



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.

Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Σχεδιασμός και κατασκευή βελτιωμένης μικρορομποτικής  
πλατφόρμας με δυνατότητα ανάδρασης δύναμης**

Χαράλαμπος Λαμπούσης

*Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος*

ΑΘΗΝΑ 2020

## Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία γίνεται περιγραφή της κατασκευής μιας νέας βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Ε.Μ.Π. που φέρει σύστημα αισθητηρίου με σκοπό την ανάδραση δύναμης.

Στο πλαίσιο της κατασκευής του βελτιωμένου σχεδιασμού της μικρορομποτικής πλατφόρμας, μελετήθηκαν αρχικά τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν από τον προηγούμενο σχεδιασμό, με σκοπό τη μελέτη των περιορισμών που θα πρέπει να ακολουθηθούν στο νέο σχεδιασμό του μικρορομπότ. Παράλληλα παρουσιάζεται ο βελτιωμένος σχεδιασμός παραθέτοντας όλες τις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε επίπεδο του συστήματος του μικρορομπότ για τη αναβάθμισή του. Επίσης, παρουσιάζεται η συναρμολόγηση της νέας μικρορομποτικής πλατφόρμας.

Επιπλέον, μελετήθηκε θεωρητικά η υλοποίηση του συστήματος ανάδρασης δύναμης. Εξετάστηκαν οι δυνάμεις που μπορεί να ασκήσει το ρομπότ σε σταθερό αντικείμενο με ακίδα μεγάλης δυσκαμψίας. Σχεδιάστηκε κατάλληλο κύκλωμα για τη μέτρηση της δύναμης και κατασκευάστηκε ένα νέο επίπεδο 5 που φέρει όλα τα απαραίτητα ηλεκτρονικά στοιχεία που χρειάζονται για την ανάδραση δύναμης.

Τέλος κατασκευάστηκε και τοποθετήθηκε ο προτεινόμενος αισθητήρας δύναμης στο σύστημα της ρομποτικής πλατφόρμας και διεξήχθησαν πειράματα για τον έλεγχο της λειτουργίας του.

## **Abstract**

In this postgraduate thesis the manufacturing of an improved version of the micro-robot of the Automatic Control Laboratory of the NTUA is described. The improved version has a sensor system for the purpose of force feedback.

To manufacture the improved design of the micro-robotic platform, the limitations created by the previous design were initially studied, with the purpose of proposing guideline that should be followed in the new design of the micro-robot. At the same time, the improved design was presented, listing all the changes that were made at each level of the micro-robot system. The presentation of the assembly of the new micro-robotic platform is presented.

In addition, a theoretical study of the implementation of a force feedback system was carried out. The forces that the robot can exert on a fixed object with a high stiffness tip were found. A suitable circuit was designed to measure the force developed and a new level was constructed that has all the necessary electronic components.

Finally, the proposed force sensor was constructed and installed on the robotic platform. Experiments were carried out to control and its operation.

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου εργασίας καθηγητή κ. Ευάγγελο Παπαδόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετάσχω ενεργά στην ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου. Οι πολύπλευρες γνώσεις και οι χρήσιμες συμβουλές του με καθοδήγησαν έως και την ολοκλήρωση της εργασίας μου. Ομοίως, θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη συνεχή υποστήριξη και συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου, τον καθηγητή κ. Κώστα Βλάχο.

Συνεχίζοντας, θα ήθελα να εκφράσω ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη στο πρόσωπο του Κωνσταντίνου Καραϊσκού για την άψογη συνεργασία στην διάρκεια ολοκλήρωσης των εργασιών μας. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη την ομάδα των ανθρώπων που στελεχώνει το Εργαστήριο του Αυτομάτου Ελέγχου, που παρ' όλους τους χρονικούς περιορισμούς, υπήρξαν πρόθυμοι και διαθέσιμοι να συνεισφέρουν. Επιπλέον, δε θα μπορούσα να μη συμπεριλάβω στις ευχαριστίες, όλους τους φίλους μου εκτός εργαστηρίου που με στήριξαν και με ενθάρρυναν σε όλα μου τα βήματα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ειδικότερα τη μητέρα μου για την υποστήριξη της, έτσι ώστε να ολοκληρώσω τις μεταπτυχιακές σπουδές μου.

*Αφιερώνεται στη μητέρα μου*

# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	2
Abstract .....	3
Ευχαριστίες .....	4
Περιεχόμενα .....	6
Κατάλογος Εικόνων .....	8
Κατάλογος Σχημάτων.....	10
Κατάλογος Πινάκων .....	12
<b>1 Εισαγωγή.....</b>	<b>13</b>
1.1 Σκοπός Εργασίας .....	14
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	15
1.3 Δομή Εργασίας.....	16
<b>2 Βελτιωμένος μικρορομποτικός μηχανισμός.....</b>	<b>17</b>
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Μηχανισμός Μικροκίνησης .....	17
2.2.1 Μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας της πλατφόρμας.....	17
2.2.2 Αρχή λειτουργίας του μηχανισμού κίνησης της πλατφόρμας .....	18
2.2.3 Πλατφόρμα με δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές .....	19
2.2.4 Ανάλυση μονοδιάστατης κίνησης και εύρεση σχεδιαστικών παραμέτρων.....	20
2.3 Μελέτη υλοποίησης νέου βελτιωμένου μικρορομποτότ.....	21
2.3.1 Προβληματισμοί του σχεδιασμού της 2 <sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομποτότ.....	23
2.3.2 Βελτιωμένος σχεδιασμός της 2 <sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομποτότ.....	26
<b>3 Αρχιτεκτονική των επιπέδων 0, 1 και 2.....</b>	<b>31</b>
3.1 Εισαγωγή.....	31
3.2 Επίπεδο ελέγχου .....	31
3.2.1 Μικροελεγκτής και ρυθμιστής τάσης .....	32
3.2.2 Κεραία RF και Φίλτρο κεραίας .....	33
3.2.3 Υπόλοιπα ηλεκτρονικά .....	34
3.3 Επίπεδο τροφοδοσίας .....	35
3.3.1 Μονάδα διαχείρισης ισχύος (PMU).....	36
3.3.2 Πηγή ενέργειας και διακόπτης .....	36
3.4 Επίπεδο προγραμματισμού (Debugger).....	38
3.4.1 Μεταφορά δεδομένων και προγράμματος μεταξύ μικρορομποτότ και Η/Υ .....	38
3.4.2 Τροφοδότηση του συστήματος.....	39
<b>4 Αρχιτεκτονική των επιπέδων 3 και 4.....</b>	<b>41</b>
4.1 Εισαγωγή.....	41

4.2	Επίπεδο αισθητήρων.....	41
4.2.1	Αισθητήρες ταχύτητας .....	42
4.2.2	Αισθητήρες θέσης .....	44
4.3	Επίπεδο κινητήρων .....	45
4.3.1	Κινητήρες .....	46
4.3.2	Σημεία στήριξης του ρομπότ (βάση) και κατάλληλο δάπεδο κίνησης .....	47
<b>5</b>	<b>Αισθητήρας δύναμης .....</b>	<b>49</b>
5.1	Εισαγωγή.....	49
5.2	Μελέτη υλοποίησης συστήματος ανάδρασης δύναμης.....	49
5.2.1	Θεωρητική μελέτη ελάσματος.....	52
5.2.2	Σχεδιασμός αισθητηρίου δύναμης .....	53
5.3	Σχεδιασμός και κατασκευή συστήματος ανάδρασης δύναμης .....	54
5.3.1	Σχεδιασμός συστήματος ανάδρασης δύναμης.....	54
5.3.2	Κατασκευή συστήματος ανάδρασης δύναμης.....	58
5.3.3	Διεξαγωγή πειραμάτων .....	60
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία .....</b>	<b>65</b>
6.1	Συμπεράσματα .....	65
6.2	Μελλοντική Εργασία .....	65
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>67</b>
	<b>Παράρτημα Α: «Datasheets» .....</b>	<b>69</b>
	<b>Παράρτημα Β: «Σχηματικά 2<sup>ης</sup> έκδοσης μικρορομπότ» .....</b>	<b>70</b>

# Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1.	Επισκόπηση μικροχειραγώγησης ωαρίων χρησιμοποιώντας μικρο-ρομπότ σε ένα τσιπ.....	13
Εικόνα 1-2.	Τρία μαγνητικά κατευθυνόμενα μικρορομπότ συνεργάστηκαν για την κατασκευή αυτής της δομής από ράβδους άνθρακα. – SRI International.....	13
Εικόνα 1-3.	Πρωτότυπη μορφή Μικρορομπότ: α) πάνω όψη αυτόνομης πλατφόρμας.β) Πλάγια όψη αυτόνομης πλατφόρμας.....	14
Εικόνα 1-4.	2 <sup>η</sup> έκδοση του μικρορομπότ α) πάνω όψη αυτόνομης πλατφόρμας.β) Πλάγια όψη αυτόνομης πλατφόρμας.....	14
Εικόνα 1-5.	Απεικόνιση δύο μικρορομπότ στο χώρο εργασίας τους.....	15
Εικόνα 2-1.	Τελική μορφή απεικόνισης των τεσσάρων επιπέδων του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE [17].....	22
Εικόνα 2-2.	Επίπεδο 4: οπτικών αισθητήρων laser α) Απεικόνιση του στο πρόγραμμα EAGLE β) Απεικόνιση του σε πλάγια όψη [17]. ....	22
Εικόνα 2-3.	2 <sup>η</sup> έκδοση του μικρορομπότ α) πλάγια όψη αυτόνομης πλατφόρμας στο χώρο εργασίας του β) επίπεδο 0: προγραμματισμού του ρομπότ [17].....	23
Εικόνα 2-4.	Απεικόνιση του επιπέδου 2: τροφοδοσίας στο πρόγραμμα EAGLE.....	24
Εικόνα 2-5.	2 <sup>η</sup> έκδοση του μικρορομπότ α) πλάγια όψη μικρορομπότ β) σημεία στήριξης μικρορομποτικής πλατφόρμας.....	24
Εικόνα 2-6.	α) Απεικόνιση του επιπέδου 2: τροφοδοσίας β) δοκιμαστική πλακέτα κυκλώματος ανάγνωσης των αισθητηρίων QRE1113.....	25
Εικόνα 2-7.	Απεικόνιση της 2 <sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ με ενσωμάτωση του επιπέδου 0 συνδεδεμένο με τον H/Y.....	25
Εικόνα 2-8.	Τελική μορφή απεικόνισης των πέντε επιπέδων της βελτιωμένης 2 <sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.....	26
Εικόνα 2-9.	Απεικόνιση του επιπέδου 1 της βελτιωμένης 2 <sup>ης</sup> έκδοσης α) στο πρόγραμμα EAGLE β) Πλάγια όψη.....	27
Εικόνα 2-10.	Απεικόνιση του επιπέδου 2 της βελτιωμένης 2 <sup>η</sup> έκδοσης.....	27
Εικόνα 2-11.	Απεικόνιση του επιπέδου 3 της βελτιωμένης 2 <sup>η</sup> έκδοσης.....	28
Εικόνα 2-12.	Απεικόνιση του επιπέδου 4 της βελτιωμένης 2 <sup>ης</sup> έκδοσης.....	29
Εικόνα 2-13.	Απεικόνιση του επιπέδου 0 της βελτιωμένης 2 <sup>ης</sup> έκδοσης.....	29
Εικόνα 2-14.	Βελτιωμένη 2 <sup>η</sup> έκδοση του μικρορομπότ α) πάνω όψη αυτόνομης πλατφόρμας.β) Πλάγια όψη αυτόνομης πλατφόρμας.μας.....	30
Εικόνα 3-1.	Απεικόνιση του μικροελεγκτή CC430F6137, της Texas Instruments.....	32
Εικόνα 3-2.	Απεικόνιση του ρυθμιστή τάσης TPS780, της Texas Instruments.....	32
Εικόνα 3-3.	α) Απεικόνιση της κεραίας RF β) σχηματικό διάγραμμα της κεραίας.....	33
Εικόνα 3-4.	α) Απεικόνιση του φίλτρου κεραίας RF Balun β) σχηματικό διάγραμμα του φίλτρου Balun.....	33
Εικόνα 3-5.	α) Απεικόνιση του αναλογικού διακόπτη TS3A24 β) σχηματικό διάγραμμα του αναλογικού διακόπτη.....	34
Εικόνα 3-6.	Απεικόνιση της χρήσης των LEDs για επίτευξη της ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ δύο μικρορομπότ.....	35



Εικόνα 3-7.	Απεικόνιση της μπαταρία Li-Po 3.7 V.....	37
Εικόνα 3-8.	Απεικόνιση του διακόπτη του ρομπότ.....	37
Εικόνα 3-9.	Απεικόνιση της διάταξης προγραμματισμού του μικρομπότ.....	39
Εικόνα 3-10.	Φωτογραφική απεικόνιση του εξομοιωτή USB.....	39
Εικόνα 4-1.	Απεικόνιση του αισθητήριου ανάκλασης QRE1113GR, της Fairchild Semiconductor.....	42
Εικόνα 4-2.	Δοκιμαστική πλακέτα με τον διαφορικό συγκριτή τάσης LM393.....	43
Εικόνα 4-3.	Δοκιμαστική πλακέτα με τον hex inverting Schmitt trigger HEF40106B.....	43
Εικόνα 4-4.	α) Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης με το Schmitt trigger HEF40106B β) Πειραματικές μετρήσεις στον παλμογράφο.....	44
Εικόνα 4-5.	Απεικόνιση του οπτικού αισθητήρα laser ADNS-7550, της AVAGO Technologies.....	44
Εικόνα 4-6.	Διάταξη μετατροπής της τάσης σε 5V, της Sparkfun.....	45
Εικόνα 4-7.	Μικροκινητήρας δόνησης 304-100, της Precision Microdrives.....	46
Εικόνα 4-8.	Μονάδα οδήγησης των κινητήρων A3901, της Allegro.....	47
Εικόνα 4-9.	Απεικόνιση της κάτω όψης του επιπέδου 3 του μικρορομπότ.....	47
Εικόνα 4-10.	Επιφάνεια κίνησης της μικρορομποτικής πλατφόρμας.....	48
Εικόνα 4-11.	Νέα επιφάνεια κίνησης της μικρορομποτικής πλατφόρμας.....	48
Εικόνα 5-1.	Απεικόνιση βελτιωμένης 2 <sup>ης</sup> έκδοση του μικρορομπότ προσαρτημένης ακίδα μεγάλης δυσκαμψίας.....	49
Εικόνα 5-2.	Απεικόνιση του αισθητήρα δύναμης ATI NANO17.....	50
Εικόνα 5-3.	Απεικόνιση του επιμηκυνσιόμετρου SG-1/350-TY13, της OMEGA.....	54
Εικόνα 5-4.	Απεικόνιση του ενισχυτή AD620, της Analog Digital.....	56
Εικόνα 5-5.	Απεικόνιση του ενισχυτή LM358, της Texas Instruments.....	56
Εικόνα 5-6.	Απεικόνιση του μετατροπέα τάσης ADM8828, της Analog Digital.....	57
Εικόνα 5-7.	Τελική μορφή απεικόνισης εκτυπώσιμης μορφής επιπέδου 5.....	58
Εικόνα 5-8.	Τελική μορφή απεικόνισης της πλακέτας του κυκλώματος ανάγνωση του αισθητήρα.....	58
Εικόνα 5-9.	Βελτιωμένη έκδοση του μικρορομπότ με ενσωματωμένο το επίπεδο 5 α) πάνω όψη β) Πλάγια όψη.....	59
Εικόνα 5-10.	Τελική μορφή απεικόνισης της κατασκευή του αισθητήρα δύναμης.....	59
Εικόνα 5-11.	Απεικόνιση της τοποθέτησης του αισθητήρα δύναμης στο επίπεδο 2.....	59
Εικόνα 5-12.	Τελική μορφή απεικόνισης της βελτιωμένης έκδοση του μικρορομπότ με ενσωματωμένο τον αισθητήρα δύναμης.....	60
Εικόνα 5-13.	Απεικόνιση της πειραματική διάταξη για μέτρησης της δύναμης (πλάγια όψη).....	61
Εικόνα 5-14.	Απεικόνιση της πειραματική διάταξη για μέτρησης της δύναμης (πάνω όψη).....	61
Εικόνα 6-1.	Απεικόνιση βελτιωμένης έκδοση του μικρορομπότ στο χώρο εργασίας του.....	66

# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1.	Απλοποιημένο 2-Δ μοντέλο πλατφόρμας 1β.ε. [13].....	17
Σχήμα 2-2.	Διάγραμμα τριών φάσεων μετατόπισης της πλατφόρμας [13]. ....	19
Σχήμα 2-3.	Σχέδιο για πλατφόρμα δύο κινητήρων [13]. ....	19
Σχήμα 2-4.	Δυνάμεις που εφαρμόζονται στην πλατφόρμα δύο κινητήρων [13]. ....	20
Σχήμα 2-5.	Συνοπτική απεικόνιση των περιοχών ταχυτήτων του μικρορομπότ [13].....	20
Σχήμα 2-6.	Σχηματικό διάγραμμα του διηλεκτρικού υλικού (πλακέτα).....	27
Σχήμα 3-1.	Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 1 της βελτιωμένης 2 <sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.....	31
Σχήμα 3- 2.	Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 2 της βελτιωμένης 2 <sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.....	35
Σχήμα 3-3.	Σχηματικό διάγραμμα της μονάδας διαχείρισης ισχύος TPS65721, της Texas Instruments.....	36
Σχήμα 3-4.	Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 0 της βελτιωμένης 2 <sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.....	38
Σχήμα 3-5.	Σχηματικό διάγραμμα της διόδου LTC4415, της AnalogueDigital. ....	40
Σχήμα 4-1.	Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 4 της βελτιωμένης 2 <sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.....	41
Σχήμα 4-2.	Σχηματικό διάγραμμα διαφορικού συγκριτή τάσης LM393, της Texas Instruments. ....	42
Σχήμα 4-3.	Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 3 της βελτιωμένης 2 <sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.....	45
Σχήμα 4-4.	Σχηματικό διάγραμμα A3901 ελέγχου δύο κινητήρων συνεχούς ρεύματος. ..	47
Σχήμα 5-1.	Πειραματικά αποτελέσματα μέτρησης δύναμης του ρομπότ με ακίδα μεγάλης δυσκαμψίας για $g_{rm}=\max$ . ....	50
Σχήμα 5-2.	Μεγενθυμένη απεικόνιση των πειραματικών αποτελεσμάτων μέτρησης δύναμης του ρομπότ με ακίδα μεγάλης δυσκαμψίας για $g_{rm}=\max$ . ....	50
Σχήμα 5-3.	Πειραματικά αποτελέσματα μέτρησης δύναμης του ρομπότ με ακίδα μεγάλης δυσκαμψίας για $g_{rm}=\text{medium}$ .....	51
Σχήμα 5-4.	Μεγενθυμένη απεικόνιση των πειραματικών αποτελεσμάτων μέτρησης δύναμης του ρομπότ με ακίδα μεγάλης δυσκαμψίας για $g_{rm}=\text{medium}$ . ....	51
Σχήμα 5-5.	α) Βάση αλουμινίου πάνω στην οποία τοποθετείται η βελόνη. β) Το φυσικό μοντέλο της βάσης[].....	52
Σχήμα 5-6.	Βάση πάνω στην οποία τοποθετείται η βελόνη [13].....	52
Σχήμα 5-7.	Βάση ελάσματος με προσθήκη επιμηκυνσιόμετρου [13]. ....	53
Σχήμα 5-8.	Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 5 της βελτιωμένης 2 <sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.....	55
Σχήμα 5-9.	Σχηματικό διάγραμμα του ενισχυτή LM358, της Texas Instruments.....	57
Σχήμα 5-10.	Σχηματικό διάγραμμα του μετατροπέα τάσης ADM8828.....	57
Σχήμα 5-11.	Διάγραμμα 1 <sup>ου</sup> πειραμάτος μέτρησης της δύναμης του προτεινόμενου αισθητήρα αναδρασης δύναμης και του εξωτερικού αισθητήρα ATI NANO17.....	62

Σχήμα 5-12.	Φιλτραρισμένο διάγραμμα 1 <sup>ου</sup> πειραμάτος μέτρησης της δύναμης του προτεινόμενου αισθητήρα αναδρασης δύναμης και του εξωτερικού αισθητήρα ATI NANO17.....	62
Σχήμα 5-13.	Διάγραμμα 2 <sup>ου</sup> πειραμάτος μέτρησης της δύναμης του προτεινόμενου αισθητήρα αναδρασης δύναμης και του εξωτερικού αισθητήρα ATI NANO17.....	63
Σχήμα 5-14.	Φιλτραρισμένο διάγραμμα 2 <sup>ου</sup> πειραμάτος μέτρησης της δύναμης του προτεινόμενου αισθητήρα αναδρασης δύναμης και του εξωτερικού αισθητήρα ATI NANO17.....	63
Σχήμα 5-15.	Διάγραμμα 3 <sup>ου</sup> πειραμάτος μέτρησης της δύναμης του προτεινόμενου αισθητήρα αναδρασης δύναμης και του εξωτερικού αισθητήρα ATI NANO17.....	64
Σχήμα 5-16.	Φιλτραρισμένο διάγραμμα 3 <sup>ου</sup> πειραμάτος μέτρησης της δύναμης του προτεινόμενου αισθητήρα αναδρασης δύναμης και του εξωτερικού αισθητήρα ATI NANO17.....	64

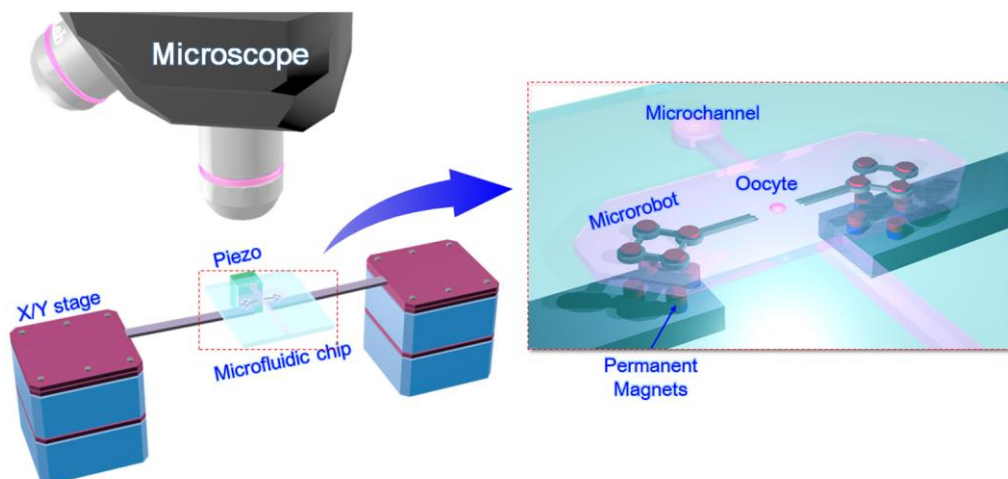
## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1. Τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή CC430F6137 [17]. .....	32
Πίνακας 3-2. Τεχνικά χαρακτηριστικά της πηγής ενέργειας του συστήματος. ....	36
Πίνακας 3-3. Τεχνικά χαρακτηριστικά του διακόπτη του ρομπότ. ....	37
Πίνακας 3-4. Τεχνικά χαρακτηριστικά της διόδου LTC4415, της Analog Digital. ....	39
Πίνακας 5-1. Τιμές παραμέτρων ελάσματος αλουμινίου. ....	53

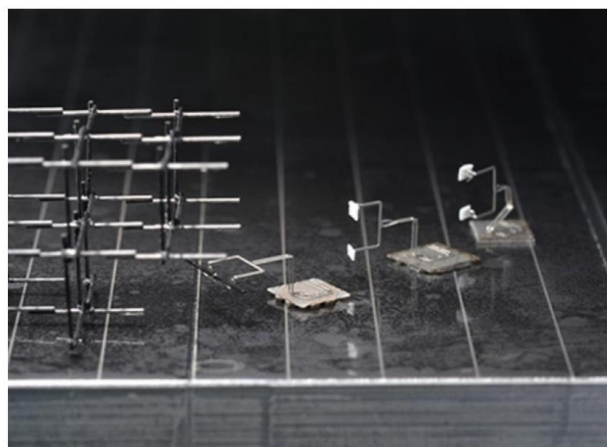
# 1 Εισαγωγή

Η μικρορομποτική είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο που συνδυάζει πτυχές της ρομποτικής, της μικροτεχνολογίας και νανοτεχνολογίας, της βιοϊατρικής μηχανικής και της επιστήμης των υλικών. Λόγω των τεράστιων ανακαλύψεων στη συμβατική ρομποτική και στην τεχνολογία των μικροσυστημάτων (microsystem technology) (MST) υπάρχει μια αυξανόμενη ανάγκη για μικροσκοπικά (miniaturized) ρομπότ (μικρά σε μέγεθος, της τάξεως των τετραγωνικών εκατοστών  $cm^2$ ) και μικρορομπότ παγκοσμίως.

