε ένα παραλληλόγραμμο επάνω στον στόχο και τέθηκαν ως τοπικές παράμετροι στο τμήμα αυτό συντελεστής εκπομπής $e = 1$ και απόσταση ίση με 0 m. Με τον τρόπο αυτό, η θερμοκρασία ανάκλασης βρέθηκε ίση με 22,1 °C.



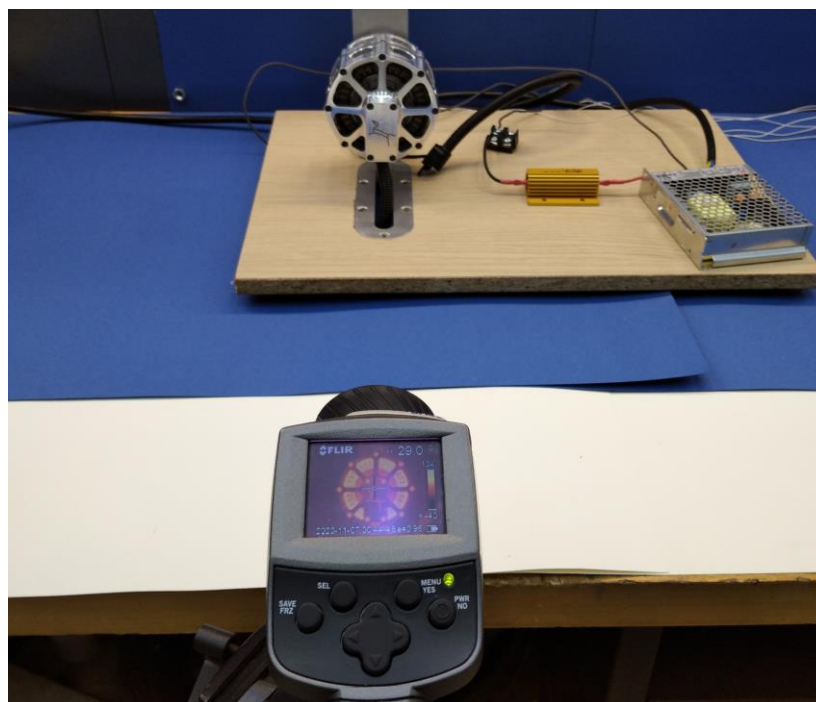
Σχήμα 5-19. Πείραμα υπολογισμού της θερμοκρασίας ανάκλασης.

Στην συνέχεια υπολογίστηκε ο συντελεστής εκπομπής e . Αρχικά καλύφθηκε ένα τμήμα της προς μέτρηση επιφάνειας με μονωτική ταινία με γνωστό συντελεστή εκπομπής, που είναι ίσος με 0,97. Αφού η επιφάνεια αυτή θερμάνθηκε περίπου στους 20 °C πάνω από την θερμοκρασία δωματίου, λήφθηκε ένα στιγμιότυπο με την κάμερα. Με την χρήση του λογισμικού έγινε στην συνέχεια κατάλληλη επεξεργασία της εικόνας για τον υπολογισμό του e . Πιο συγκεκριμένα, ορίστηκε ως θερμοκρασία ανάκλασης σε όλη την εικόνα οι 22,1 °C και ως απόσταση από την κάμερα τα 0,4 m. Στην συνέχεια απομονώθηκε μια παραλληλόγραμμη περιοχή εκεί όπου είχε τοποθετηθεί η μονωτική ταινία και τέθηκε ως τοπική παράμετρος στην περιοχή αυτή $e = 0,97$. Έπειτα απομονώθηκε άλλη μια παραλληλόγραμμη περιοχή στο σημείο του καλύμματος του encoder όπου υπάρχει καθαρή επιφάνεια αλουμινίου. Τροποποιώντας στο παραλληλόγραμμο Bx2 την τοπική παράμετρο του e , βρέθηκε ότι η τιμή του συντελεστή στο τμήμα αυτό θα πρέπει να ισούται με 0,15, ώστε η μέση θερμοκρασία στο παραλληλόγραμμο Bx2 να ταυτίζεται με την μέση θερμοκρασία στο Bx1.



Σχήμα 5-20. Πείραμα υπολογισμού του συντελεστή εκπομπής.

Έχοντας υπολογίσει όλα τα μεγέθη που είναι απαραίτητα, στην συνέχεια αφαιρέθηκε η μονωτική ταινία από την προς μέτρηση επιφάνεια και έλαβε χώρα το πείραμα, όπως παρουσιάζεται στο . Κατά την διάρκεια του πειράματος, ο κινητήρας του επενεργητή διαρρέεται από ρεύμα έντασης 13,36 A, ενώ λαμβάνονται μετρήσεις κάθε 2 λεπτά με την χρήση της κάμερας.