Η ανάπτυξη τηλεχειριζόμενων ή αυτόνομων μικρο-ρομπότ θα οδηγήσει σε βελτιώσεις σε πολλούς τομείς. Αναμένονται θετικά αποτελέσματα στην ιατρική (μικροχειρουργική), στον κατασκευαστικό τομέα (manufacturing) (μικροσυναρμολόγηση, επιθεώρηση και συντήρηση), στη βιολογία (χειρισμός κυττάρων) και στην τεχνική μέτρησης δοκιμών VLSI. Ο μικροχειρισμός από τα μικρορομπότ έχει καταστεί ζήτημα πρωταρχικής σημασίας στη βιομηχανία και τη βιοϊατρική, καθώς τα ανθρώπινα όρια περιορίζονται σε ορισμένες ανοχές. Ο χειρισμός βιολογικών κυττάρων, βλ. Εικόνα 1-1, ή η συναρμολόγηση ενός μικροσυστήματος που αποτελείται από διάφορα μικροσυστατικά είναι καλά παραδείγματα, βλ. Εικόνα 1-2.



Εικόνα 1-1. Επισκόπηση μικροχειραγώγησης ωαρίων με χρήση μικρο-ρομπότ σε τσιπ.

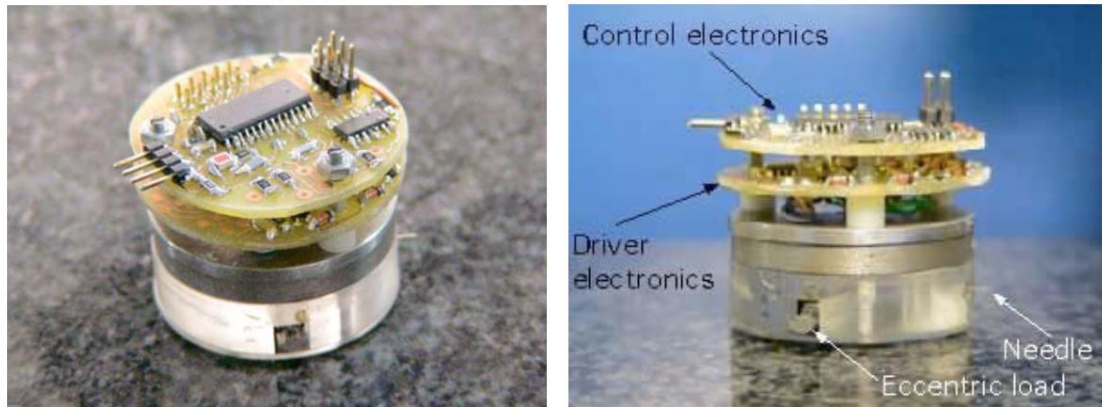


Εικόνα 1-2. Τρία μαγνητικά κατευθυνόμενα μικρορομπότ συνεργάστηκαν για την κατασκευή αυτής της δομής από ράβδους άνθρακα. – SRI International.

## 1.1 Σκοπός Εργασίας

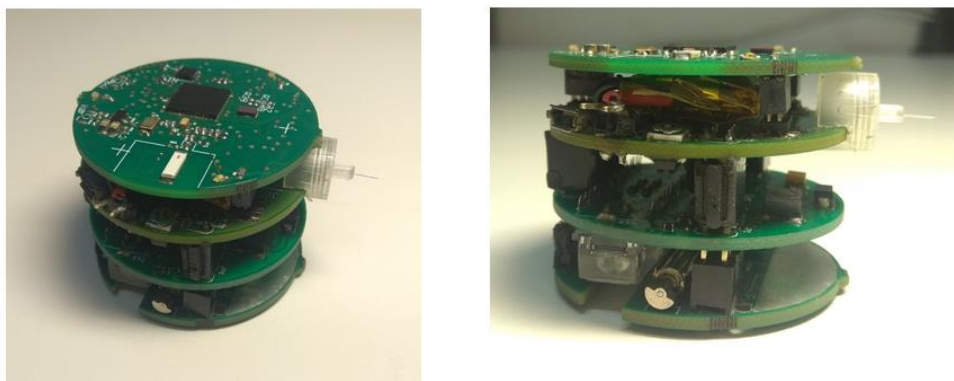
Μια τέτοια προσπάθεια κατασκευής μικρορομποτικού συστήματος, έχει γίνει στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ. Στην διδακτορική διατριβή [14] κατασκευάστηκε μια πρωτότυπη μορφή του μικρορομποτικού μηχανισμού, ο οποίος έχει σχεδιαστεί να εκτελεί μικροσκοπική επίπεδη κίνηση της τάξεως μεγέθους 1mm χάρη σε δύο φυγοκεντρικούς κινητήρες πολύ μικρών διαστάσεων.

Στην πρωτότυπη μορφή του, το μικρορομπότ είχε περιορισμένη ενεργειακή αυτονομία καθώς και χαμηλή επεξεργαστική ισχύ, που έθεταν περιορισμούς στη λειτουργία του. Στην Εικόνα 1-3 απεικονίζεται η πρώτη έκδοση του μικρορομπότ.



**Εικόνα 1-3. Πρωτότυπη μορφή Μικρορομπότ: α) πάνω όψη αυτόνομης πλατφόρμας.β) Πλάγια όψη αυτόνομης πλατφόρμας.**

Στις εργασίες [16] και [18] πραγματοποιήθηκε αναβάθμισή του με την κατασκευή της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ και ενσωμάτωση μίας επιπλέον βαθμίδας ηλεκτρονικών που φέρει οπτικούς αισθητήρες laser ειδικευμένους στην ανάγνωση θέσης, βλ. Εικόνα 1-4. Η εισαγωγή του επιπλέον επιπέδου με τους οπτικούς αισθητήρες δίνει τη δυνατότητα στο μικρορομπότ να αναγνωρίζει τη θέση του και να κατευθύνεται ελεγχόμενα με οποιοδήποτε προσανατολισμό στη θέση κάτω από το μικροσκόπιο. Επίσης, δόθηκε έμφαση και στην εξέλιξη της ασύρματης επικοινωνίας, ώστε το μικρορομπότ να μπορεί να ανταλλάσσει πληροφορίες με τον Η/Υ δηλώνοντας τη θέση του. Η έκδοση αυτή πρόσφερε μια σημαντική τεχνολογική βάση ώστε να μπορούν να σχεδιαστούν νέα πειράματα που αφορούν τον έλεγχο θέσης του, με τα οποία ασχολήθηκε η μεταπτυχιακή εργασία [17].



**Εικόνα 1-4. 2<sup>η</sup> έκδοση του μικρορομπότ α) πάνω όψη αυτόνομης πλατφόρμας β) Πλάγια όψη αυτόνομης πλατφόρμας.**

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης της μικρορομποτικής πλατφόρμας η οποία θα φέρει και αισθητήριο με δυνατότητα ανάδρασης δύναμης. Η σχεδιαστική μελέτη και κατασκευή της βελτιωμένης έκδοσης ήταν σημαντικό να γίνει, καθώς διευκολύνει τη λειτουργία του ακόμα περισσότερο και δίνει τη δυνατότητα για την ενσωμάτωση ενός επιπέδου που θα φέρει τα απαραίτητα ηλεκτρονικά για να πραγματοποιείται ανάδραση δύναμης.

Η εισαγωγή του επιπλέον επιπέδου με αισθητήριο δύναμης δίνει τη δυνατότητα στο μικρορομπότ να μπορεί να μετακινεί φορτία που περιλαμβάνονται στα πλαίσια των εφαρμογών του και να εξασκεί ελεγχόμενες ομαλές δυνάμεις που παρουσιάζουν μικρή κυμάτωση (απαλλαγμένες από κρουστικές συμπεριφορές), σε σταθερά ή ελεύθερα αντικείμενα. Η δυνατότητα αυτή είναι πολύ σημαντική για διάφορους τύπους μικροχειρισμών όπως η σύνδεση μικροαντικειμένων, κοπή, κ.τ.λ.

Η ενσωμάτωση του αισθητηρίου αυτού θα ωθήσει το σχεδιασμό και την εκτέλεση πιο απαιτητικών και σύνθετων πειραμάτων κάτω από το μικροσκόπιο. Η ενσωμάτωσή της βαθμίδα αυτής, θα αποτελέσει σημαντικό βήμα στην ακόμα μεγαλύτερη αυτονομία του. Για την υλοποίηση της αναβάθμισης αυτής, ήταν απαραίτητο η εκμάθηση προγραμμάτων σχεδιασμού τυπωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (PCB) καθώς και η ανάπτυξη προγράμματος ανάγνωσης των αισθητήρων από τον μικροελεγκτή του ρομπότ. Η βελτιωμένη 2<sup>η</sup> έκδοση του ρομπότ θα αποτελέσει τη βάση και το έναυσμα ώστε να εκτελεστούν σύνθετα πειράματα συνεργατικού χαρακτήρα, βλ. Εικόνα 1-5.



Εικόνα 1-5. Απεικόνιση δύο μικρορομπότ στο χώρο εργασίας τους

## 1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η βιβλιογραφία που μελετήθηκε και συντέλεσε τη συγγραφή αυτής της εργασίας περιλαμβάνει πρωτίστως προηγούμενες δημοσιεύσεις και εργασίες πάνω στο μικρορομποτικό μηχανισμό του εργαστηρίου,

Στις δημοσιεύσεις και τις εργασίες [7], [8], [13], [14], [18] και [19] που αφορούσαν το μικρορομπότ του εργαστηρίου παρουσιάστηκαν οι αρχές και ο τρόπος λειτουργίας του καθώς και η πρώτη κατασκευαστική του δομή. Στις παραπάνω εργασίες στηρίχθηκε μια πολύ σημαντική μελέτη [15] που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο μεταπτυχιακής εργασίας στο εργαστήριο του Αυτόματου Ελέγχου του Ε.Μ.Π, που είχε ως σκοπό την υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ χρήστη και της αναβαθμισμένης έκδοσης του μικρορομπότ.

Η συνέχεια της προηγούμενης μελέτης πραγματοποιήθηκε με τη διπλωματική εργασία [17] όπου σχεδιάστηκε νέο επίπεδο για το μικρορομπότ που φέρει οπτικούς αισθητήρες laser. Παράλληλα με την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε και η συμπληρωματική μεταπτυχιακή εργασία [16].

Συγχρόνως μελετήθηκαν οι δημοσιεύσεις [9], [10] στις οποίες παρουσιάζεται η υλοποίηση και ανάπτυξη συστήματος ανάγνωσης της δύναμης που ασκεί η μικρορομποτική πλατφόρμα, ενώ παράλληλα έγινε και η μελέτη των άλλων δημοσιεύσεων [1], [2], [3], [4], [6] και [12] που αφορούσαν την ανάπτυξη μικρορομποτικών μηχανισμών για το μικροχειρισμό αντικειμένων.

Τέλος, ήταν απαραίτητη η μελέτη των τεχνικών φύλλων δεδομένων (datasheet) των ηλεκτρονικών που επιλέχθηκαν. Πιο συγκεκριμένα των μικροελεγκτών της Texas Instrument (TI) της οικογένειας CC430 [24], του οπτικού αισθητήρα ADNS-7550 [23], του ρυθμιστή τάσης TPS780 [28], του Schmitt trigger HEF40106B [26], του instrumentation amplifier AD620 [21], της μονάδας διαχείρισης της τροφοδοσίας TPS65721 [27] και των κινητήρων δόνησης [28].

### 1.3 Δομή Εργασίας

Η εργασία αναπτύσσεται σε έξι κεφάλαια. Το **πρώτο** περιλαμβάνει την εισαγωγή και αναφέρεται στο σκοπό συγγραφής της και στη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Το **δεύτερο** κεφάλαιο παραθέτει εισαγωγικά στοιχεία θεωρίας σχετικά με το μηχανισμό κίνησης του μικρορομπότ που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ. Επιπλέον περιλαμβάνει, τους σχεδιαστικούς και κατασκευαστικούς προβληματισμούς που προέκυψαν από την εκτενέστερη μελέτη της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ καθώς και τη σχεδιαστική μελέτη, την κατασκευή και τη συναρμολόγηση της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ.

Στο **τρίτο** και **τέταρτο** κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή της σχεδιαστικής μελέτης και της κατασκευής του βελτιωμένου μικρορομπότ. Περιγράφονται αναλυτικά η αρχιτεκτονική όλων των επιπέδων από τα οποία αποτελείται το μικρορομπότ και παρατίθενται τα ηλεκτρονικά και η λειτουργία τους. Στο **πέμπτο** κεφάλαιο περιγράφεται η μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την κατασκευή του αισθητηρίου ανάδρασης της δύναμης αλλά και του κυκλώματος επεξεργασίας των σημάτων του. Παρουσιάζεται ένα καινούργιο επίπεδο του μικρορομπότ φέρει το κύκλωμα αυτό και τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν από την ενσωμάτωσή του στην βελτιωμένη μικρορομποτική πλατφόρμα.

Τέλος στο **έκτο** κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη που παρουσιάστηκε στην εργασία και η προτεινόμενη μελλοντική εργασία για τη βελτίωση της λειτουργίας του μικρορομπότ.



## 2 Βελτιωμένος μικρορομποτικός μηχανισμός

### 2.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί το συνδυαστικό κρίκο ανάμεσα στις προηγούμενες ερευνητικές μελέτες που αναπτύχθηκαν στο μικρορομποτό και την παρούσα.

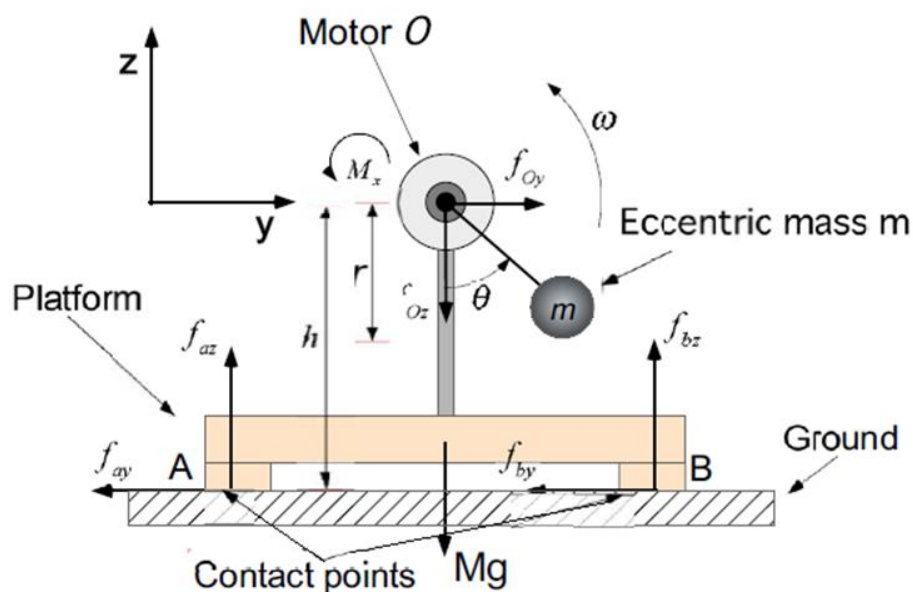
Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να παραθέσει τα σημαντικά στοιχεία της θεωρίας καθώς και τις απαραίτητες πληροφορίες για το μικρορομποτό ώστε να διευκολύνει τον αναγνώστη στην κατανόηση της παρούσας εργασίας. Τα κύρια σημεία του κεφαλαίου είναι η συνοπτική περιγραφή του πρωτότυπου μηχανισμού κίνησης του μικρορομποτό, η παρουσίαση των προβληματισμών που προέκυψαν από τη σχεδιαστική μελέτη της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομποτό και η πρόταση για σχεδιασμό της βελτιωμένης έκδοσης.

### 2.2 Μηχανισμός Μικροκίνησης

Οι βασικές αρχές λειτουργίας του μοντέλου κίνησης περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια. Η μελέτη και η ανάλυση του μηχανισμού κίνησης του μικρορομποτό έγινε στη διδακτορική διατριβή [13]. Στην έρευνα αυτή, έγινε η ανάπτυξη του θεωρητικού μοντέλου η οποία εφαρμόζεται σε δονούμενη πλατφόρμα που φέρει δύο κινητήρες με έκκεντρο φορτίο. Η εφαρμογή αυτού του μοντέλου πραγματοποιείται με την κατασκευή της μικρορομποτικής πλατφόρμας.

#### 2.2.1 Μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας της πλατφόρμας

Για την ανάλυση και τη μελέτη της επενέργησης των φυγοκεντρικών δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας. Για την διευκόλυνση της ανάλυσης των δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε ένα διδιάστατο απλοποιημένο μοντέλο της πλατφόρμας ενός β.ε., βλ. Σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-1. Απλοποιημένο 2-Δ μοντέλο πλατφόρμας 1β.ε. [13].

Στο μοντέλο αυτό θεωρήθηκε ότι η πλατφόρμα θα κινηθεί κατά τον άξονα  $y$  και ότι το έκκεντρο μάζας  $m$  του κινητήρα, περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  γύρω από το σημείο  $O$ . Έτσι με τις παραδοχές αυτές από την ανάλυση δυνάμεων προκύπτουν για τις δυνάμεις επενέργειας  $f_{Oy}$ ,  $f_{Oz}$ , οι εξής τύποι [13]:

$$f_{Oy} = m\omega^2 r \sin \theta \quad (2-1)$$

$$f_{Oz} = -mg - m\omega^2 r \cos \theta \quad (2-2)$$

όπου  $r$  το μήκος αβαρούς ράβδου που συνδέει τον άξονα του κινητήρα με το έκκεντρο και  $\theta$  η γωνία του διαγράφει το έκκεντρο.

Οι δυνάμεις  $f_{Oy}$ ,  $f_{Oz}$ , ονομάζονται φυγοκεντρικές δυνάμεις επενέργειας και εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής  $\omega$ .

## 2.2.2 Αρχή λειτουργίας του μηχανισμού κίνησης της πλατφόρμας

Με την ανάλυση των δυνάμεων είναι πλέον δυνατή η περιγραφή και η ανάλυση της αρχής λειτουργίας του μηχανισμού κίνησης.

Οι φυγοκεντρικές δυνάμεις επενέργειας σε συνδυασμό με τις δυνάμεις τριβής, που αναπτύσσονται στα σημεία επαφής της πλατφόρμας  $A$  και  $B$ , είναι υπεύθυνες για την κίνηση της πλατφόρμας. Για τις τριβές αυτές υιοθετείται μοντέλο τριβής Coulomb με μέγιστο συντελεστή στατικής τριβής  $\mu_r$  ίσο με το συντελεστή τριβής ολίσθησης  $\mu_{ολ}$ , ( $\mu_r = \mu_{ολ} = \mu$ ). Δεδομένου ότι η πλατφόρμα μπορεί να κινηθεί μόνο κατά τη διεύθυνση του άξονα  $y$ , οι εξισώσεις κίνησης προκύπτουν από τις παρακάτω εξισώσεις [13]:

$$\sum F_y = M\ddot{y} \Rightarrow M\ddot{y} = f_{Oz} - \mu(f_{az} + f_{bz}) \quad (2-3)$$

$$\sum F_z = 0 \Rightarrow f_{az} + f_{bz} = f_{Oz} - Mg + f_{Oz} = 0 \quad (2-4)$$

$$\sum M_x = 0 \Rightarrow M_x + \frac{1}{2}f_{bz} + \frac{1}{2}f_{az} - hf_{Oy} + h_{CM}f_{ay} + h_{CM}f_{by} = 0 \quad (2-5)$$

όπου  $\mu$  ο συντελεστής τριβής,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $M$  η μάζα της πλατφόρμας,  $h$  το ύψος του κινητήρα από το έδαφος και  $h_{CM}$  η απόσταση του κέντρου μάζας από το δάπεδο.

Η συνολική κατακόρυφη αντίδραση  $N$  δίνεται από τη σχέση:

$$N = Mg - f_{Oy} \quad (2-6)$$

Η μονόπλευρη αυτή μετατόπιση της πλατφόρμας οφείλεται στη διαφορά φάσης  $\pi/2$  μεταξύ των δυνάμεων  $f_{Oy}$  και  $N$  και στον τρόπο που αυτές μεταβάλλονται καθώς το έκκεντρο διαγράφει πλήρη κύκλο λειτουργία.

Έτσι ανάλογα τη φορά περιστροφής του έκκεντρου καθορίζεται και η φορά μετατόπισης της πλατφόρμας. Στο Σχήμα 2-2 διακρίνονται για τις διάφορες γωνίες του έκκεντρου οι τρεις φάσεις της μετατόπισης της πλατφόρμας.

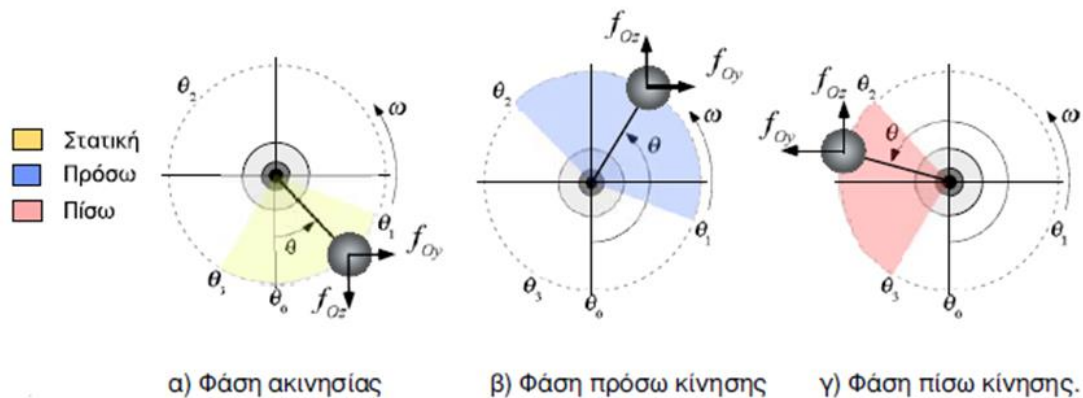
Για γωνία εκκίνησης  $\theta_0 = 0$  rad η οριζόντια δύναμη επενέργειας είναι  $f_{Oy} = 0$  N. Επομένως η συνισταμένη των δυνάμεων κατά τον άξονα  $y$  είναι μηδέν και λέμε ότι η πλατφόρμα βρίσκεται στη *φάση ακινησίας*.

Όσο συνεχίζει να αυξάνει η γωνία  $\theta$ , η  $f_{Oy}$  γίνεται μεγαλύτερη από την τριβή Coulomb. Στο σημείο αυτό δημιουργείται επιτάχυνση, αναπτύσσεται ταχύτητα και η πλατφόρμα μετατοπίζεται στα θετικά του άξονα  $y$ . Η πλατφόρμα κινείται και λέγεται ότι εκτελεί *πρόσω κίνηση*.

Όταν το έκκεντρο περάσει τη γωνία  $\pi$  rad η οριζόντια δύναμη  $f_{Oy}$  γίνεται αρνητική και παράλληλα με τις τριβές επιβραδύνει την πλατφόρμα. Για  $\theta = \theta_2$  η ταχύτητα της πλατφόρμας

μηδενίζεται και η κίνηση αντιστρέφεται. Στη φάση αυτή λέγεται ότι η πλατφόρμα εκτελεί *πίσω κίνηση*.

Καθώς η γωνία του έκκεντρου πλησιάζει τα  $2\pi$  rad η οριζόντια δύναμη επενέργησης μειώνεται ενώ η κατακόρυφη δύναμη αυξάνεται. Σταδιακά η πλατφόρμα επιβραδύνει έως ότου η κίνησή της σταματήσει. Ο χρόνος που απομένει να κινηθεί η πλατφόρμα προς τα πίσω προτού επιβραδυνθεί και ακινητοποιηθεί είναι μικρός και η μετατόπιση που προκύπτει είναι μικρότερη σε σχέση με τη μετατόπιση που προέκυψε κατά την πρόσω κίνηση. Έτσι, για ανθρωπολογιακή περιστροφή του έκκεντρου με σταθερή ταχύτητα  $\omega$ , η καθαρή μετατόπιση κατά μήκος του άξονα  $y$ , που προκύπτει κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας, είναι *θετική*.

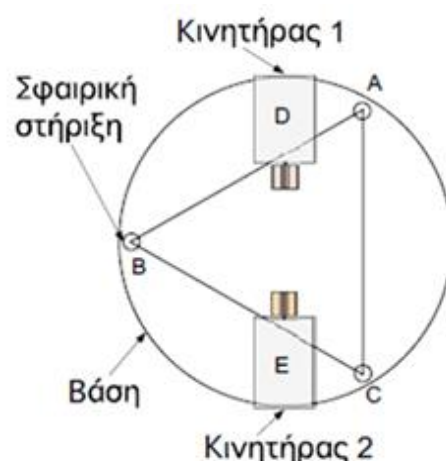


Σχήμα 2-2. Διάγραμμα τριών φάσεων μετατόπισης της πλατφόρμας [13].

### 2.2.3 Πλατφόρμα με δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές

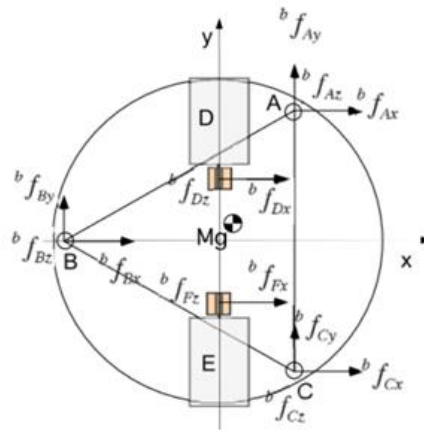
Η πλατφόρμα με τους δύο κινητήρες μπορεί να κινηθεί από οποιοδήποτε αρχικό σημείο  $x_i, y_i, \theta_i$  σε οποιοδήποτε τελικό  $x_f, y_f, \theta_f$ , βλ. Σχήμα 2-3.

Το σύστημα αυτό είναι μη ολόνομο καθώς οι δύο επενεργητές δεν πληρούν τις προϋποθέσεις για πλήρως ελεγχόμενη τοπικά κίνηση, όμως υπάρχει η δυνατότητα για έλεγχο  $x, y, \theta$  της κίνησης μετά από κάποια διαδρομή.



Σχήμα 2-3. Σχέδιο για πλατφόρμα δύο κινητήρων [13].

Οι δυνάμεις που ασκούνται στην πλατφόρμα με δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές απεικονίζονται στο Σχήμα 2-4.



Σχήμα 2-4. Δυνάμεις που εφαρμόζονται στην πλατφόρμα δύο κινητήρων [13].

Εάν υποθεθεί ότι το γεωμετρικό κέντρο της πλατφόρμας συμπίπτει με το κέντρο μάζας τότε, όταν οι κινητήρες D, E στρέφονται ομόρροπα, η πλατφόρμα τείνει να περιστραφεί γύρω από τον κατακόρυφο άξονα που διέρχεται από το κέντρο μάζας. Αντίστοιχα όταν οι μικροκινητήρες κινούνται αντίρροπα η πλατφόρμα τότε τείνει να κινηθεί προς τα θετικά του άξονα x.

Οι δυνάμεις και οι ροπές επενέργησης δίνονται από τις εξ. (2-7) έως (2-12) [13], όπου  $i=\{d,e\}$ ,  $\varphi_d = 90^\circ$ ,  $\varphi_e = -90^\circ$ ,  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα της έκκεντρης μάζας σε κάθε κινητήρα και  $r$  η εκκεντρότητα της αζυγοστάθμητης μάζας  $m$ .

$${}^b f_{ix} = m_i r_i \sin \varphi_i \sin \theta \quad (2-7)$$

$${}^b f_{iy} = 0 \quad (2-8)$$

$${}^b f_{iz} = -m_i g - m_i r_i \omega_i^2 \cos \theta \quad (2-9)$$

$${}^b n_{ix} = 0 \quad (2-10)$$

$${}^b n_{iy} = -m_i g r_i \sin \varphi_i \sin \theta \quad (2-11)$$

$${}^b n_{iz} = 0 \quad (2-12)$$

### 2.2.4 Ανάλυση μονοδιάστατης κίνησης και εύρεση σχεδιαστικών παραμέτρων

Ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής των επενεργητών η πλατφόρμα μπορεί να βρεθεί σε τρεις διαφορετικές κινητικές καταστάσεις, βλ. Σχήμα 2-5. Οι καταστάσεις αυτές είναι:



Σχήμα 2-5. Συνοπτική απεικόνιση των περιοχών ταχυτήτων του μικροροπότ [13].

Για  $\omega$  μικρό, η πλατφόρμα είναι στατική σε όλη τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας.

Για  $\omega$  μεγαλύτερο, η πλατφόρμα ολισθαίνει. Όταν συμβαίνει αυτό, εμφανίζονται δύο υποπεριπτώσεις: (α) δεν προκύπτει καθαρή μετατόπιση ανά κύκλο λειτουργίας. Η πλατφόρμα ταλαντώνεται γύρω από ένα σταθερό σημείο και (β) για λίγο μεγαλύτερο  $\omega$  η πλατφόρμα ολισθαίνει και παρουσιάζει καθαρή μετατόπιση ανά κύκλο λειτουργίας. Αυτή είναι η περίπτωση με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Για  $\omega$  μεγαλύτερο από μια κρίσιμη τιμή, η πλατφόρμα αναπηδά.

Όταν η πλατφόρμα βρίσκεται στην περιοχή ολίσθησης μπορεί να επιτευχθεί ελεγχόμενη οδήγηση. Η αρχή αυτή οδήγησε στην συσχέτιση της ταχύτητας περιστροφής των επενεργητών ανάλογα με την κινητική κατάσταση (γραμμική ή περιστροφική κίνηση) καθώς και στον προσδιορισμό του εύρους ταχυτήτων όπου η πλατφόρμα λειτουργεί στην περιοχή αυτή.

Ο σχεδιασμός της μικρορομποτικής πλατφόρμας πρέπει να επιδιώκει τη μεγιστοποίηση του εύρους  $[\omega_k, \omega_{av}]$  που αποτελεί το ωφέλιμο εύρος επενέργησης. Όμως για λόγους απλότητας στην ανάλυση αυτή μεγιστοποιείται το εύρος  $[\omega_{ol}, \omega_{av}]$ , επειδή η διαφορά μεταξύ  $\omega_{ol}$  και  $\omega_k$  είναι μικρή.

Για να εξασφαλιστεί ελεγχόμενη ολίσθηση πρέπει να ισχύει [13]:

$$\omega_{ol\_min} < \omega_{av\_min}$$

Για απλή γραμμική κίνηση πρέπει να ισχύει:

$$\sqrt{\frac{g(M+3m)\lambda_1}{2mr\sqrt{\lambda_1^2+1}}} < k \sqrt{\frac{g(M+3m)\lambda_2}{mr\sqrt{\lambda_2^2+1}}} \quad (2-13)$$

Για απλή περιστροφική κίνηση πρέπει να ισχύει:

$$\frac{2\mu H}{\sqrt{(2\mu H)^2 + (\sqrt{3}d_1 + 3d_2)^2}} < \frac{g(m+M/3)}{mr} \quad (2-14)$$

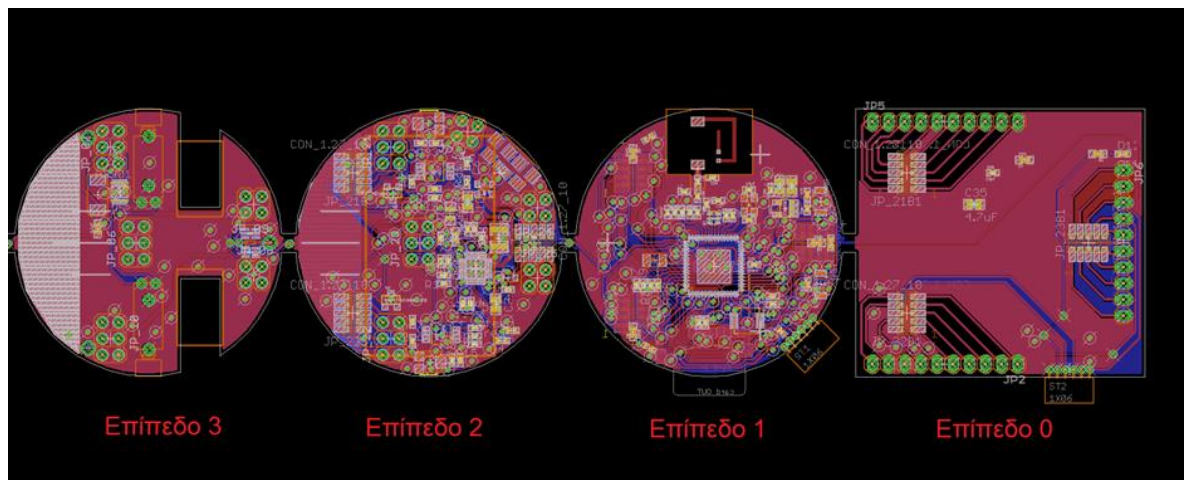
όπου  $m$  η μάζα του έκκεντρου,  $M$  η μάζα της πλατφόρμας,  $r$  η ακτίνα αζυγοσταθμίας,  $H$  το ύψος του τριγώνου της βάσης,  $d_1$  είναι το ήμισυ της βάσης του τριγώνου  $d_2$  η απόσταση του κέντρου της πλατφόρμας από τη βάση,  $\lambda_1 = 2\mu/\sqrt{3}$  και  $\lambda_2 = 2H/\sqrt{3}h_{cm}$

## 2.3 Μελέτη υλοποίησης νέου βελτιωμένου μικρορομπότ

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ, οι προβληματισμοί που προέκυψαν και η πρόταση ενός βελτιωμένου σχεδιασμού της έκδοσης αυτής. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή του, υπογραμμίζεται ότι υλοποιήθηκε στο πλαίσιο των εργασιών [15], [17] και πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο του Αυτομάτου Ελέγχου.

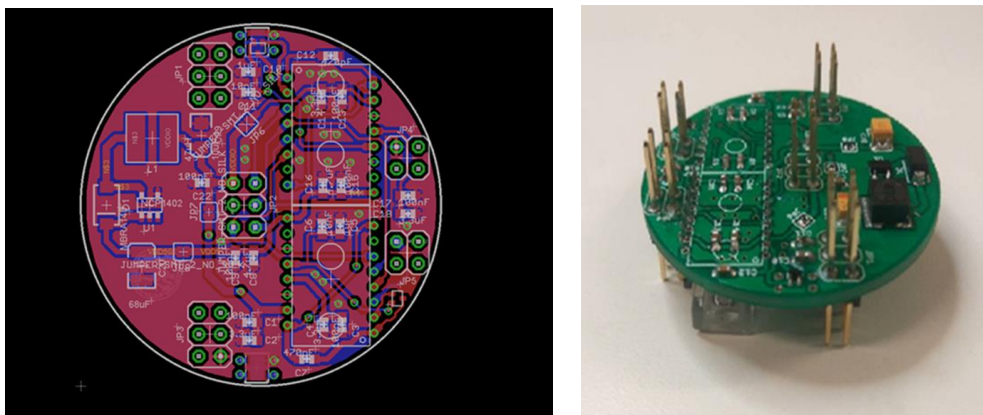
Για την κατασκευή των πλακετών (PCB) του μικρορομπότ, οι οποίες αποτελούν τα επίπεδα της δομής του, σχεδιάστηκε πρώτα το σχηματικό διάγραμμα των κυκλωμάτων. Τα σχηματικά διαγράμματα της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ παρατίθενται στο Παράρτημα Α στο τέλος της εργασίας καθώς είχαν παρουσιαστεί στην Διπλωματική Εργασία [17]. Ο σχεδιασμός έγινε σύμφωνα με την επιλογή των ηλεκτρονικών και τις ενδεικνυόμενες σχεδιαστικές κατευθύνσεις των εγχειρίδιων χρήσης των ενσωματωμένων κυκλωμάτων καθώς και τις τεχνικές σημειώσεις που προσφέρονται από τις κατασκευάστριες εταιρίες. Για το σχεδιασμό των διαγραμμάτων είχε χρησιμοποιηθεί το λογισμικό, EAGLE της Autodesk.

Παρακάτω δίνεται η τελική μορφή απεικόνισης των τεσσάρων επιπέδων του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE, βλ. Εικόνα 2-1. Τα επίπεδα αυτά είναι με αριθμητική σειρά: επίπεδο 0 (επίπεδο προγραμματισμού του μικρορομπότ), επίπεδο 1 (επίπεδο ελέγχου), επίπεδο 2 (επίπεδο τροφοδοσίας) και επίπεδο 3 (επίπεδο κινητήρων).



**Εικόνα 2-1. Τελική μορφή απεικόνισης των τεσσάρων επιπέδων του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE [17].**

Στην διπλωματική εργασία [17] σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε το επίπεδο 4 (επίπεδο αισθητήρων), βλ. Εικόνα 2-2, που φέρει τους οπτικούς αισθητήρες laser που ενσωματώθηκε στην συνέχεια με το υπόλοιπο σύστημα του μικρορομπότ και συγκεκριμένα μεταξύ των επιπέδων 2 και 3.



**Εικόνα 2-2. Επίπεδο 4: οπτικών αισθητήρων laser α) Απεικόνιση του στο πρόγραμμα EAGLE β) Απεικόνιση του σε πλάγια όψη [17].**

Στην Εικόνα 2-3, απεικονίζεται η τελική συναρμολόγηση της μικρορομποτικής πλατφόρμας των επιπέδων 1,2,3 και 4 και του επιπέδου 0 που χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό της πλατφόρμας και δεν αποτελεί βασικό επίπεδο στο σύστημα του ρομπότ.

Η αναφορά στη σχεδιαστική μελέτη και στην κατασκευή του μικρορομπότ της έκδοσης αυτής θεωρήθηκε απαραίτητη καθώς υπάρχουν σχεδιαστικές ατέλειες που προκαλούν περιορισμούς στη λειτουργία του μικρορομπότ.



**Εικόνα 2-3.** 2<sup>η</sup> έκδοση του μικρορομπότ α) πλάγια όψη αυτόνομης πλατφόρμας στο χώρο εργασίας του β) επίπεδο 0: προγραμματισμού του ρομπότ [17].

### 2.3.1 Προβληματισμοί του σχεδιασμού της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ

Η τελική μορφή της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ μελετήθηκε στην Διπλωματική Εργασία [17] όπου παρουσιάστηκαν μερικοί σχεδιαστικοί και κατασκευαστικοί προβληματισμοί, με τους οποίους καταπιιάστηκε για να διορθώσει η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Εξετάζοντας την έκδοση αυτή του μικρορομπότ από κατασκευαστικής και τεχνικής πλευράς προκύπτουν οι παρακάτω προβληματισμοί, οι οποίοι χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

#### **Σχεδιαστικά προβλήματα**

1. Επιλογή του μικρότερου μεγέθους (package) για ηλεκτρονικά στοιχεία.

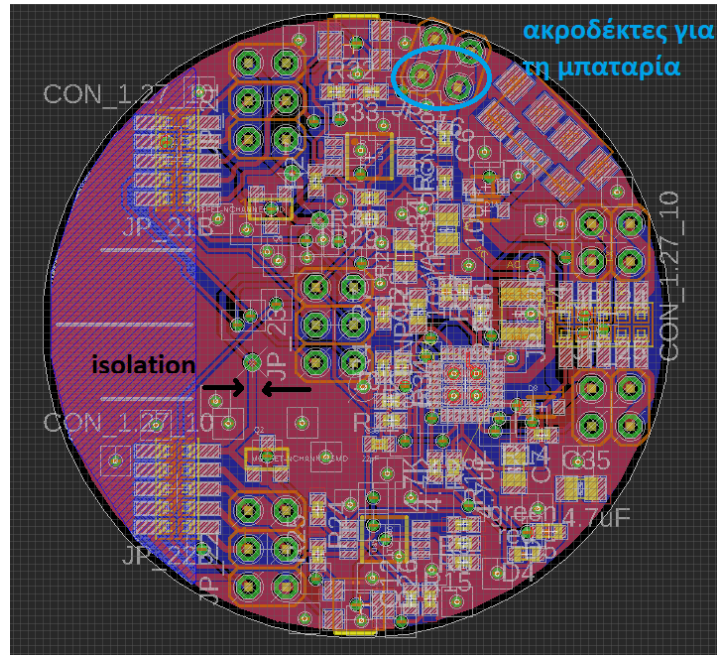
Τα περισσότερα ηλεκτρικά στοιχεία (R,C,L) που επιλέχθηκαν για το ρομπότ έχουν διάσταση πολύ μικρή με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η κόλληση τους, ενώ υπάρχει το περιθώριο για μεγαλύτερη διάσταση.

2. Μικρό κενό μεταξύ γείωσης και διαδρόμων (bus) τροφοδοσίας/σημάτων.

Σημαντικό επίσης είναι το μικρό κενό (isolation) που υπάρχει μεταξύ της περιοχής γείωσης και των διαδρόμων τροφοδοσίας και σημάτων. Το αρνητικό αποτέλεσμα αυτού, είναι ότι μπορεί να δημιουργηθεί βραχυκύκλωμα ενός σήματος ή της τροφοδοσίας με τη γείωση και να σταματήσει να λειτουργεί σωστά. Στο υπάρχον σύστημα αυτό που παρατηρήθηκε ήταν η δημιουργία αγωγιμότητας μεταξύ της γείωσης και της τροφοδοσίας με αποτέλεσμα η μπαταρία του ρομπότ να αδειάζει σύντομα.

3. Μη ύπαρξη υποδοχής για την μπαταρία (socket) ώστε να μπορεί να αφαιρείται.

Στο επίπεδο 2, δηλαδή στο επίπεδο της τροφοδοσίας, υπήρχαν δύο ακροδέκτες, βλ. Εικόνα 2-4, στους οποίους συνδεόταν η μπαταρία με κόλληση. Το μειονέκτημα είναι ότι σε περίπτωση που περάσει η διάρκεια ζωής της μπαταρίας ή για κάποιο λόγο θα χρειαζόταν να αφαιρεθεί από το ρομπότ δεν ήταν εύκολο και πρακτικό καθώς θα έπρεπε να αποκολληθεί και στην συνέχεια να επανακολληθεί πάλι για να λειτουργήσει.



Εικόνα 2-4. Απεικόνιση του επιπέδου 2: τροφοδοσίας στο πρόγραμμα EAGLE.