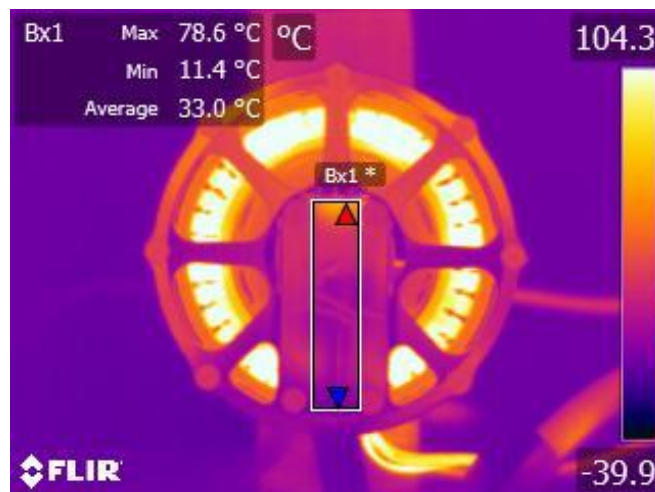


Σχήμα 5-21. Μέτρηση της θερμοκρασίας στο κέλυφος της μονάδας μετά την αφαίρεση της ταινίας.

Με βάση την θεωρία, οι επιφάνειες που είναι εξαιρετικά γυαλιστερές και έχουν συντελεστή εκπομπής λιγότερο από 0,2, είναι πολύ δύσκολο, έως ακατόρθωτο να μετρηθούν με την χρήση θερμικών καμερών. Δεδομένου λοιπόν ότι ο συντελεστής εκπομπής ϵ της αλουμινένιας επιφάνειας βρέθηκε ίσος με 0,15, κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί εάν μπορεί να γίνει αξιόπιστη μέτρηση θερμοκρασίας πάνω στην επιφάνεια του καλύμματος του encoder. Για τον λόγο αυτό, με την χρήση του λογισμικού της FLIR έγινε επεξεργασία σε ένα στιγμιότυπο που

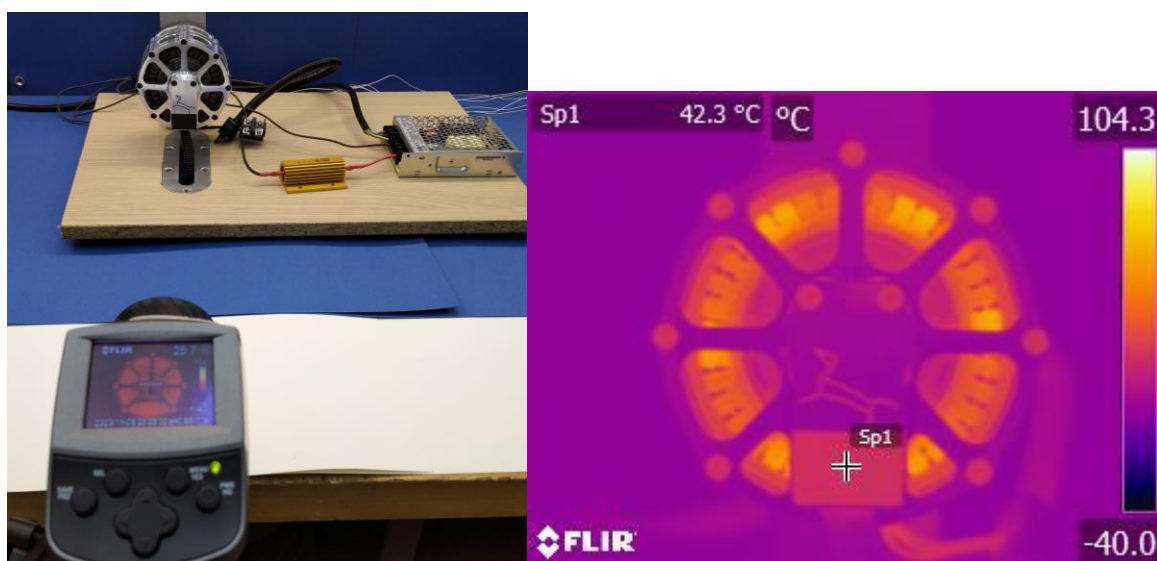
λήφθηκε με την κάμερα. Στο , ορίσθηκαν ως παράμετροι στην εικόνα η θερμοκρασία ανάκλασης ίση με $22,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ και ο συντελεστής e ίσος με $0,15$, ενώ η απόσταση ίση με $0,4\text{ m}$. Έπειτα ορίστηκε ένα παραλληλόγραμμο σχεδόν σε όλη την επιφάνεια του καλύμματος του encoder, και μετρήθηκαν η μικρότερη και η μέγιστη τιμή σε αυτό.