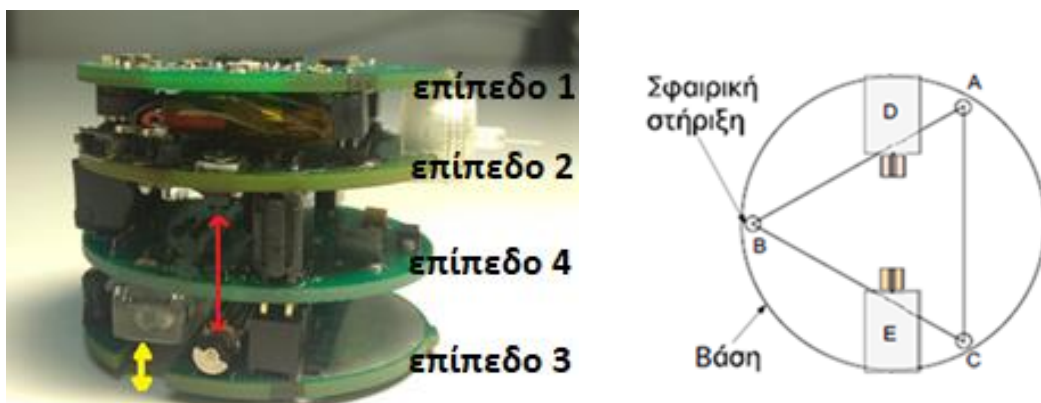
**Κατασκευαστικά προβλήματα**

1. Με την προσθήκη του επιπέδου 4 δεν γινόταν η ανάγνωση της θέσης των κινητήρων.

Το κύκλωμα ανάγνωσης της γωνιακής θέσης των κινητήρων βρισκόταν στο επίπεδο 2 (επίπεδο της τροφοδοσίας), οπότε με την εισαγωγή του επιπέδου με τους οπτικούς αισθητήρες το οποίο συνδέεται μεταξύ του επιπέδου 3 και του επιπέδου 2 αυξήθηκε η απόσταση του αισθητηρίου ανάγνωσης των στροφών και των κινητήρων, βλ. Εικόνα 2-5.

2. Μικρή διάμετρος των οπών των σφαιρών («πόδια») στήριξης του ρομπότ.

Το μικρορομπότ στηρίζεται σε τρεις χαλύβδινες σφαίρες τα οποία βρίσκονται στην κορυφή ισοπλεύρου τριγώνου. Οι σφαίρες αυτές έχουν διάμετρο δύο χιλιοστών (2mm) και εδράζονται στις τρεις οπές διαμέτρου μικρότερης αυτής των σφαιρών του επιπέδου 3. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να αύξανετα η απόσταση των οπτικών αισθητήρων και του εδάφους, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να γίνεται σωστά η ανάγνωση θέσης, βλ. Εικόνα 2-5.



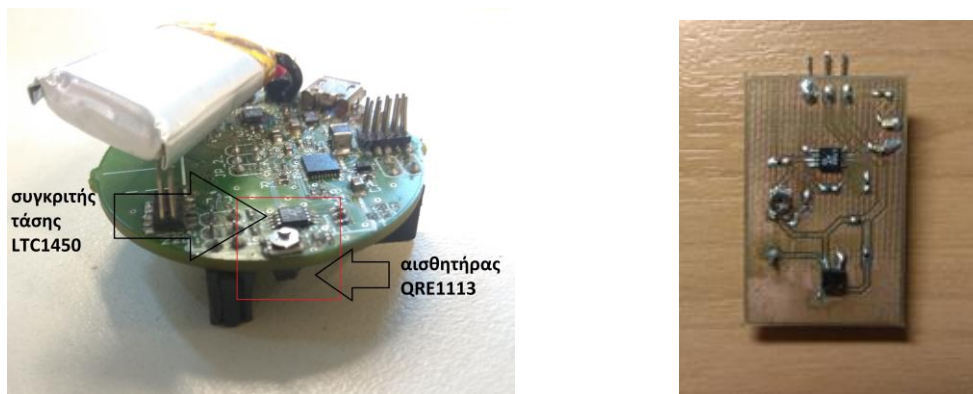
Εικόνα 2-5. 2<sup>η</sup> έκδοση του μικρορομπότ α) πλάγια όψη μικρορομπότ β) σημεία στήριξης μικρορομποτικής πλατφόρμας.



## Λειτουργικά προβλήματα

### 1. Το κύκλωμα ανάγνωσης των στροφών των κινητήρων

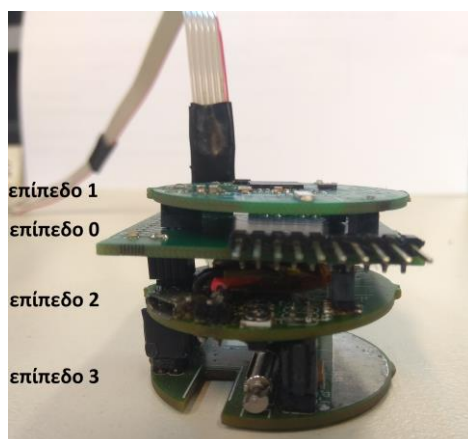
Το κύκλωμα που είχε σχεδιαστεί για την ανάγνωση των στροφών, το οποίο βρισκόταν στο επίπεδο 2, βλ. Εικόνα 2-6, δεν ήταν το κατάλληλο για την ανάγνωση των σημάτων που παράγει το αισθητήριο. Για τον έλεγχο της λειτουργίας του κυκλώματος αυτού, τυπώθηκε δοκιμαστική πλακέτα η οποία περιλαμβάνει το σύστημα ανάγνωσης και πραγματοποιήθηκαν πειράματα.



**Εικόνα 2-6. α) Απεικόνιση του επιπέδου 2: τροφοδοσίας β) δοκιμαστική πλακέτα κυκλώματος ανάγνωσης των αισθητηρίων QRE1113.**

### 2. Με την προσθήκη του επιπέδου 0 δεν υπήρχε η δυνατότητα για κίνηση

Για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή και κατ' επέκταση του μικρορομπότ συνδέεται το επίπεδο 0 μεταξύ των επιπέδων 1 και 2, βλ. Εικόνα 2-7. Μέσω του επιπέδου 0 γίνεται η επικοινωνία του μικρορομπότ και του Η/Υ. Με τη χρήση του debugger στο σύστημα δίνεται τροφοδοσία μόνο στο επίπεδο του μικροελεγκτή και έτσι δεν μπορούν να τροφοδοτηθούν οι κινητήρες και να μπορεί να κινηθεί όσο είναι συνδεδεμένο με τον Η/Υ.



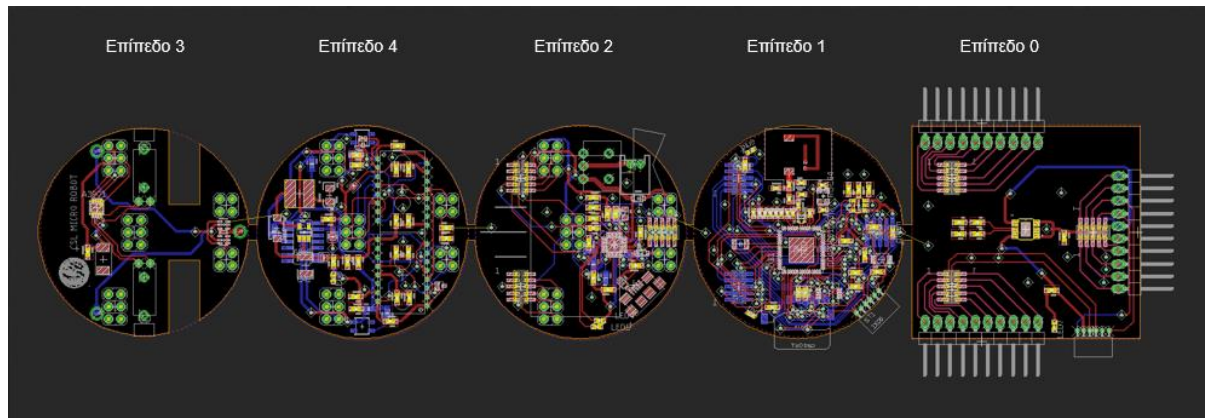
**Εικόνα 2-7. Απεικόνιση της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ με ενσωμάτωση του επιπέδου 0 συνδεδεμένο με τον Η/Υ.**

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβληματισμών προτείνεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας βελτιωμένης έκδοσης του μικρορομπότ, η οποία θα έχει ως στόχο την αναβάθμιση και τη βελτίωση της λειτουργίας του.

### 2.3.2 Βελτιωμένος σχεδιασμός της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ

Ο σχεδιασμός έγινε σύμφωνα με την επιλογή των ηλεκτρονικών και τις ενδεικνυόμενες σχεδιαστικές κατευθύνσεις των εγχειρίδιων χρήσης καθώς και τις τεχνικές σημειώσεις που προσφέρονται από τις κατασκευάστριες εταιρίες των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Για το σχεδιασμό των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό της Autodesk, EAGLE. Στην Εικόνα 2-8 απεικονίζεται η τελική μορφή των πέντε επιπέδων της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ.



Εικόνα 2-8. Τελική μορφή απεικόνισης των πέντε επιπέδων της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.

Τα σχηματικά διαγράμματα της έκδοσης αυτής δίνονται στα κεφάλαια 3 και 4 όπου αναλύεται η αρχιτεκτονική όλων των επιπέδων που συνθέτουν το μικρορομπότ.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στη βελτιωμένη έκδοση για κάθε επίπεδο ξεχωριστά ώστε να επιλυθούν οι προβληματισμοί που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα.

#### Αλλαγές στο επίπεδο 1

Στο επίπεδο αυτό πραγματοποιήθηκαν μερικές αλλαγές για την καλύτερη λειτουργία της ασύρματης επικοινωνίας σύμφωνα με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών για την κεραία που διαθέτει το μικρορομπότ. Πιο συγκεκριμένα για τη σχεδίαση της RF επικοινωνίας πραγματοποιήθηκε “ταίριασμα” (matching) στην αντίσταση των διαδρόμων των σημάτων μεταξύ του μικροελεγκτή και της κεραίας, η οποία πρέπει να έχει τιμή  $Z = 50\Omega$ .

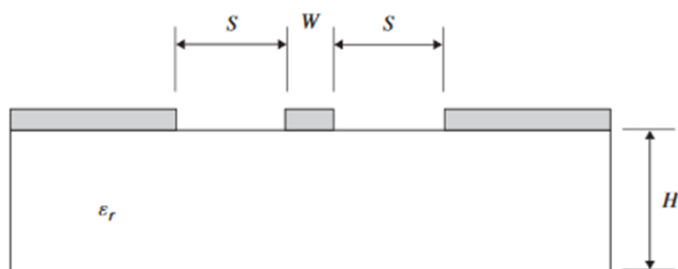
Έτσι με την βοήθεια των παρακάτω τύπων που δίνονται για την σχεδίαση κυκλωμάτων RF, βρίσκεται το κατάλληλο πλάτος των διαδρόμων ( $W$ ) των σημάτων μεταξύ μικροελεγκτή και κεραίας και σχεδιάζεται στην πλακέτα.

$$Z = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{1}{\frac{K(k)}{K(k')} + \frac{K(k_1)}{K(k'_1)}} \quad (2-15)$$

$$k = S/(S + 2W) \quad (2-16)$$

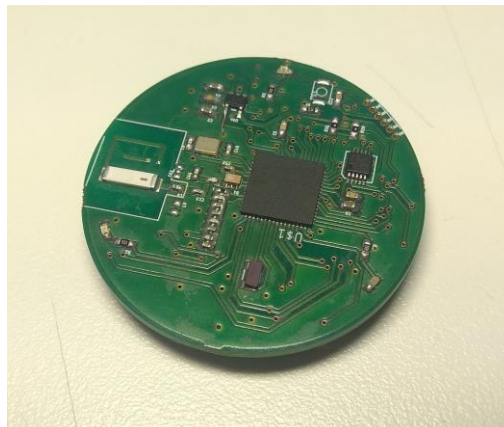
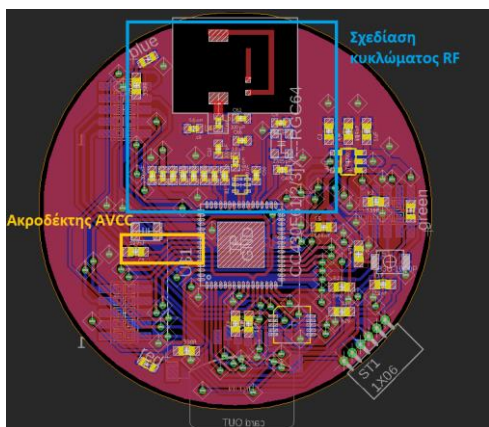
$$k_1 = \frac{\tanh\left(\frac{\pi S}{4H}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi(S+2W)}{4H}\right)} \quad (2-17)$$

Όπου  $\epsilon_r$  είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού (πλακέτας),  $H$  είναι το πάχος της πλακέτας (διηλεκτρικού υλικού),  $S$  είναι το πάχος της απομόνωσης (isolation) και  $Z$  είναι η αντίσταση των διαδρόμων (bus) που αναφέρθηκε προηγουμένως. Στο Σχήμα 2-6 απεικονίζονται τα μεγέθη αυτά πάνω στο διηλεκτρικό υλικό.



Σχήμα 2-6. Σχηματικό διάγραμμα του διηλεκτρικού υλικού (πλακέτα).

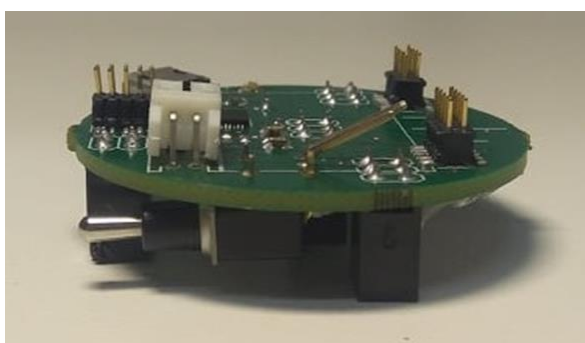
Τέλος χρησιμοποιήθηκε ο ακροδέκτης 56 του μικροελεγκτή, που στην προηγούμενη έκδοση του μικρορομπότ δεν είχε χρησιμοποιηθεί, βλ. Εικόνα 2-9. Ο ακροδέκτης αυτός λέγεται AVCC και αποτελεί την αναλογική τάση του μικροελεγκτή που χρησιμοποιείται ως τάση αναφοράς για την μέτρηση των ανολογικών σημάτων που πηγαίνουν στον μικροελεγκτή. Η τάση, με την οποία τροφοδοτείται ο ακροδέκτης αυτός, είναι αυτή που δίνεται και στον μικροελεγκτή στα 3.3V.



Εικόνα 2-9. Απεικόνιση του επιπέδου 1 της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης α) στο πρόγραμμα EAGLE β) Πλάγια όψη.

### Αλλαγές στο επίπεδο 2

Στο επίπεδο αυτό παρέμειναν όλα τα ηλεκτρονικά που είναι απαραίτητα για τροφοδοσία της μικρορομποτικής πλατφόρμας. Από το επίπεδο αυτό, έφυγε το σύστημα ανάγνωσης των κινήτρων το οποίο μετά από πειράματα αποδείχτηκε ότι δεν ήταν κατάλληλο. Τέλος προστέθηκε κατάλληλη υποδοχή (socket) για την μπαταρία για να αφαιρείται οπότε χρειάζεται και να επανατοποθετείται εύκολα και διακόπτης ON/OFF για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του ρομπότ. Στην Εικόνα 2-10 απεικονίζεται η τελική μορφή του βελτιωμένου επιπέδου 2.

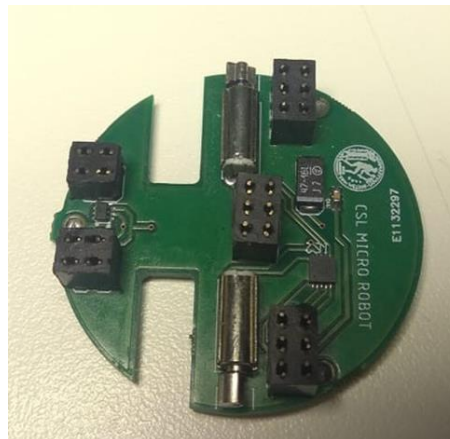
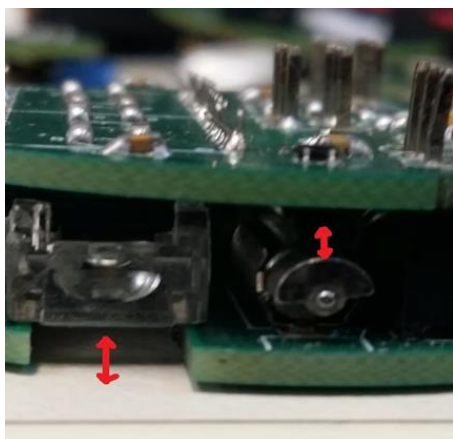


Εικόνα 2-10. Απεικόνιση του επιπέδου 2 της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης.

### Αλλαγές στο επίπεδο 3

Στο επίπεδο αυτό πραγματοποιήθηκαν αλλαγές που αφορούν στην κατασκευή και συναρμολόγηση της μικρορομποτικής πλατφόρμας. Μετακινήθηκε σε άλλη θέση το ηλεκτρονικό στοιχείο A39010, που πραγματοποιεί την οδήγηση των κινητήρων για να διευκολύνεται η κόλλησή του και ο έλεγχος της λειτουργίας του με πολύμετρο. Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται η λειτουργία της μονάδας οδήγησης των κινητήρων.

Οι συνδετήρες (connectors), που συνδέουν το επίπεδο αυτό με το επίπεδο 4, λειάνθηκαν σε ύψος τέτοιο ώστε οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την ανάγνωση των κινητήρων να είναι στο κατάλληλο σημείο ώστε να επιτυγχάνεται η ανάγνωσή τους, βλ. Εικόνα 2-11.

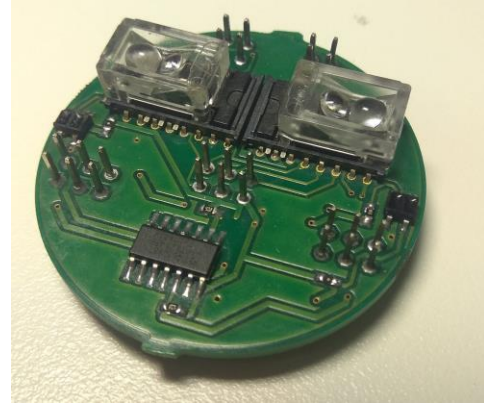
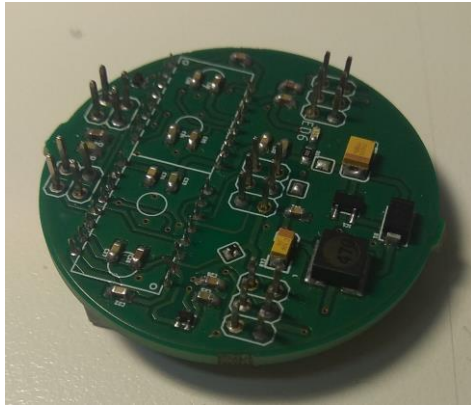


Εικόνα 2-11. Απεικόνιση του επιπέδου 3 της βελτιωμένης 2η έκδοσης.

Τέλος μεγάλωσε η διάμετρος των οπών στο οποίο τοποθετούνται οι τρεις χαλύβδινες σφαίρες διαμέτρου δύο χιλιοστών (2mm), που αποτελούν την βάση στήριξης του ρομπότ στο δάπεδο. Οι οπές σχεδιάστηκαν να είναι περίπου όσο είναι και η διάμετρος των σφαιρών έτσι ώστε να εδράζονται περίπου στην μέση τους και να δημιουργείται απόσταση μεταξύ του επιπέδου αυτού και του εδάφους ενός χιλιοστού (1mm). Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι μαζί με το πάχος της πλακέτας το οποίο είναι 1,6 mm, δημιουργείται απόσταση μεταξύ των αισθητήρων θέσης και του δαπέδου στα 2.6mm που αποτελεί την ενδεικνυόμενη τιμή που δίνει ο κατασκευαστής των οπτικών αισθητήρων για να διαβάζουν αποτελεσματικά.

### Αλλαγές στο επίπεδο 4

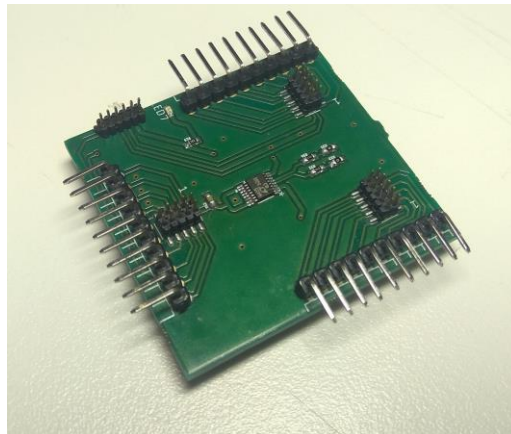
Στην 2<sup>η</sup> έκδοση του μικρορομπότ, το επίπεδο 4 περιλάμβανε μόνο τους αισθητήρες για την ανάγνωση της θέσης του ενώ οι αισθητήρες ανάγνωσης των στροφών βρίσκονταν στο επίπεδο 2. Στην προηγούμενη υποενότητα σχολιάστηκε το πρόβλημα που δημιουργήθηκε με την εισαγωγή του επιπέδου 4 στο σύστημα του ρομπότ. Το πρόβλημα αυτό λύνεται στην βελτιωμένη έκδοση τοποθετώντας και τους αισθητήρες ανάγνωσης των στροφών των κινητήρων στο επίπεδο 4. Μαζί με τους αισθητήρες αυτούς επιλέχθηκε και το κατάλληλο κύκλωμα επεξεργασίας του σήματος τους. Η επιλογή του κυκλώματος αυτού περιγράφεται στο κεφάλαιο 4 όπου αναλύεται και η αρχιτεκτονική του επιπέδου των αισθητήρων. Στην Εικόνα 2-12 απεικονίζεται η τελική μορφή του επιπέδου 4, όπου τοποθετήθηκαν όλοι οι αισθητήρες του ρομπότ.



**Εικόνα 2-12. Απεικόνιση του επιπέδου 4 της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης.**

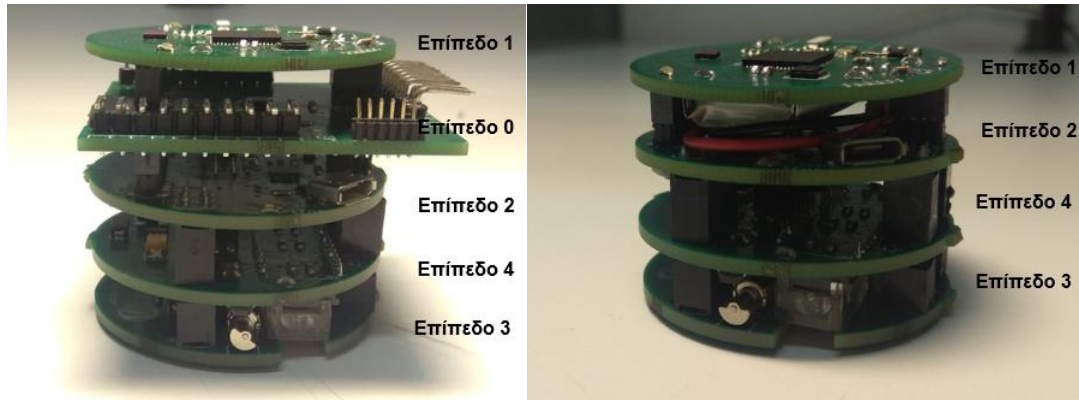
### **Αλλαγές στο επίπεδο 0**

Στο επίπεδο αυτό προστέθηκε το LTC4415, το οποίο αποτελείται από δύο ιδανικές διόδους και έχει την δυνατότητα να τροφοδοτείται από δύο πηγές. Έτσι, καθώς το ρομπότ είναι συνδεδεμένο με τον Η/Υ, το υπόλοιπο σύστημα μπορεί να τροφοδοτείται από την μπαταρία και να λειτουργεί κανονικά. Το LTC4415 είναι κατάλληλο για την εφαρμογή αυτή καθώς έχει εύρος λειτουργίας 1.7V - 5.5V που περιλαμβάνει τις τάσεις με τις οποίες τροφοδοτείται το μικρορομπότ και είναι 3,7V από την μπαταρία του και 3,6V όταν τροφοδοτείται από τον Η/Υ. Στην Εικόνα 2-13 απεικονίζεται η τελική μορφή του επιπέδου 0.



**Εικόνα 2-13. Απεικόνιση του επιπέδου 0 της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης.**

Με την συναρμολόγηση των παραπάνω επιπέδων γίνεται η σύνθεση της νέας βελτιωμένης μικρορομποτικής πλατφόρμας. Στην Εικόνα 2-14 απεικονίζεται η μορφή της βελτιωμένης έκδοσης του μικρορομπότ: (α) αριστερά είναι το τοποθετημένο και το επίπεδο προγραμματισμού του μικροελεγκτή (β) δεξιά απεικονίζεται το μικρορομπότ στην τελική του μορφή.



**Εικόνα 2-14. Βελτιωμένη 2<sup>η</sup> έκδοση του μικρορομπότ α) πάνω όψη αυτόνομης πλατφόρμας.β) Πλάγια όψη αυτόνομης πλατφόρμας.**

## 3 Αρχιτεκτονική των επιπέδων 0, 1 και 2

### 3.1 Εισαγωγή

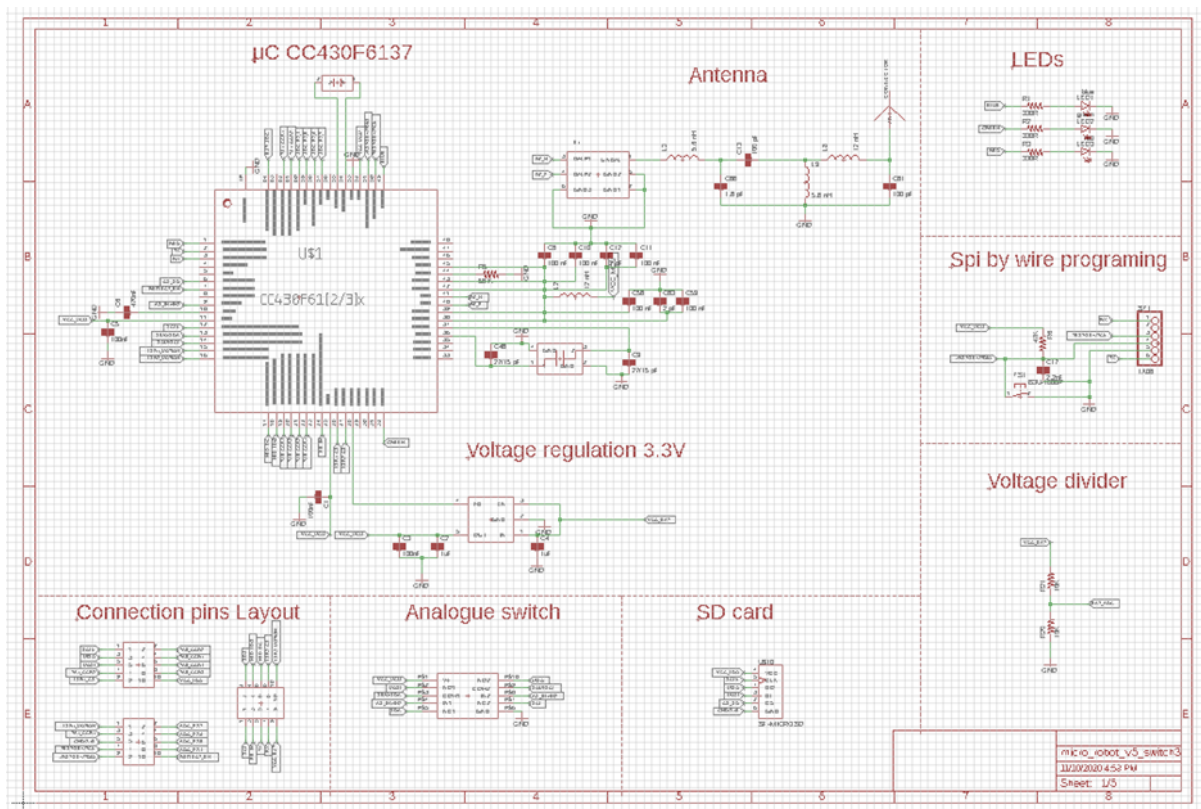
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται και αναλύεται με λεπτομέρεια η αρχιτεκτονική των επιπέδων 0, 1, και 2 του ρομπότ που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπου αναλύονται τα ηλεκτρονικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται.

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού και του επόμενου είναι να αποτελέσει ένα τεχνικό εγχειρίδιο το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από επόμενους χρήστες και θα μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση και λειτουργία του μικρορομπότ.

### 3.2 Επίπεδο ελέγχου

Στο Σχήμα 3-1 απεικονίζεται το σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 1 του μικρορομπότ το οποίο αποτελεί το επίπεδο έλεγχο της λειτουργίας του καθώς περιέχει τον μικροελεγκτή, ο οποίος είναι υπεύθυνος για όλες τις λειτουργίες του.

Επιπλέον στο επίπεδο αυτό περιλαμβάνονται ο ρυθμιστής τάσης που είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση της σωστής τροφοδοσίας του μικροελεγκτή, η κεραία και το αντίστοιχο φίλτρο του σήματος που είναι υπεύθυνα για την ασύρματη επικοινωνία με τον Η/Υ και με άλλα μικρορομπότ. Ακόμα υπάρχουν και κάποια άλλα ηλεκτρονικά που βοηθούν στις λειτουργία και χρήση του μικρορομπότ και αναφέρονται στη συνέχεια.



Σχήμα 3-1. Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 1 της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.

### 3.2.1 Μικροελεγκτής και ρυθμιστής τάσης

#### Μικροελεγκτής CC430F6137, της Texas Instruments

Ο μικροελεγκτής αυτός ανήκει στην οικογένεια CC430, η οποία χαρακτηρίζεται από την εξαιρετικά χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση των μικροελεγκτών της, τον ενσωματωμένο πυρήνα ασύρματου πομποδέκτη CC1101 1-GHz και το μεγάλο αριθμό ποιοτικών περιφερειακών μονάδων, βλ. Εικόνα 3-1. Στον Πίνακα 2-1 δίνονται συνοπτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του:



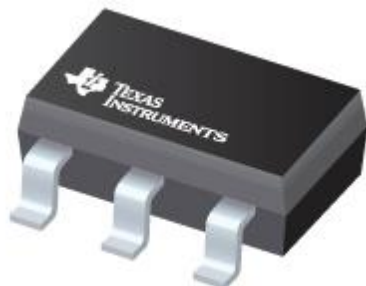
Εικόνα 3-1. Απεικόνιση του μικροελεγκτή CC430F6137, της Texas Instruments.

Πίνακας 3-1. Τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή CC430F6137 [17].

Συσκευή	Χαρακτηριστικά
Μνήμη προγράμματος	32 kB
SRAM	4 kB
Timer_A	5, 3
UART/LIN/IrDA/SPI	1
SPI/I2C	1
ADC12	8 εξ./4 εσ
Comparators	8 κανάλια
I/O	4

#### Ρυθμιστής τάσης TPS780, της Texas Instruments

Για τη ρύθμιση της τάσης λειτουργίας του CC430F6137 επιλέχθηκε ο ρυθμιστής τάσης TPS780. Ο ρυθμιστής αυτός υποστηρίζει την εναλλαγή από το χρήστη μεταξύ δύο επιπέδων τάσης εν ώρα λειτουργίας μέσω μίας συμβατής εισόδου με τον μικροελεγκτή. Η δυνατότητα αυτή αποδεικνύεται πολύ χρήσιμη, καθώς το μικρορομπότ μπορεί σε κατάσταση αναμονής να μειώνει τις ενεργειακές του απαιτήσεις, αυξάνοντας παράλληλα την ενεργειακή του αυτονομία. Στην Εικόνα 3-2 απεικονίζεται ο ρυθμιστή τάσης TPS780.



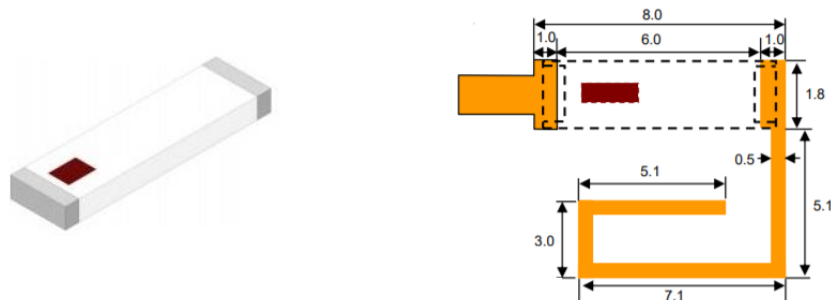
Εικόνα 3-2. Απεικόνιση του ρυθμιστή τάσης TPS780, της Texas Instruments.



### 3.2.2 Κεραία RF και Φίλτρο κεραίας

#### Κεραμική κεραία στα 868 MHz, της Johanson Technology

Για αύξηση της απόδοσης και της συμβατότητας με τις συχνότητες κάτω από 1 GHz επιλέχθηκε η κεραμική κεραία στα 868 MHz, της Johanson Technology, βλ. Εικόνα 3-3. Η κεραία αυτή σχηματίζει ένα διπολικό σύστημα με το επίπεδο της γείωσης, διαθέτει ευελιξία στην τοποθέτηση της στην πλακέτα και είναι συμβατή με τον ενσωματωμένο ασύρματο πυρήνα CC110x του μικροελεγκτή. Μεταξύ κεραίας και μικροελεγκτή ενσωματώθηκε μια σειρά από φίλτρα LC τα οποία βελτιώνουν σημαντικά την ποιότητα λήψης και αποστολής δεδομένων.

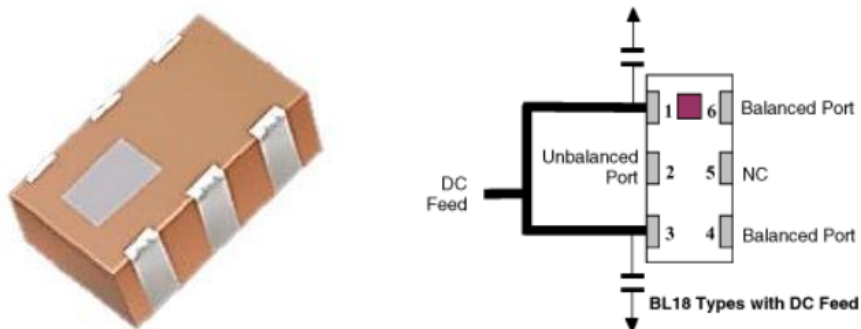


Εικόνα 3-3. α) Απεικόνιση της κεραίας RF β) σχηματικό διάγραμμα της κεραίας.

#### Φίλτρο κεραίας RF Balun, της Johanson Techonology

Τα φίλτρα RF Balun (BALanced-UNbalanced), βλ. Εικόνα 3-4, τα οποία αποτελούν μετασχηματιστές σύνθετης αντίστασης, απλοποιούν τον σχεδιασμό RF και εξασφαλίζουν βέλτιστη απόδοση. Περιλαμβάνουν ένα δίκτυο αντιστοίχισης της σύνθετης αντίστασης με το υπόλοιπο κύκλωμα μέχρι τον μικροελεγκτή, έναν μετασχηματιστή και ένα φίλτρο σε μια μικρή επιφάνεια.

Αυτά τα χαρακτηριστικά μειώνουν σημαντικά το αποτύπωμα του στην πλακέτα (PCB), εγγυώνται το φιλτράρισμα (συμμόρφωση με FCC/ETSI) και αποτρέπουν οποιαδήποτε πιθανή μεταβλητότητα κατασκευής που ενδέχεται να έχουν τα φίλτρα L/C που συνιστώνται να υπάρχουν μεταξύ κεραίας και μC. Οι προσαρμοσμένοι μετασχηματιστές σύνθετης αντίστασης μετατρέπουν διαφορικά σε σήματα RF μονής ακρόασης 50Ω μειώνοντας τον αριθμό των στοιχείων, αποτρέποντας τη μεταβλητότητα RF λόγω του γεγονότος ότι αυτά τα φίλτρα είναι SMD (surface mount device) και προσφέρουν εξαιρετική σταθεροποίηση της θερμοκρασίας (σταθερή στα 4ppm).



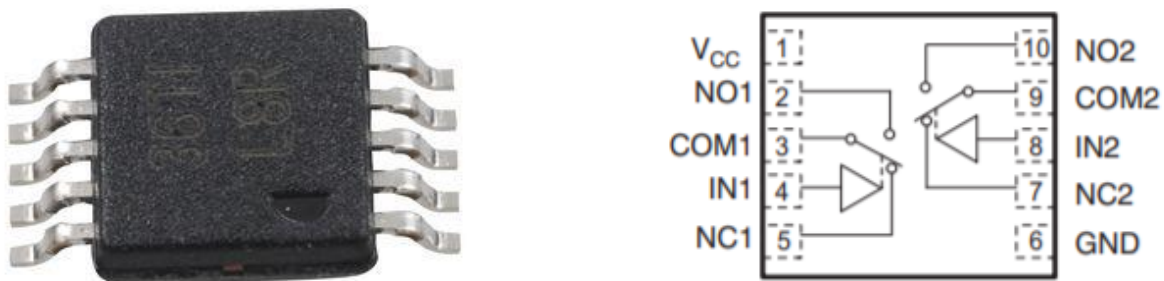
Εικόνα 3-4. α) Απεικόνιση του φίλτρου κεραίας RF Balun β) σχηματικό διάγραμμα του φίλτρου Balun.

### 3.2.3 Υπόλοιπα ηλεκτρονικά

Όπως και στο προηγούμενο σχεδιασμό έχει προβλεφθεί η διάταξη για χρήση κάρτας SD μνήμης, που διακρίνεται στο παραπάνω σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 1, βλ. Σχήμα 3-1. Με την τοποθέτησή της, θα επιτυγχάνεται να αποθηκεύονται τα δεδομένα που παίρνει το ρομπότ από τα αισθητήρια του και μετά να μεταφέρονται για επεξεργασία στον Η/Υ. Αυτό βοηθάει στο μην χάνονται δεδομένα από τη ασύρματη αποστολή τους κατευθείαν στον Η/Υ και έτσι να υπάρχει όλη πληροφορία των μετρήσεων.

#### Αναλογικός διακόπτης TS3A24159DGSR, της Texas Instrument

Ο διακόπτης αυτός χρησιμοποιείται για την εναλλαγή μεταξύ κάποιων ακροδεκτών του μικροελεγκτή που αφορούν την επικοινωνία του με τους αισθητήρες θέσης ADNS7550 και της SD κάρτα μνήμης που την παρούσα στιγμή δεν χρησιμοποιείται και έτσι επιλέγεται να είναι ενεργή η ανάγνωση των αισθητηρίων θέσης. Οι ακροδέκτες αυτοί του μικροελεγκτή αφορούν τα πρωτόκολλα επικοινωνίας SPI και I<sup>2</sup>C που απευθύνονται αντίστοιχα στα προαναφερθέντα στοιχεία.



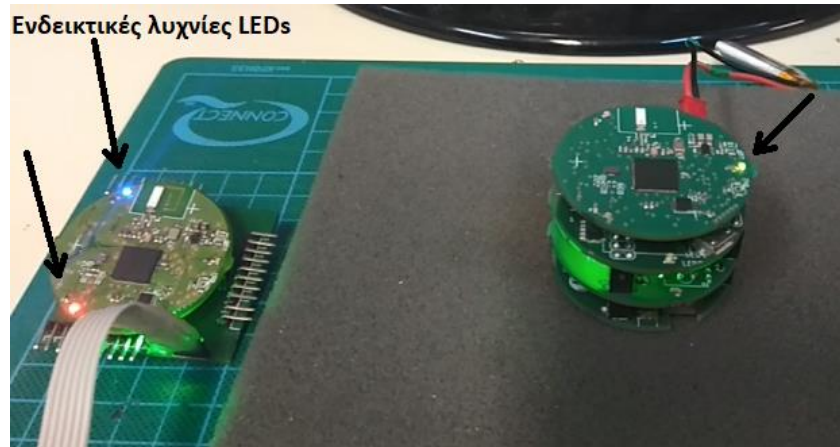
Εικόνα 3-5. α) Απεικόνιση του αναλογικού διακόπτη TS3A24 β) σχηματικό διάγραμμα του αναλογικού διακόπτη.

#### Διαιρέτης τάσης και ενδεικτικές λυχνίες LEDs (SMD)

Σχεδιάστηκε ένα κύκλωμα με δύο αντιστάσεις για τη διαίρεση της τάσης του επιπέδου 1, όπου η έξοδος του κυκλώματος αυτού συνδέεται με τον ακροδέκτη 64 του μικροελεγκτή, βλ. Σχήμα 3-1. Η είσοδος αυτή του μικροελεγκτή αποτελεί μια αναλογική είσοδο και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση την τάση της μπαταρίας. Με τη βοήθεια του διαιρέτη τάσης γίνεται σύγκριση της τάσης εξόδου του διαρέτη και της τάσης της μπαταρίας και έτσι ο μικροελεγκτής στέλνει ασύρματα τη στάθμη της. Μια δεύτερη χρήση της εξόδου αυτής είναι η δυνατότητα αναγνώσης της τάσης που δίνει το αισθητήριο δύναμης για το οποίο γίνεται εκτενέστερη αναφορά στο Κεφάλαιο 5.

Μια άλλη λειτουργία που μπορεί να προγραμματιστεί να κάνει ο μικροελεγκτής, είναι να δίνει σήμα σε μια από τρεις ενδεικτικές λυχνίες που διαθέτει, έτσι ώστε να ανάβει και να προειδοποιεί τον χρήστη ότι είναι χαμηλή η στάθμη της μπαταρίας και ότι πρέπει να φορτιστεί. Οι λυχνίες LED που υπάρχουν στο ρομπότ χρησιμοποιούνται για διάφορες ενδείξεις που μπορεί να επιλέξει ο χρήστης.

Μια χρήση της λειτουργίας των LEDs, εκτός της ένδειξης της στάθμης που αναφέρθηκε, είναι η ένδειξη της επίτευξης της ασύρματης επικοινωνίας με τον Η/Υ ή με άλλο μικρορομπότ, βλ. Εικόνα 3-6. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την επεξεργασία εικόνας από εξωτερική κάμερα για έλεγχο θέσης του μικρορομπότ ή για την επικύρωση των αποτελεσμάτων από των έλεγχο θέσης που επιτυγχάνεται από τους αισθητήρες θέσης που διαθέτει.

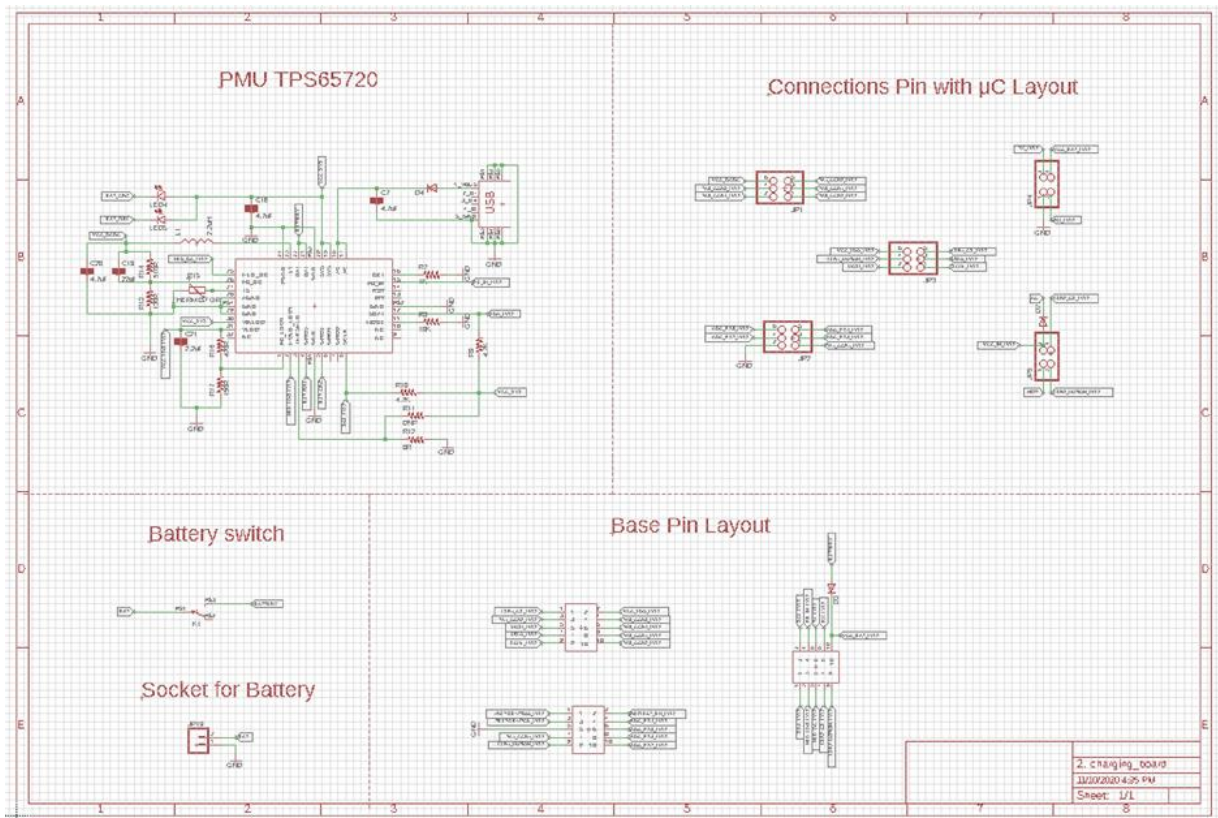


Εικόνα 3-6. Απεικόνιση της χρήσης των LEDs για επίτευξη της ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ δύο μικρορομπότ.