Όπως παρατηρείται, ενώ στην επιφάνεια θα έπρεπε να είχε μικρή διαφορά η μέγιστη από την ελάχιστη τιμή, η μέγιστη θερμοκρασία είναι $78,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ η ελάχιστη είναι $11,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, γεγονός που δεν συνάδει με αυτό που αναμένεται. Επομένως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι όντως η επιφάνεια του αλουμινίου είναι υπερβολικά γυαλιστερή και έχει αρκετά χαμηλό συντελεστή e , γεγονός που καθιστά πρακτικά αδύνατη την λήψη σωστών μετρήσεων με την παρούσα μεθοδολογία μέτρησης.



Σχήμα 5-22. Πείραμα που δείχνει ότι η θερμοκρασία της γυαλιστερής επιφάνειας του καλύμματος του encoder είναι δύσκολο να μετρηθεί με απλή χρήση θερμικής κάμερας.

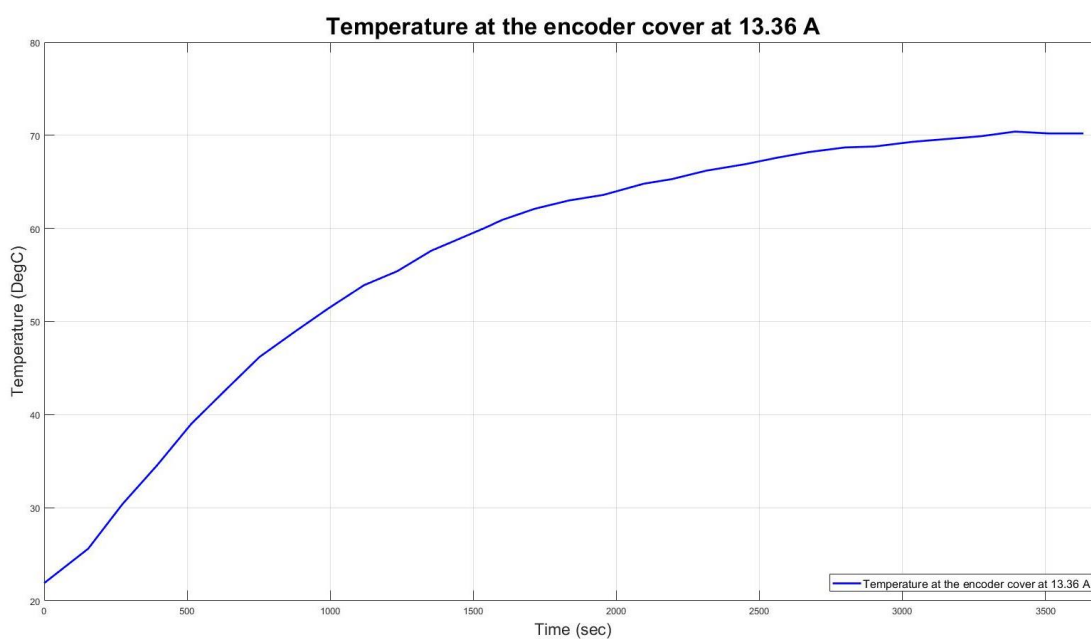
Αναζητώντας λύση στο πρόβλημα αυτό επιλέχθηκε να αυξηθεί ο συντελεστής e της προς μέτρηση επιφάνειας με τεχνητό τρόπο. Με αυτό τον γνώμονα, τοποθετήθηκε ξανά στο κάλυμμα του encoder η μονωτική ταινία, όπως διακρίνεται στο και επαναλήφθηκε το πείραμα λαμβάνοντας ξανά στιγμιότυπα με την κάμερα κάθε 2 λεπτά.



Σχήμα 5-23. Πειραματικά αποτελέσματα μετά από αύξηση του συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας με την χρήση μονωτικής ταινίας.