### 3.3 Επίπεδο τροφοδοσίας

Το επίπεδο 2 απλοποιήθηκε και παρέμειναν όλα τα ηλεκτρονικά στοιχεία που είναι υπεύθυνα για τροφοδοσία όλων των στοιχείων του ρομπότ. Επίσης προστέθηκε υποδοχή για την μπαταρία και διακόπτης ON/OFF για την βελτίωση της λειτουργίας και της χρήσης του ρομπότ.

Στο παρακάτω Σχήμα 3-2 δίνεται το σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 2 της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.

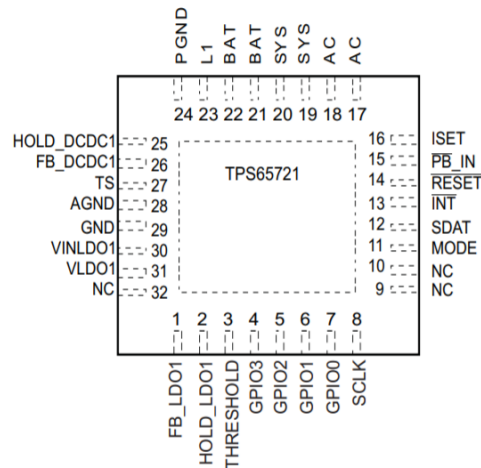


Σχήμα 3- 2. Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 2 της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.

### 3.3.1 Μονάδα διαχείρισης ισχύος (PMU)

#### Μονάδα διαχείρισης ισχύος TPS65721, της Texas Instruments

Η μονάδα αυτή, βλ. Σχήμα 3-3, απαρτίζεται από ένα ενσωματωμένο σύστημα με ρυθμιστή τάσης LDO το οποίο διαχειρίζεται τη φόρτιση της μπαταρίας, την τροφοδοσία του μικροελεγκτή σε συνδυασμό με το TPS780 καθώς και των υπολοίπων συστημάτων του μικρορομπότ (οπτικούς αισθητήρες, μικροκινητήρες δόνησης, ενδεικτικές λυχνίες κλπ.).



**Σχήμα 3-3. Σχηματικό διάγραμμα της μονάδας διαχείρισης ισχύος TPS65721, της Texas Instruments.**

Η συγκεκριμένη μονάδα είναι εξειδικευμένη για εφαρμογές και συστήματα χαμηλής κατανάλωσης και διαστάσεων. Για τη φόρτιση της μπαταρίας, η PMU υποστηρίζει τη χρήση ως τροφοδοτικής γραμμής 5V τη γενικής χρήσης θύρα micro USB. Η PMU φέρει επιπλέον και ένα θερμίστορ τύπου NTC, το οποίο λειτουργεί ως αισθητήρας θερμοκρασίας της μπαταρίας. Σε περίπτωση σημαντικής αύξησης της θερμοκρασίας της μπαταρίας, η αντίσταση του θερμίστορ αυξάνεται και η PMU διακόπτει την τροφοδοσία της μπαταρίας.

### 3.3.2 Πηγή ενέργειας και διακόπτης

#### Πηγή ενέργειας μικρορομπότ, Li-Po 3,7V

Για την τροφοδοσία όλου του συστήματος, χρησιμοποιείται μια μπαταρία Li-Po 3.7V, βλ. Εικόνα 3-7, η οποία κρίνεται καταλληλή, λόγω των χαρακτηριστικών της που δίνονται στον Πίνακα 3-2, για να καλύψει όλες τις ενεργειακές απαιτήσεις του μικρορομπότ (οπτικούς αισθητήρες, μικροκινητήρες δόνησης, ενδεικτικές λυχνίες κλπ.).

**Πίνακας 3-2. Τεχνικά χαρακτηριστικά της πηγής ενέργειας του συστήματος.**

Χαρακτηριστικά	
Τύπος Μπαταρίας:	Lithium-Ion Polymer (Li-Po)
Τάση Μπαταρίας:	3.7Volt
Χωρητικότητα:	250mAh
Διάσταση X:	30mm
Διάσταση Y:	17mm
Διάσταση Z:	6mm



**Εικόνα 3-7. Απεικόνιση της μπαταρία Li-Po 3.7 V.**

**Διακόπτης ρομπότ**

Διακόπτης εναλλαγής ON/OFF δύο θέσεων SPDT με προστατευτικό κάλυμα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυκλώματα χαμηλής ή υψηλής τάσης ιδανικά για εναλλαγή λυχνιών ή κινητήρων. Στον προηγούμενο σχεδιασμό υπήρχαν δύο ακροδέκτες που με τη βοήθεια ενός κατάλληλου συνδέσμου (jumper connector 2 pin) γινόταν η ενεργοποίηση του ρομπότ, βλ Εικόνα 2-4. Αν χρειαζόταν να το απενεργοποιήσουμε τότε αφαιρούταν ο σύνδεσμος αυτός. Λόγω έλλειψης πρακτικότητας της προηγούμενης σχεδίασης, εδώ χρησιμοποιήθηκε ο διακόπτης, βλ. Εικόνα 3-8 για να βελτιώσει κυρίως τον χειρισμό του μικρορομπότ. Στον παρακάτω Πίνακα 3-3 παρατίθεται τα χαρακτηριστικά του.

**Πίνακας 3-3. Τεχνικά χαρακτηριστικά του διακόπτη του ρομπότ.**

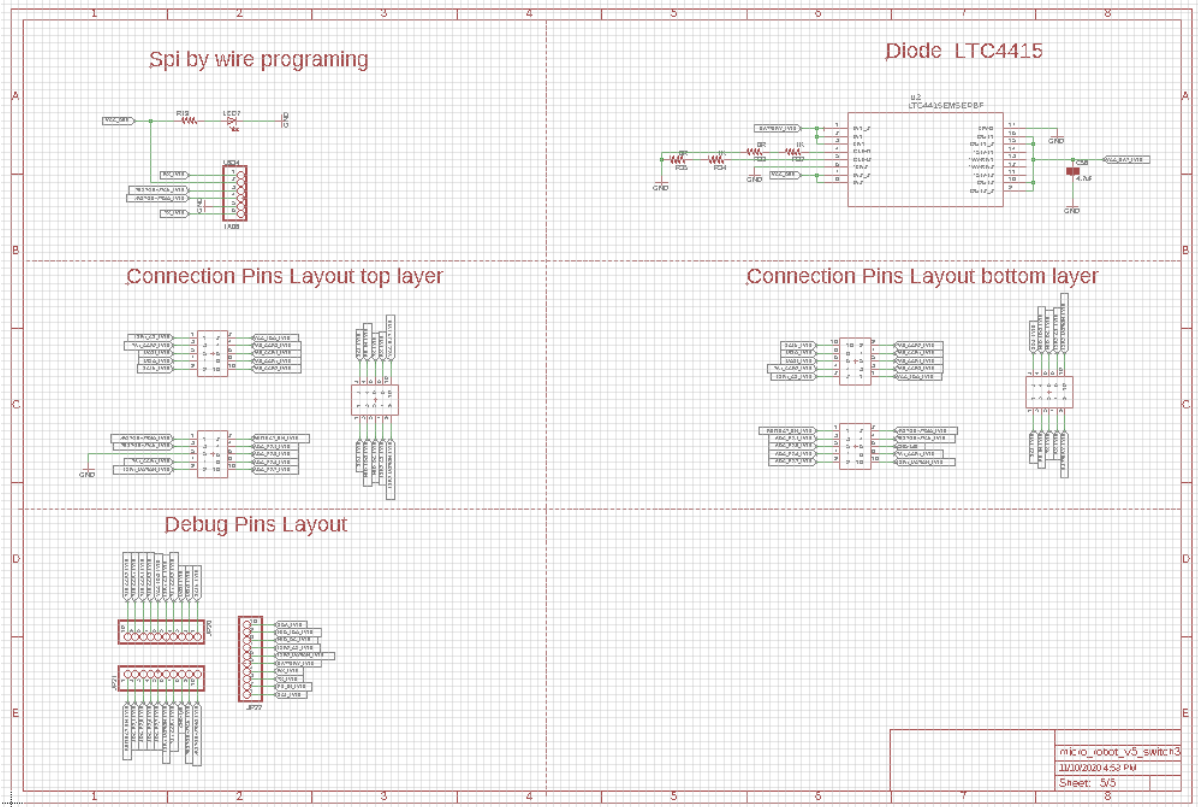
<b>Χαρακτηριστικά</b>	
<b>Product Name:</b>	Toggle Switch
<b>Positions:</b>	ON/OFF 2 Position
<b>Model:</b>	Right Angled Terminals
<b>Power:</b>	250V/3A 125V/5A
<b>Pole and Throw:</b>	SPDT
<b>Main Color:</b>	Silver Tone, Red, Black
<b>Overall Size:</b>	25 x 17 x 13mm/1in x 0.67in x 0.51in(L*W*H)



**Εικόνα 3-8. Απεικόνιση του διακόπτη του ρομπότ.**

### 3.4 Επίπεδο προγραμματισμού (Debugger)

Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή CC430f6137 του ρομπότ γίνεται μέσω του επιπέδου προγραμματισμού 0 το οποίο συνδέει τον Η/Υ με το μικρορομπότ. Στο Σχήμα 3-4 δίνεται το σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου αυτού στο σχεδιαστικό πρόγραμμα EAGLE.



Σχήμα 3-4. Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 0 της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.

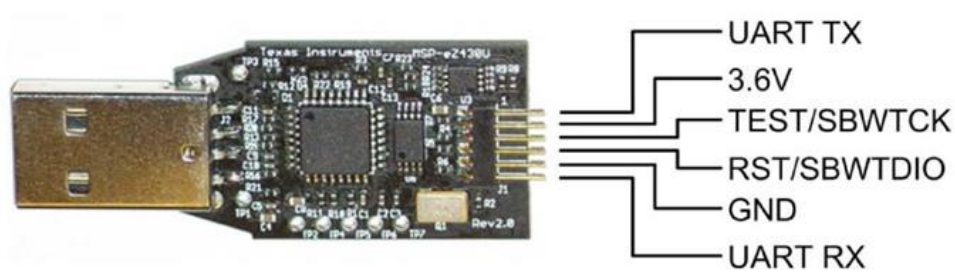
#### 3.4.1 Μεταφορά δεδομένων και προγράματος μεταξύ μικρορομπότ και Η/Υ

Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή γίνεται συνδέοντας το επίπεδο 0 με τον εξομοιωτή USB, ο οποίος διατίθεται με τη συσκευή chronos της TI και εν συνεχεία αυτός με τον Η/Υ, βλ. Εικόνα 3-9.

Ο εξομοιωτής διαθέτει ενσωματωμένο κύκλωμα USB-to-UART στην καθορισμένη ταχύτητα των 9600bps και χρησιμοποιείται για προγραμματισμό και το debugging του μικροελεγκτή μέσω της τεχνολογίας Spy-Bi-Wire που διαθέτει. Με τη συγκεκριμένη τεχνολογία επιτρέπεται η σύνδεση του ελεγκτή με συσκευή ανάγνωσης σφαλμάτων μέσω των δύο ακροδεκτών SBWTCK και SBWTDIO, βλ. Εικόνα 3-10.



Εικόνα 3-9. Απεικόνιση της διάταξης προγραμματισμού του μικρομπότ.



Εικόνα 3-10. Φωτογραφική απεικόνιση του εξομοιωτή USB.

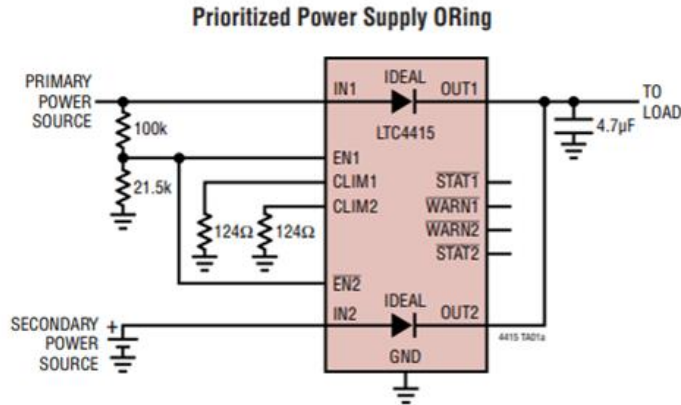
### 3.4.2 Τροφοδότηση του συστήματος

#### Δίοδος LTC4415, της AnalogueDigital

Στο επίπεδο αυτό προστέθηκε το σύστημα διόδων LTC4415, βλ. Σχήμα 3-5, το οποίο έχει την δυνατότητα να τροφοδοτείται από δύο πηγές και όταν συμβαίνει αυτό, η έξοδος του να είναι ίδια με την πηγή που έχει την μεγαλύτερη τάση. Στον παρακάτω Πίνακα 3-4 δίνονται τα χαρακτηριστικά της διόδου αυτής.

Πίνακας 3-4. Τεχνικά χαρακτηριστικά της διόδου LTC4415, της AnalogueDigital.

Χαρακτηριστικά	
Δύο ιδανικές διόδους:	50mΩ
Εύρος Λειτουργίας :	1.7V - 5.5V
Μεταβλητό όριο ρεύματος:	έως 4A για κάθε δίοδο
Πτώση Τάσης στην κάθε ρύθμιση:	15mV



**Σχήμα 3-5. Σχηματικό διάγραμμα της διόδου LTC4415, της AnalogueDigital.**

Το πλεονέκτημα από τη χρήση της διόδου είναι πολύ σημαντικό καθώς το ρομπότ ενώ είναι συνδεδεμένο με τον Η/Υ, μπορεί να λειτουργεί κανονικά. Έτσι ο προγραμματιστής του μικρορομπότ έχει την δυνατότητα να του φορτώνει το πρόγραμμα (κώδικα) κάθε φορά που θέλει να κάνει κάποια δοκιμή και να βλέπει εκείνη την στιγμή αν λειτουργεί σωστά. Χωρίς τη χρήση της διόδου αυτής ο χρήστης θα έπρεπε να βγάλει το επίπεδο 1 του μικροελεγκτή από το επίπεδο 0 και να το συνδέσει με το υπόλοιπο ρομπότ. Σε περίπτωση που θα ήθελε να ξανά κάνει κάποια δοκιμή επειδή την πρώτη φορά υπήρχε κάποιο λάθος θα έπρεπε να αποσυνδέσει την πλακέτα με τον μικροελεγκτή και να το συνδέσει με τον debugger πάλι, και κάθε φορά που θα ήθελε να δοκιμάσει κάτι.

Οπότε τα πλεονεκτήματα είναι ότι κερδίζεται χρόνος από τη διαδικασία προγραμματισμού του ρομπότ και ελέγχου του κώδικα και ταυτόχρονα δεν αποσυνδέουμε και συνδέουμε πάλι τα επίπεδα και αποφεύγονται μηχανικές φθορές.



## 4 Αρχιτεκτονική των επιπέδων 3 και 4

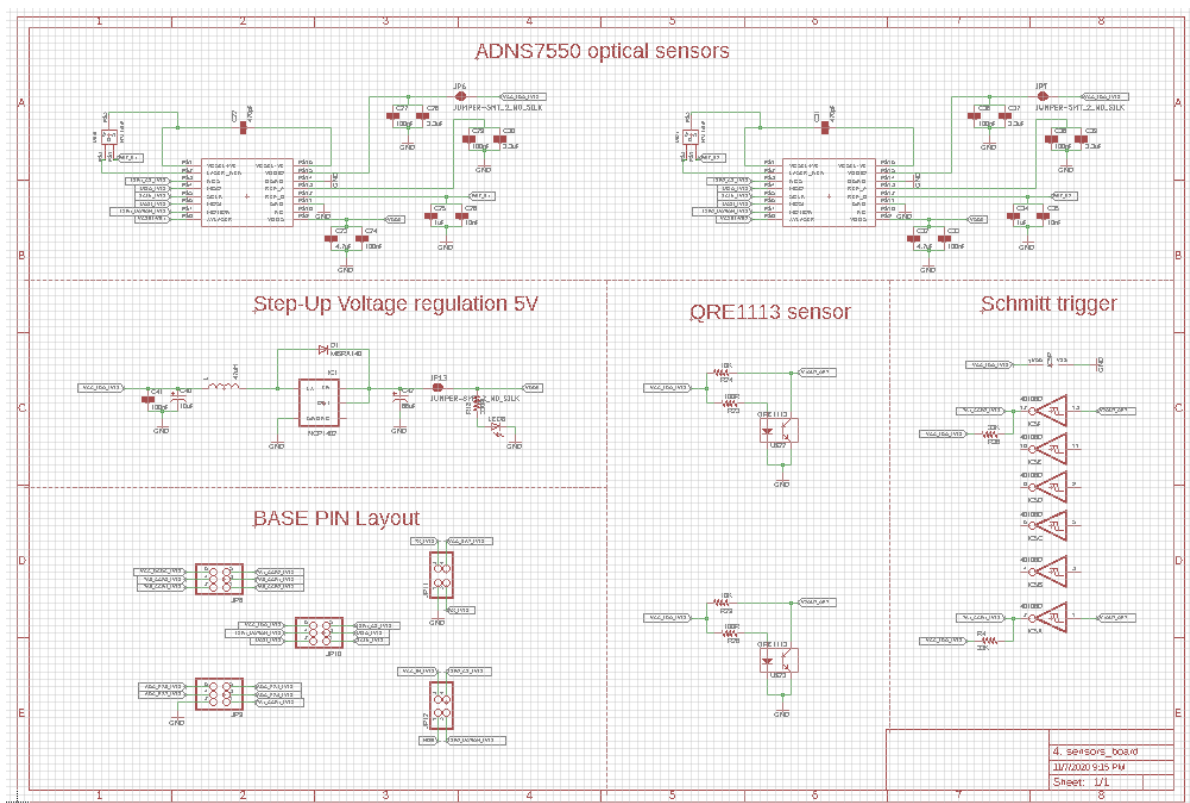
### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται και περιγράφεται με λεπτομέρεια η αρχιτεκτονική των επιπέδων 3 και 4 της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο δύο. Αναλύεται η λειτουργία των μικροκινητήρων δόνησης και οι αισθητήρες των παραπάνω επιπέδων αντίστοιχα καθώς και τα βασικά ηλεκτρονικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα λειτουργίας τους.

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού όπως και του προηγούμενου είναι να αποτελέσει ένα τεχνικό εγχειρίδιο το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εκτός από τους μελλοντικούς χρήστες, και από άτομα που ενασχολούνται με το σχεδιασμό και κατασκευή αντίστοιχων ή παρόμοιων κυκλωμάτων. Επίσης, θα βοηθήσει στην ακόμα καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του μικρορομπότ.

### 4.2 Επίπεδο αισθητήρων

Στο επίπεδο των αισθητήρων (επίπεδο 4) τοποθετήθηκαν όλοι οι αισθητήρες του ρομπότ, βλ. Σχήμα 4-1. Στην διπλωματική εργασία [17] κατασκευάστηκε το επίπεδο 4 το οποίο περιλάμβανε μόνο τους αισθητήρες για την ανάγνωση της θέσης του ρομπότ.



Σχήμα 4-1. Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 4 της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.

Στο Κεφάλαιο 2 σχολιάστηκε το πρόβλημα που δημιουργήθηκε με την εισαγωγή του επιπέδου αυτού στο μικρορομπότ. Το πρόβλημα επιλύεται με τον βελτιωμένο σχεδιασμό του επιπέδου 4 όπου περιλαμβάνονται και οι αισθητήρες αναγνώσης των στροφών των κινητήρων μαζί με τους αισθητήρες αναγνώσης της θέσης του μικρορομπότ.

#### 4.2.1 Αισθητήρες ταχύτητας

##### Αισθητήριο ανάκλασης QRE1113GR, της Fairchild Semiconductor

Για τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής των δύο μικροκινητήρων δόνησης χρησιμοποιήθηκαν δύο οπτικοί ανακλαστές QRE1113GR, βλ. Εικόνα 4-1. Το αισθητήριο ανάκλασης QRE1113GR διατηρήθηκε από την πρωτότυπη κατασκευή λόγω των μικρών του διαστάσεων και της ευκολίας ανάγνωσης του έκκεντρου στον άξονα του μικροκινητήρα.



**Εικόνα 4-1. Απεικόνιση του αισθητήριου ανάκλασης QRE1113GR, της Fairchild Semiconductor.**

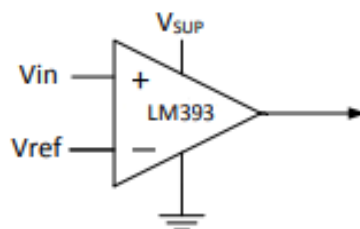
Το αισθητήριο αυτό περιλαμβάνει ένα φωτοτρανζίστορ και έναν εκπομπό IR ακτινοβολίας. Συνοπτικά η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση ή μη της IR ακτινοβολίας πάνω στον κινητήρα. Περισσότερα για τον τρόπο χρήσης των αισθητηρίων αυτών περιγράφονται στην μεταπτυχιακή εργασία [16].

Στην 2<sup>η</sup> έκδοση του μικρορομπότ είχε χρησιμοποιηθεί για την εξομάλυνση των παλμών που προκύπτουν από το αισθητήριο ανάκλασης, ο γραμμικός συγκριτής τάσης LTC1540 της Linear Technology. Στο Κεφάλαιο 2 αναφέρθηκε ότι αυτό το ολοκληρωμένο κύκλωμα δεν ήταν το κατάλληλο για την ανάγνωση των παλμών αυτών, το οποίο επιβεβαιώθηκε με την παραγωγή δοκιμαστικής πλακέτας (η οποία περιλάμβανε όλο το σύστημα ανάγνωσης) και τη διεξαγωγή πειραμάτων.

Για την ανάγνωση του σήματος του αισθητηρίου ανάκλασης QRE1113GR, εξετάστηκαν 2 κυκλώματα επεξεργασίας των παλμών.

##### Διαφορικός συγκριτής τάσης LM393, της Texas Instruments

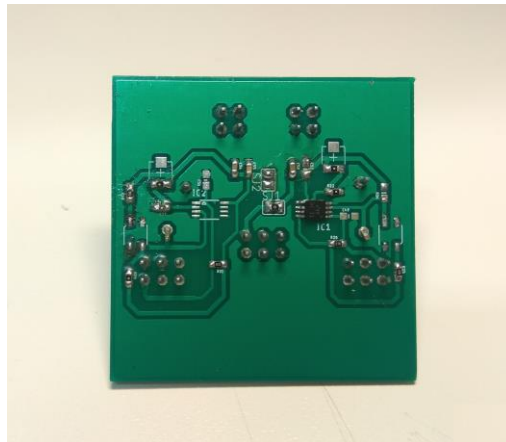
Η λειτουργία του βασίζεται στην παραγωγή σήματος παλμού μέσω της σύγκρισης του σήματος εισόδου του με μια σταθερή τάσης αναφοράς. Στο παρακάτω Σχήμα 4-2 δίνεται το σχηματικό διάγραμμα του συγκριτή LM393.