Το διάγραμμα των μετρήσεων της θερμικής κάμερας συναρτήσει του χρόνου παρουσιάζεται στο . Στο διάγραμμα διακρίνεται ότι το κέλυφος του encoder κατά την τροφοδοσία του επενεργητή με ρεύμα 13,36 A λαμβάνει θερμοκρασίες που φτάνουν στην μόνιμη κατάσταση τους 70 °C. Αυτό συνεπάγεται ότι στο εσωτερικό του κελύφους του encoder και σε κάποιο άλλο σημείο του κελύφους του επενεργητή, το σώμα του θα λαμβάνει θερμοκρασίες υψηλότερες από την τιμή αυτή. Ταυτόχρονα, εάν ο κινητήρας τροφοδοτηθεί με ρεύμα υψηλότερο από τα 13,36 A για μικρό χρονικό διάστημα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η θερμοκρασία πρόκειται να λάβει ακόμα υψηλότερες τιμές.

Επομένως, θα ήταν αρκετά επισφαλές εάν είχε επιλεγεί κατά την φάση του σχεδιασμού η χρήση κάποιου δακτυλιοειδούς encoder. Αυτού του είδους οι αισθητήρες έχουν μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 85 °C, σε αντίθεση με τους μαγνητικούς, όπως ο AS5047P που μπορεί να εκτεθεί ακόμα και σε θερμοκρασίες της τάξεως των 260 °C.



Σχήμα 5-24. Η θερμοκρασία του καλύμματος του encoder για τροφοδοσία του επενεργητή με ρεύμα 13,36 A.

6 Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστίασε στην μελέτη, τον σχεδιασμό και την υλοποίηση πρωτότυπης μονάδας επενέργειας η οποία ενσωματώνει κινητήρα υψηλής συγκέντρωσης ισχύος, μονοβάθμιο μειωτήρα με μικρό λόγο μείωσης και σύστημα αισθητήρων γωνιακής θέσης του ρότορα του κινητήρα και θερμοκρασίας. Αναλυτικότερα στα πλαίσια της εργασίας:

- Εξετάστηκαν οι υπάρχουσες αρχιτεκτονικές επενέργειας και οι μέθοδοι υλοποίησής τους στα κυριότερα ρομπότ με πόδια
- Δημιουργήθηκε βάση δεδομένων με μεγάλο αριθμό εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων μείωσης διαφόρων τεχνολογιών καθώς και έτοιμων μονάδων επενέργειας
- Αξιολογήθηκαν, με βάση τεχνικά κριτήρια σχετιζόμενα με την κίνηση με πόδια, όλες οι πιθανές επιλογές συστημάτων μείωσης και επιλέχθηκαν τα καταλληλότερα συστήματα για την ενσωμάτωση στην πρωτότυπη μονάδα επενέργειας
- Μελετήθηκαν τα θερμικά φαινόμενα που σχετίζονται με την λειτουργία του κινητήρα της μονάδας επενέργειας με χρήση των λογισμικών ComSol και Solidworks και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με βάση πειραματικά αποτελέσματα
- Επιλέχθηκαν οι κατάλληλοι αισθητήρες θερμοκρασίας για την ενσωμάτωση στην μονάδα επενέργειας και αξιολογήθηκαν πειραματικά με χρήση θερμοστοιχείου υψηλής ακρίβειας και θερμικής κάμερας
- Σχεδιάστηκε με βάση τις κύριες σχεδιαστικές αρχές η μονάδα επενέργειας και τροποποιήθηκαν κατάλληλα τα εμπορικά διαθέσιμα μηχανολογικά εξαρτήματα ώστε να ενσωματωθούν σε αυτή
- Κατασκευάστηκαν τρεις πανομοιότυπες μονάδες επενέργειας
- Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ρομποτικό πόδι τριών βαθμών ελευθερίας βασιζόμενο στις τρεις μονάδες επενέργειας
- Εξακριβώθηκε πειραματικά η λειτουργικότητα του ρομποτικού ποδιού

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή της μονάδας επενέργειας παρουσίαζαν ιδιαίτερες προκλήσεις καθώς οι σχετικά μεγάλες μηχανικές καταπονήσεις και η θερμική φόρτιση των μονάδων επενέργειας απαιτούσαν την βέλτιστη εκμετάλλευση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών και δυσχέραιναν σημαντικά την εύρεση εμπορικά διαθέσιμων αισθητήρων και μηχανολογικών εξαρτημάτων.

6.2 Μελλοντική εργασία

Αναφορικά με την μελλοντική εργασία που θα στηριχθεί στην παρούσα διπλωματική, θα ήταν σκόπιμη η εξέταση της πιθανότητας ενσωμάτωσης των κινητήρων και μειωτήρων σε κοινή μονάδα επενέργειας που θα προορίζεται για ρομπότ με διαφορετικά χαρακτηριστικά από αυτά του τετραπόδου Laelaps II. Συνεπώς, θα μπορούσαν ενδεχομένως να υλοποιηθούν παραλλαγές αυτής της μονάδας, που θα προορίζονται για ρομπότ που θα είναι είτε μεγαλύτερα, είτε μικρότερα από αυτό.

Ενδιαφέρον επίσης θα ήταν να γίνει περαιτέρω διερεύνηση αναφορικά με την θερμική μοντελοποίηση με την χρήση CFD, που φάνηκε να είναι πολλά υποσχόμενη μέθοδος. Με τον τρόπο αυτό θα μπορεί να προβλέπεται στο μέλλον η θερμική συμπεριφορά ολόκληρης της μονάδας από το στάδιο του σχεδιασμού. Με την κατάλληλη προσαρμογή του σχεδίου θα μπορεί να βελτιστοποιηθεί η θερμική συμπεριφορά της μονάδας επενέργειας με αποτέλεσμα την εκμετάλλευση μεγαλύτερου μέρους των δυνατοτήτων του κινητήρα. Με την δυνατότητα αυτή επίσης θα μπορεί να διερευνηθεί το κατά πόσον θα μπορεί να ενσωματωθεί δακτυλιοειδής μετρητής γωνιακής θέσης στην μονάδα επενέργειας, από άποψη αντοχής σε θερμικά φορτία. Μια τέτοια ενσωμάτωση θα ήταν σημαντική σχεδιαστική αναβάθμιση για το συναρμολόγημα αυτό.

Επίσης, θα ήταν σκόπιμη η ενσωμάτωση όσο το δυνατόν περισσότερων ηλεκτρονικών στην μονάδα, ώστε να είναι κατά το δυνατόν πιο αυτόνομη. Θα μπορούσε στο μέλλον να υλοποιηθεί κατάλληλη πλακέτα που θα περιλαμβάνει μετρητικό θέσης, ηλεκτρονικά για την οδήγηση του κινητήρα, ακόμη και IMUs.

7 Βιβλιογραφία

- [1] Pratt, G. A., and M. M. Williamson, "Series elastic actuators," *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1995, vol. 1, pp. 399–406.
- [2] Wensing, P. M., 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", *IEEE Transactions on Robotics*, 2017.
- [3] J. Reher, W.-L. Ma, and A. D. Ames, "Dynamic Walking with Compliance on a Cassie Bipedal Robot," *arXiv:1904.11104 [cs]*, Apr. 2019, Accessed: Nov. 12, 2020. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1904.11104>.
- [4] M. Hutter, "StarLETH & Co.: Design and control of legged robots with compliant actuation," ETH Zurich, 2013.
- [5] M. Hutter *et al.*, "ANYmal - a highly mobile and dynamic quadrupedal robot," in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, South Korea, Oct. 2016, pp. 38–44, doi: 10.1109/IROS.2016.7758092.
- [6] S. Seok, A. Wang, Meng Yee Chuah, D. Otten, J. Lang, and S. Kim, "Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot," in *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, Germany, May 2013, pp. 3307–3312, doi: 10.1109/ICRA.2013.6631038.
- [7] G. Bledt, M. J. Powell, B. Katz, J. Di Carlo, P. M. Wensing, and S. Kim, "MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot," in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid, Oct. 2018, pp. 2245–2252, doi: 10.1109/IROS.2018.8593885.
- [8] S. Dallas, K. Machairas, K. Koutsoukis, and E. Papadopoulos, "A leg design method for high speed quadrupedal locomotion," in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, BC, Sep. 2017, pp. 4877–4882, doi: 10.1109/IROS.2017.8206365.
- [9] https://harmonicdrive.de/fileadmin/produktdaten/canisdrive/ED_CanisDrive_E_1030579_08_2019_V05.pdf
- [10] B. Katz, J. D. Carlo, and S. Kim, "Mini Cheetah: A Platform for Pushing the Limits of Dynamic Quadruped Control," in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, QC, Canada, May 2019, pp. 6295–6301, doi: 10.1109/ICRA.2019.8793865.
- [11] S. Kalouche, "GOAT: A legged robot with 3D agility and virtual compliance," in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, BC, Sep. 2017, pp. 4110–4117, doi: 10.1109/IROS.2017.8206269.
- [12] G. Kenneally, A. De, and D. E. Koditschek, "Design Principles for a Family of Direct-Drive Legged Robots," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 1, no. 2, pp. 900–907, Jul. 2016, doi: 10.1109/LRA.2016.2528294.
- [13] <http://nereus.mech.ntua.gr/legged/> .