**Σχήμα 4-2. Σχηματικό διάγραμμα διαφορικού συγκριτή τάσης LM393, της Texas Instruments.**

Η τάση που επιλέχθηκε για τη σύγκριση ήταν 1.6 V, δηλαδή περίπου η μισή από την τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος που είναι 3.3 V. Έτσι λοιπόν χρησιμοποιήθηκε ένας διαιρέτης τάσης με δύο αντιστάσεις για τη ρύθμιση της τάσης σύγκρισης και επιλέχθηκε κατάλληλος

πυκνωτής για το φιλτράρισμα της εξόδου του συγκριτή. Με βάση τη μελέτη αυτή σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε δοκιμαστική πλακέτα, βλ. Εικόνα 4-2, για την διεξαγωγή πειράματων ως προς τη λειτουργία του.

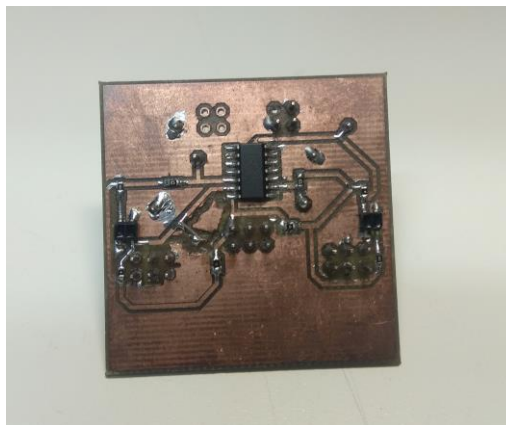


**Εικόνα 4-2. Δοκιμαστική πλακέτα με τον διαφορικό συγκριτή τάσης LM393.**

Hex inverting Schmitt trigger HEF40106B, της Nexperia [26]

Το HEF40106B παρέχει έξι ρυθμιστές αναστροφής (inverting buffers). Κάθε είσοδος έχει ένα κύκλωμα ενεργοποίησης Schmitt. Ο ρυθμιστής αναστροφής (inverting buffer) αλλάζει σε διαφορετικά σημεία για θετικά και αρνητικά σήματα. Η διαφορά μεταξύ της θετικής τάσης ( $V_{T+}$ ) και της αρνητικής τάσης ( $V_{T-}$ ) ορίζεται ως τάση υστέρησης ( $V_H$ ). Το HEF40106B μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του θορύβου και για την "τετραγωνοποίηση" κυματομορφών που δεν μεταβάλλονται γρήγορα [26].

Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε δοκιμαστική πλακέτα για τον έλεγχο του κυκλώματος ανάγνωσης του αισθητήριου ανάκλασης, βλ. Εικόνα 4-3.

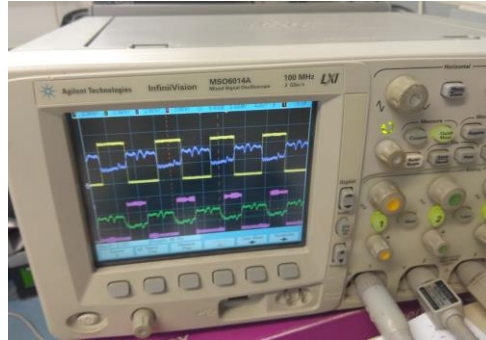
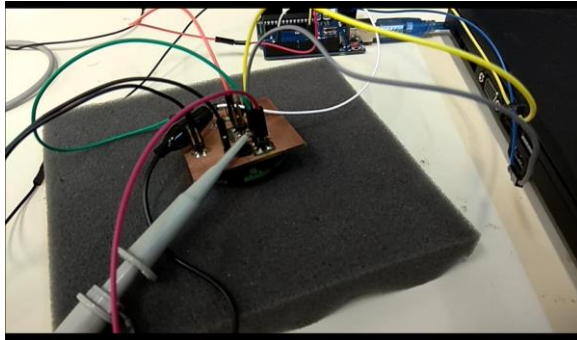


**Εικόνα 4-3. Δοκιμαστική πλακέτα με τον hex inverting Schmitt trigger HEF40106B.**

Μεταξύ των δύο παραπάνω κυκλωμάτων, δηλαδή του LM393 και του HEF40106B, έγιναν πειραματικές δοκιμές και κρίθηκε κατάλληλο κύκλωμα Schmitt Trigger HEF40106B, της Nexperia. Ένας από τους λόγους για τους οποίους επίλεχθηκε το ολοκληρωμένο αυτό είναι ότι χρησιμοποιείται ένα chip και για τα δύο αισθητήρια σε σχέση με τον συγκριτή που χρειαζόταν δύο, ένα για κάθε αισθητήριο. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι εξοικονομείται χώρος στο επίπεδο που τοποθετούνται και δίνεται η δυνατότητα σε περίπτωση που κριθεί αναγκαίο να σχεδιαστεί σε αυτό το επίπεδο και κάποιο άλλο κύκλωμα αναγώσης άλλου αισθητήρα.

Επίσης ένας άλλος λόγος ήταν ότι το κύκλωμα του συγκριτή ήταν πιο ευαίσθητο στο θόρυβο με αποτέλεσμα σε αλλαγή του φωτισμού του δωματίου να επηρεάζεται η έξοδος του σε σχέση με τον Schmitt Trigger οποίος είναι κατάλληλος για την αποκοπή θορυβώδους σήματος παλμού.

Στην παρακάτω Εικόνα 4-4 απεικονίζεται α) αριστερά: η πειραματική διάταξη με τη δοκιμαστική πλακέτα που περιλαμβάνει το Schmitt trigger HEF40106B, β) δεξιά: τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δύο κινητήρων.



Εικόνα 4-4. α) Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης με το Schmitt trigger HEF40106B β) Πειραματικές μετρήσεις στον παλμογράφο.

#### 4.2.2 Αισθητήρες θέσης

##### Οπτικός αισθητήρας laser ADNS-7550, της AVAGO Technologies

Ο οπτικός αισθητήρας ADNS-7550 είναι κατάλληλος για τη τοποθέτηση του στο κυκλικό επίπεδο 4 του μικρορομπότ λόγω του μικρού του μεγέθους, βλ. Εικόνα 4-5. Επίσης ο αισθητήρας αυτός μπορεί να διακρίνει υψηλές ταχύτητες κίνησης μέχρι 30 ips (inch/s) και επιτάχυνσης μέχρι 8 g και έχει την δυνατότητα επιλογής της ανάλυσης της κίνησής του μεταξύ 5 διαφορετικών τιμών, 400,800,1200,1600 και 2000 cpi (counts/inch). Τέλος διαθέτει εσωτερικό κύκλωμα ανίχνευσης εσφαλμένης λειτουργίας του laser του για την προστασία των ματιών του χρήστη.



Εικόνα 4-5. Απεικόνιση του οπτικού αισθητήρα laser ADNS-7550, της AVAGO Technologies.

Οι αισθητήρες επικοινωνούν με τον μικροελεγκτή μέσω του επικοινωνιακού πρωτοκόλλου SPI (Serial Peripheral Interference). Για την λειτουργία του συστήματος εντοπισμού θέσης επιλέχθηκαν 2 αισθητήρες, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εύρεση όχι μόνο των συνιστωσών x, y αλλά και του προσανατολισμού του ρομπότ στο χώρο. Επομένως, θα πρέπει να ο μικροελεγκτής να είναι σε θέση να εξυπηρετεί ταυτόχρονα δύο αισθητήρες. Περισσότερα για την λειτουργία των αισθητηρίων αυτών περιγράφονται στην μεταπτυχιακή εργασία [16].

### Διάταξη μετατροπής της τάσης σε 5V, της Sparkfun.

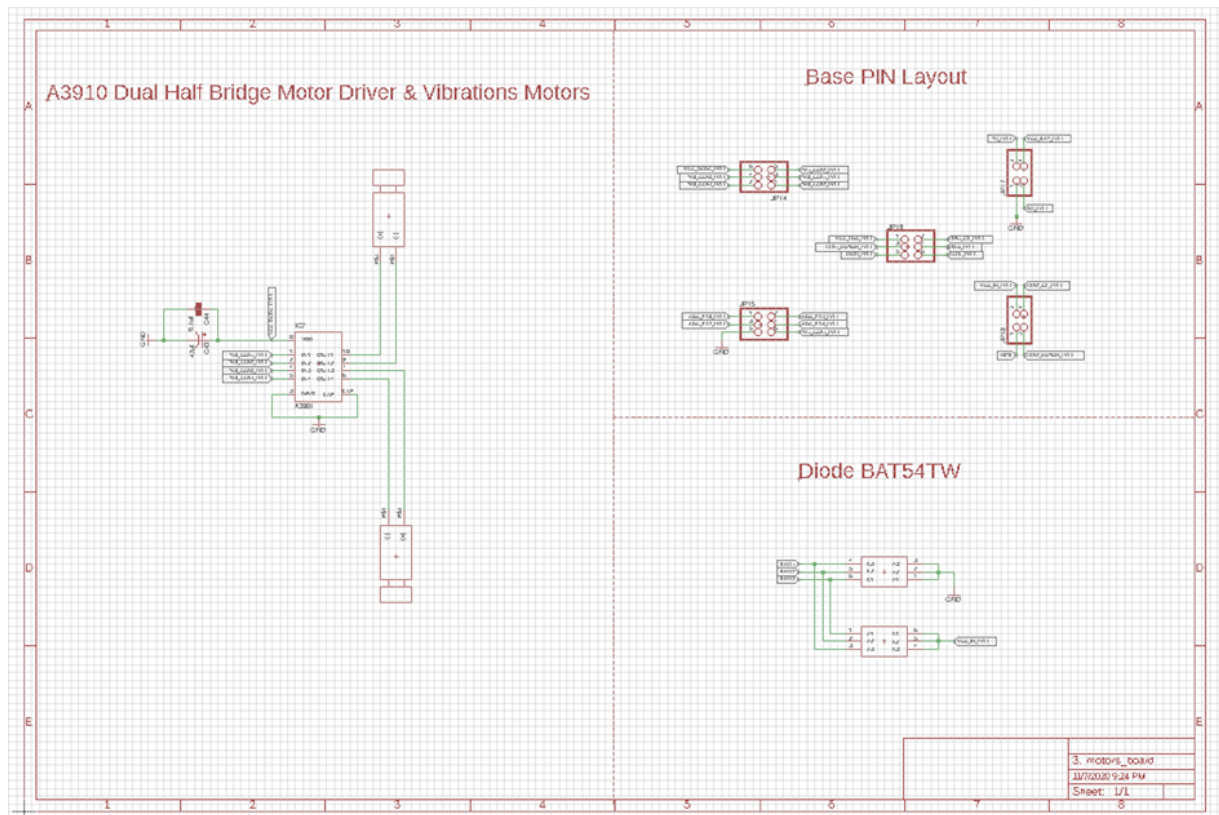
Επειδή το μικρορομπότ δεν έχει δυνατότητα παροχής 5V που χρειάζεται ο αισθητήρας, καθώς η ονομαστική τάση της μπαταρία του είναι 3.7V, προστέθηκε μια διάταξη μετατροπής της τάσης 3.3V, που παρέχεται από το ρομπότ μέσω ενός ακροδέκτη, σε 5V. Η διάταξη μετατροπής που επιλέχθηκε ήταν μια έτοιμη πρόταση της εταιρίας SparkFun, βλ. Εικόνα 4-6. Η διάταξη αυτή αποτελείται από μια συστοιχία πυκνωτών και ενός πηνίου. Η μετατροπή γίνεται με τη βοήθεια του ρυθμιστή τάσης NCP1402, της εταιρίας ON Semiconductor.



Εικόνα 4-6. Διάταξη μετατροπής της τάσης σε 5V, της Sparkfun.

## 4.3 Επίπεδο κινητήρων

Το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει τους δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές που είναι υπεύθυνοι για την κίνηση της πλατφόρμας. Το σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 3 της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE δίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4-3.



Σχήμα 4-3. Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 3 της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.

### 4.3.1 Κινητήρες

#### Μικροκινητήρες δόνησης 304-100, της Precision Microdrives

Οι μικροκινητήρες αυτοί διατηρήθηκαν από τον προηγούμενο σχεδιασμό λόγω της εξαιρετικής ποιότητας των υλικών κατασκευής και αντοχής του στο χρόνο, βλ. Εικόνα 4-7. Επιπλέον, υποστηρίζεται η δυνατότητα για απευθείας εγκατάσταση στη βάση της πλατφόρμας, λόγω των τριών ακροδεκτών στήριξης που διαθέτει.

Οι μικροκινητήρες δόνησης, της Precision Microdrives κρίνονται κατάλληλοι λόγω των μικρών διαστάσεων και βάρους τους ενώ η τάση λειτουργίας τους στα 3V μπορεί να καλυφθεί από την πηγή ενέργειας του ρομπότ με τη χρήση της μονάδας διαχείρισης ισχύος TPS65721, που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.



**Εικόνα 4-7. Μικροκινητήρας δόνησης 304-100, της Precision Microdrives**

Παρατίθενται παρακάτω στον Πίνακα 4-1 τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κινητήρων 304-100, της Precision Microdrives.

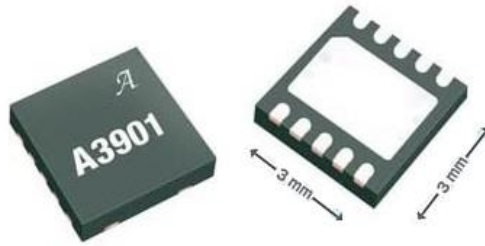
**Πίνακας 4-1. Τεχνικά χαρακτηριστικά μικροκινητήρα δόνησης 304-100 [28].**

Τεχνικά χαρακτηριστικά	304-100
Τάση λειτουργίας (V)	3
Μέγιστες στροφές ανά λεπτό (rpm)	15.000 ±3.000
Μέγιστο ρεύμα λειτουργίας (mA)	76
Μέγιστο ρεύμα εκκίνησης (mA)	120

#### Μονάδα οδήγησης των κινητήρων A3901, της Allegro

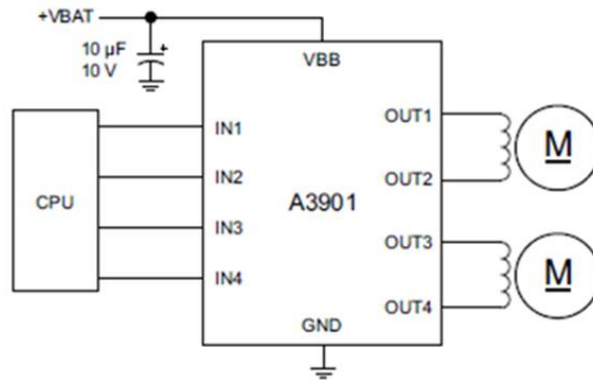
Η μονάδα αυτή περιέχει δύο Η-Γέφυρες πλήρους λειτουργίας με παλμοδότηση συχνότητας έως και 250 kHz. Οι γέφυρες αυτές αλλάζουν την πολικότητάς τους για την επίτευξη της ωρολογιακής και ανθρωπολογιακής φοράς των μικροκινητήρων δόνησης και έτσι παρέχεται η δυνατότητα για πρόσω και ανάστροφη κίνηση καθώς και πέδη.

Η κατανάλωσή του σε κατάσταση αναμονής περιορίζεται στα 90nA. Οι εξωτερικές διαστάσεις του, όπως φαίνεται και στην παρακάτω Εικόνα 4-8 είναι εξαιρετικά μικρές, μειώνοντας την απαιτούμενη επιφάνεια της βαθμίδας ηλεκτρονικών του μικρορομπότ στην οποία θα ενσωματωθεί.



**Εικόνα 4-8. Μονάδα οδήγησης των κινητήρων A3901, της Allegro.**

Το τσιπ A3901 καλύπτει πλήρως τις ενεργειακές απαιτήσεις των μικροκινητήρων καθώς μπορεί να τους παρέχει ρεύμα έντασης μέχρι και 400mA, μέσω του κάθε ζεύγους εξόδων του, βλ. Σχήμα 4-4.



**Σχήμα 4-4. Σχηματικό διάγραμμα A3901 ελέγχου δύο κινητήρων συνεχούς ρεύματος.**

#### 4.3.2 Σημεία στήριξης του ρομπότ (βάση) και κατάλληλο δάπεδο κίνησης

##### Σημεία στήριξης της μικρορομποτικής πλατφόρμας

Τα σημεία στήριξης του ρομπότ είναι πολύ σημαντικά καθώς μέσα από τη μέλετη που έγινε στην διδακτορική διατριβή [13] είναι απαραίτητα για τη σωστή κίνηση του. Στο επίπεδο αυτό, βλ. Εικόνα 4-9, οι οπές όπου και τοποθετούνται τα σφαιρίδια αυτά σχεδιάστηκαν έτσι ώστε το ύψος από το δάπεδο να είναι στο 1 mm για να μπορεί να γίνεται η ανάγνωση από τους αισθητήρες θέσης, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.



**Εικόνα 4-9. Απεικόνιση της κάτω όψης του επιπέδου 3 του μικρορομπότ.**

Μέσω των αγώγιμων μεταλλικών σφαιριδίων, που αποτελούν και τα σημεία επαφής του μικρορομπότ με την επιφάνεια εργασίας, υπάρχει η δυνατότητα φόρτισης της μπαταρίας καθώς έχει μελετηθεί και σχεδιαστεί κύκλωμα διαδρόμων και κατάλληλων διόδων ώστε αν εφαρμοστεί τάση στα σημεία στήριξης, η τάση αυτή να πηγαίνει στη μονάδα διαχείρισης ισχύος TPS65721 και κατ' επέκταση στο υπόλοιπο ρομπότ. Η εφαρμογή της τάσης στα σημεία στήριξη του ρομπότ θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με την κατασκευή ενός σταθμού φόρτισης για τα ρομπότ, όπου θα μπορούσαν να τοποθετηθούν όταν δεν θα χρησιμοποιούνταν και θα φόρτιζε η μπαταρία τους μέχρι να ξανά χρησιμοποιηθούν.

#### Επιφάνεια κίνησης της μικρορομποτικής πλατφόρμας

Η επιφάνεια εργασίας η οποία θα πρέπει να χρησιμοποιείται για την σωστή κίνηση του ρομπότ πρέπει να είναι όσο τον δυνατόν πιο λεία, δηλαδή να έχει χαμηλό συντελεστή τριβής της τάξης του  $\mu = 0.5$ .

Η επιφάνεια, που χρησιμοποιούνταν μέχρι στιγμής και απεικονίζεται στην Εικόνα 4-10 πληρούσε την παραπάνω προϋπόθεση και το μικρορομπότ μπορούσε να κινηθεί κανονικά.



**Εικόνα 4-10. Επιφάνεια κίνησης της μικρορομποτικής πλατφόρμας.**

Το πρόβλημα που παρουσιάστηκε με την χρήση των οπτικών αισθητήρων laser του επιπέδου 4 είναι ότι δεν πραγματοποιείται η ανάγνωση της θέσης του καθώς η επιφάνεια αυτή είναι γυαλιστερή. Έτσι για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού χρησιμοποιήθηκε μια άλλη επιφάνεια, ο γρανίτης της Εικόνας 4-11, τέτοιος ώστε να έχει περίπου ίδια τιμή με τον συντελεστή τριβής της προηγούμενης επιφάνειας και να μην είναι γυαλιστερός.



**Εικόνα 4-11. Νέα επιφάνεια κίνησης της μικρορομποτικής πλατφόρμας.**



## 5 Αισθητήρας δύναμης

### 5.1 Εισαγωγή

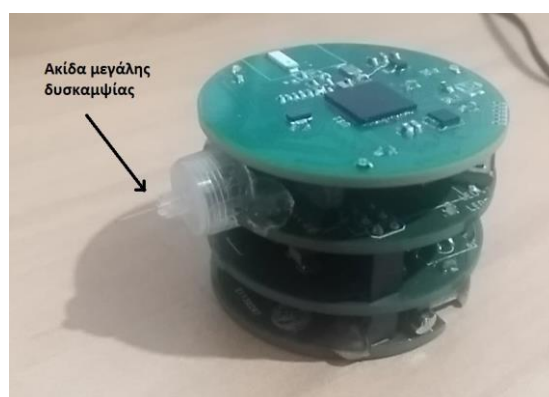
Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί συνέχεια της βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης της μικρορομποτικής πλατφόρμας καθώς από την πρωτότυπη μορφή της όπου είχε τοποθετηθεί αισθητήριο δύναμης δεν είχε πραγματοποιηθεί αντίστοιχη μελέτη για την εγκατάσταση αντίστοιχου αισθητηρίου στη μεταγενέστερη έκδοση. Επίσης αποτελεί τον στόχο που παρατέθηκε στη διπλωματική εργασία [17] καθώς στο σχεδιασμό του επιπέδου 4 είχε προβλεφθεί ο χώρος για την ενσωμάτωση του κατάλληλου κυκλώματος που θα χρειαστεί για την ανάγνωση των σημάτων του αισθητηρίου δύναμης.

Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να παραθέσει τα απαραίτητα στοιχεία της θεωρίας και τη μελέτη του σχεδιασμού και κατασκευής του αισθητηρίου. Τα κύρια σημεία του κεφαλαίου περιλαμβάνουν την μελέτη κατασκευής του ελάσματος που αποτελεί την βάση του αισθητηρίου και την μελέτη σχεδιασμού του κυκλώματος ανάγνωσης του σήματος εξόδου του αισθητηρίου. Τέλος γίνεται αναφορά στην κατασκευή ενός νέου επιπέδου που θα φέρει το ζητούμενο κύκλωμα και της ενσωμάτωσης του μαζί με το αισθητήριο στο μικρομπότ για τη διεξαγωγή πειράμων.

### 5.2 Μελέτη υλοποίησης συστήματος ανάδρασης δύναμης

Η πλατφόρμα θα χειρίζεται αντικείμενα όπως δείγματα μικροσκοπίου, δεξαμενές κυττάρων, ηλεκτρονικά, οπτικά εξαρτήματα, κ.τ.λ. Τέτοια αντικείμενα έχουν διαστάσεις από μερικά κυβικά εκατοστά και μάζα μέχρι 100gr. Συνεπώς εάν θεωρήσουμε συντελεστή τριβής  $\mu = 0.5$ , η πλατφόρμα πρέπει να παράγει δυνάμεις μικροχειρισμού με πλάτος που να κυμαίνεται ελεγχόμενα στο εύρος των 10-500mN.

Για το σκοπό αυτό τοποθετήθηκε βραχίονας υπο μορφή ακίδας στο εξωτερικό τοίχωμα της πλατφόρμας με μεγάλη δυσκαμψία ( $k > 5000 \text{ N/m}$ ) έτσι ώστε να διεξαχθούν πειράματα για την εξέταση των δυνάμεων που ασκεί το μικρορομπότ σε σταθερό αντικείμενο, βλ. Εικόνα 5-1.



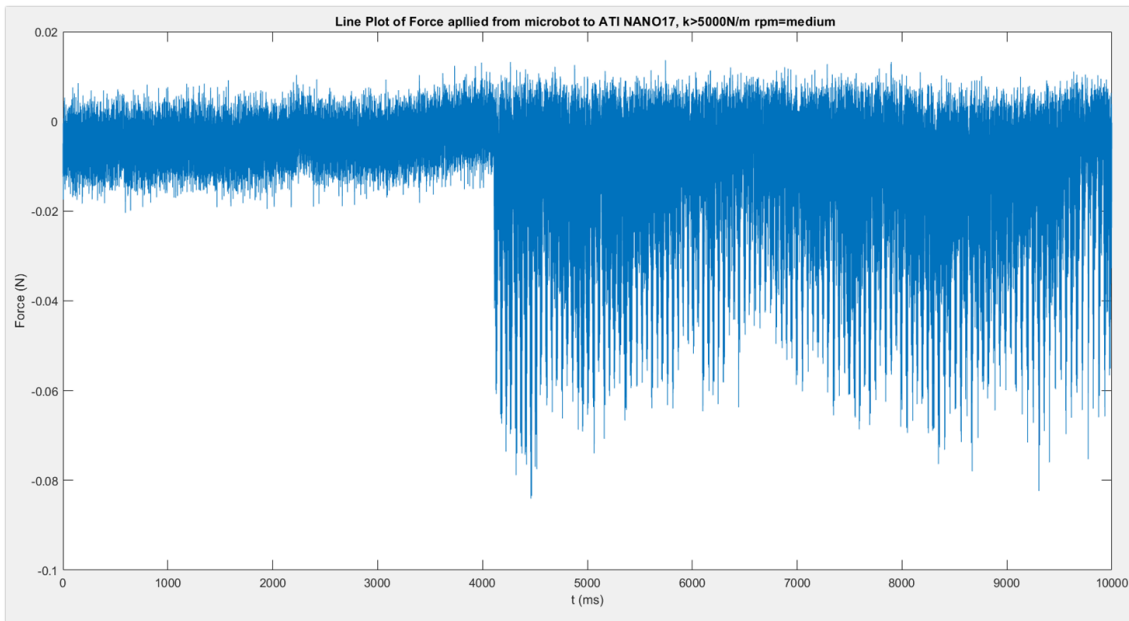
**Εικόνα 5-1. Απεικόνιση βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ προσαρτημένης ακίδα μεγάλης δυσκαμψίας.**

Για την εκτέλεση του πειράματος εξέτασης δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε ως σταθερό αντικείμενο ο αισθητήρας δύναμης NANO17 της εταιρίας ATI Industrial Automation, βλ. Εικόνα 4-2. Με τη βοήθεια του συγκεκριμένου αισθητήρα θα προσδιοριστεί το εύρος της δύναμης που ασκεί το υπάρχον μικρόμπότ στα υπο χειρισμό αντικείμενα.

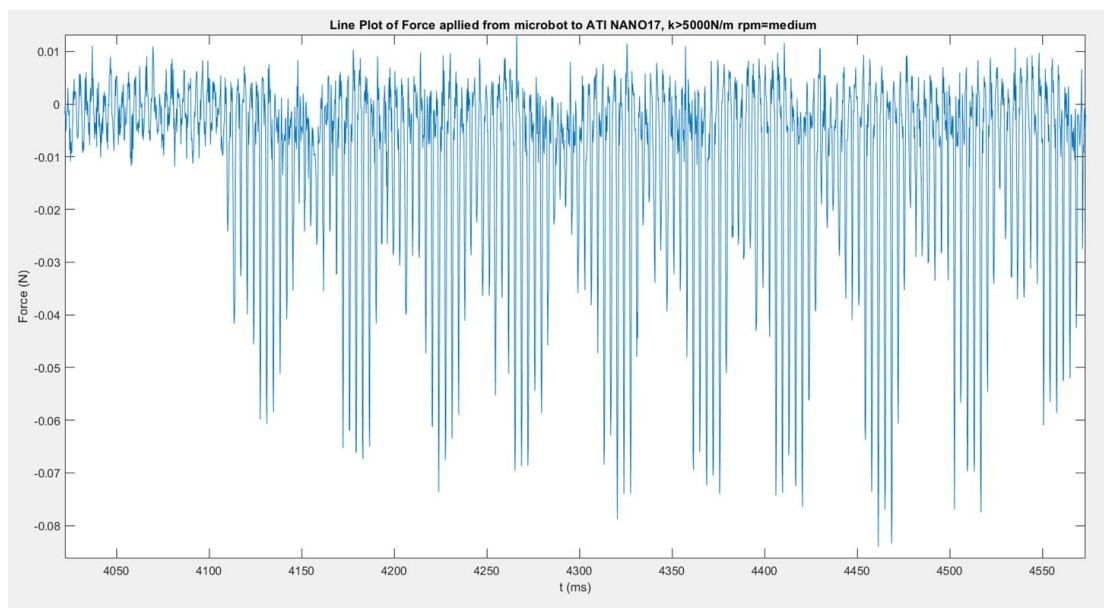


**Εικόνα 5-2. Απεικόνιση του αισθητήρα δύναμης ATI NANO17**

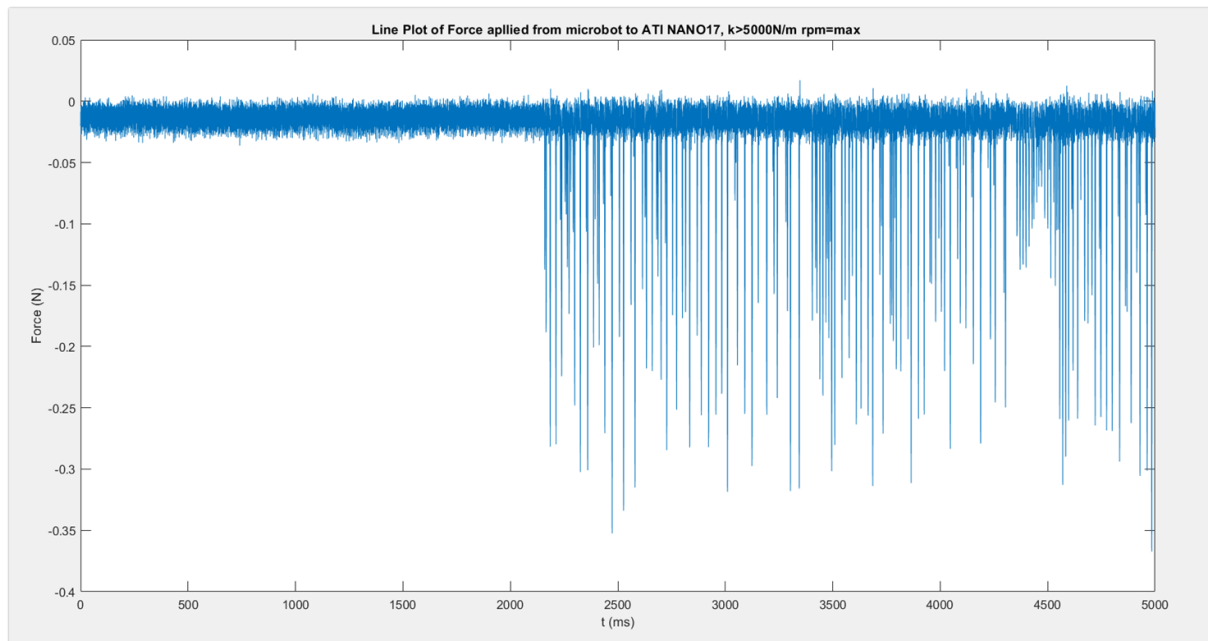
Πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα για την μέτρηση του εύρους των δυνάμεων που ασκούνται σε σταθερό αντικείμενο. Ένα για μέσες ταχύτητες στροφών των μικροκινητήρων δόνησης του μικρορομπότ, βλ. Σχήμα 5-1, 5-2 και ένα για μέγιστο αριθμό στροφών, βλ. Σχήμα 5-3,5-4.



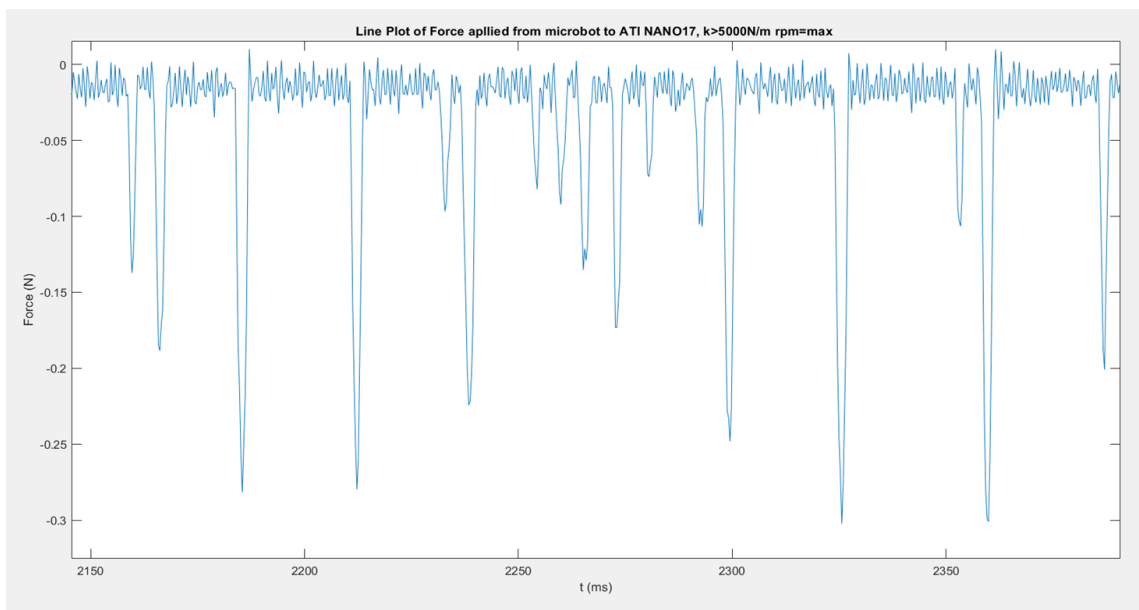
**Σχήμα 5-1. Πειραματικά αποτελέσματα μέτρησης δύναμης του ρομπότ με ακίδα μεγάλης δυσκαμψίας για rpm=max.**



**Σχήμα 5-2. Μεγενθυμμένη απεικόνιση των πειραματικών αποτελεσμάτων μέτρησης δύναμης του ρομπότ με ακίδα μεγάλης δυσκαμψίας για rpm=max.**



**Σχήμα 5-3. Πειραματικά αποτελέσματα μέτρησης δύναμης του ρομπότ με ακίδα μεγάλης δυσκαμψίας για rpm=medium.**



**Σχήμα 5-4. Μεγενθυμένη απεικόνιση των πειραματικών αποτελεσμάτων μέτρησης δύναμης του ρομπότ με ακίδα μεγάλης δυσκαμψίας για rpm=medium.**

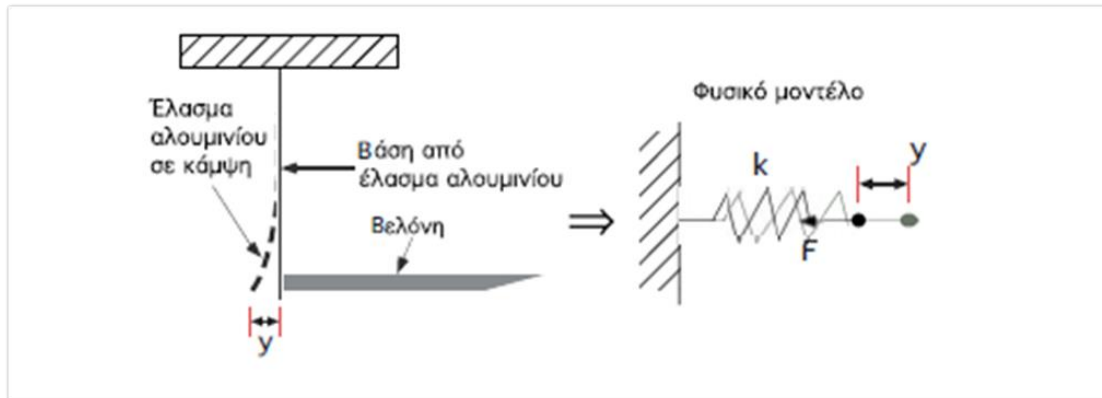
Από τα Σχήματα 5-1 και 5-3 γίνεται αντιληπτό ότι το εύρος των δυνάμεων, που μπορεί να ασκήσει το υπάρχον μικρορομπότ σε σταθερό αντικείμενο είναι 40-300mN, μέσα δηλαδή στο εύρος των δυνάμεων μικροχειρισμού που υπολογίζεται θεωρητικά. Από τα Σχήματα 5-2 και 5-4 παρατηρείται ότι η δύναμη που ασκείται δεν είναι σταθερή και ότι παρουσιάζει κυματώσεις κρουστικής μορφής, όπως προβλέπει το θεωρητικό μοντέλο που έχει αναπτυχθεί στην διδακτορική διατριβή [13] για βραχίονα με μεγάλη δυσκαμψία.

Η επίλυση του θεωρητικού μοντέλου προτείνει ότι η οριακή τιμή δυσκαμψίας, που θα πρέπει να έχει ο βραχίονας υπο μορφή ακίδας ώστε να μην ασκούνται κρουστικές δυνάμεις στα υποχειρισμό αντικείμενα, είναι  $k = 1000 \text{ N/m}$ .

### 5.2.1 Θεωρητική μελέτη ελάσματος

Για να έχει τη δυνατότητα η μικρορομποτική πλατφόρμα να εκτελεί βασικές εργασίες σε μικροδείγματα όπως για παράδειγμα, η μετατόπιση μικροαντικειμένων και η έγχυση σε ωάρια με διαστάσεις 500-1000 nm, θα πρέπει να κατασκευαστεί ένα σύστημα μικρότερης δυκαμψίας της οριακής τιμής που αναφέρθηκε προηγουμένως για να εξαλειφθούν οι κρουστικές δυνάμεις.

Προς τούτο, τοποθετείται πάνω στην πλατφόρμα βελόνη με μήκος 15 mm, διάμετρο κύριου σώματος 320 μm διάμετρο αιχμής 30 μm. Η βάση της βελόνης τοποθετείται πάνω σε έλασμα, βλ. Σχήμα 5-5, το οποίο στερεώνεται στην πλατφόρμα.



Σχήμα 5-5. α) Βάση αλουμινίου πάνω στην οποία τοποθετείται η βελόνη. β) Το φυσικό μοντέλο της βάσης[].

Το φυσικό μοντέλο της βάσης αναπαρίσταται με ελατήριο δυσκαμψίας  $k$  με βέλος κάμψης του ελάσματος είναι  $y$ .

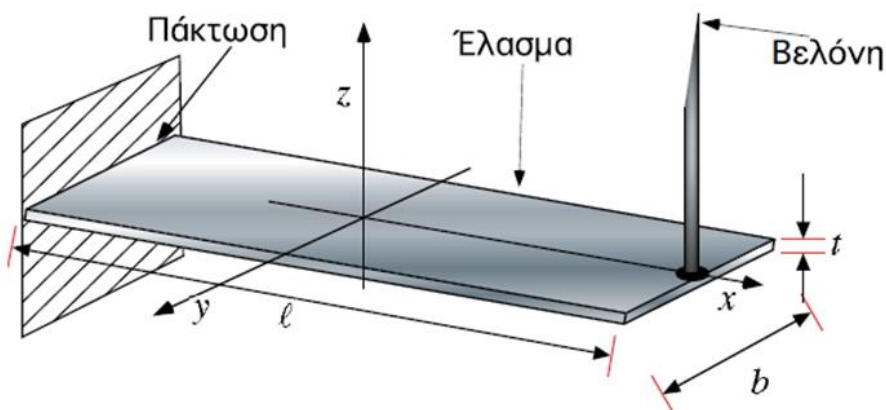
Η σχέση που συνδέει το βέλος κάμψης  $\Delta z$  με τη δύναμη  $F$  που ασκείται στην άκρη του ελάσματος δίνεται από:

$$P = \frac{3EI}{l^3} z \quad (5-1)$$

όπου  $E$  το μέτρο ελαστικότητας (Young) του υλικού,  $l$  είναι το μήκος του ελάσματος και  $I$  η μαζική ροπή αδρανείας του ελάσματος γύρω από τον άξονα  $y$ , βλ. Σχήμα 5-6, η οποία δίνεται από:

$$I = \frac{bt^3}{12} \quad (5-2)$$

όπου  $b$  το πλάτος και  $t$  το πάχος αντίστοιχα του ελάσματος.



Σχήμα 5-6. Βάση πάνω στην οποία τοποθετείται η βελόνη [13].

Συνεπώς η εξίσωση (5.1) γράφεται:

$$P = k\Delta z \quad (5-3)$$

και

$$k = \frac{Ebt^3}{4l^3} \quad (5-4)$$

όπου είναι η δυσκαμψία του ελατηρίου που μοντελοποιεί το έλασμα. Το έλασμα είναι από φύλλο αλουμινίου και τις τιμές των χαρακτηριστικών του τις παρουσιάζει ο Πίνακας 5-1, από όπου προκύπτει ότι η τιμές αυτές δίνουν δυσκαμψία  $k = 130 \text{ N/m}$ . Οπότε το σύστημα πλατφόρμας-βελόνης δεν ασκεί κρουστικές δυνάμεις στα υπό χειρισμό αντικείμενα.

**Πίνακας 5-1. Τιμές παραμέτρων ελάσματος αλουμινίου.**

Παράμετρος	Τιμή
E [GPa]	69
t [μm]	100
l [mm]	15
b [mm]	8

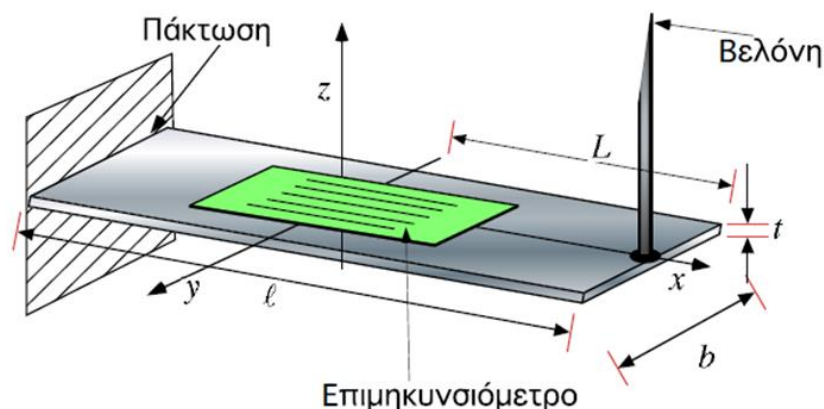
### 5.2.2 Σχεδιασμός αισθητηρίου δύναμης

Ο αισθητήρας δύναμης υλοποιείται χρησιμοποιώντας ένα επιμηκνσιόμετρο το οποίο επικολλάται πάνω στο έλασμα της βάσης. Το πρώτο βήμα για την επιλογή του επιμηκνσιόμετρου είναι ο προσδιορισμός του εύρους δυνάμεων της πλατφόρμας και ακολούθως ο προσδιορισμός του εύρους παραμόρφωσης του ελάσματος.

Από τα προκαταρκτικά πειράματα με τον εξωτερικό αισθητήρα δύναμης ATI NANO 17, προσδιορίστηκε το εύρος των δυνάμεων που μπορεί να ασκήσει η πλατφόρμα σε σταθερό αντικείμενο και το οποίο είναι  $F = \{0.04 \text{ N}, 0.3 \text{ N}\}$ . Χρησιμοποιώντας την τιμή της μέγιστης δύναμης στον ακόλουθο τύπο της επιμήκνσης του ελάσματος προκύπτει η μέγιστη επιμήκνση που αναμένεται από το έλασμα:

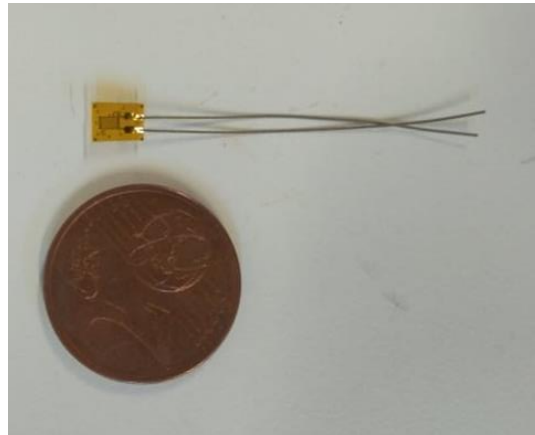
$$\varepsilon = \frac{6PL}{Ebt^2} = 0.3\% \quad (5-5)$$

όπου  $\varepsilon$  είναι η επιμήκνση του ελάσματος κατά τον άξονα  $x$  και  $L$  είναι το μήκος από τη μέση της ενεργής επιφάνειας του επιμηκνσιόμετρου έως το σημείο εφαρμογής της δύναμης, βλ. Σχήμα 5-7. Συνεπώς, προκύπτει ότι η παραμόρφωση του ελάσματος είναι ίση με  $l * \varepsilon = 45 \mu\text{m}$ .



**Σχήμα 5-7. Βάση ελάσματος με προσθήκη επιμηκνσιόμετρου [13].**

Στη συνέχεια επιλέγεται επιμηκυσιόμετρο με χαρακτηριστικά τέτοια, ώστε η παραμόρφωση του ελάσματος να καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του εύρους επιμήκυνσης του επιμηκυσιόμετρου. Επιλέγεται λοιπόν, το επιμηκυσιόμετρο SG-1/350-TY13 της OMEGA, βλ. Εικόνα 5-3.



**Εικόνα 5-3. Απεικόνιση του επιμηκυσιόμετρου SG-1/350-TY13, της OMEGA.**

Το επιμηκυσιόμετρο αυτό έχει ενεργό μήκος 5mm έτσι ώστε τα 45 μm να αντιστοιχούν περίπου σε 1% επιμήκυνσης, το οποίο είναι μια συνηθισμένη τιμή (κυμαίνονται συνήθως από 1% έως 3%) ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του αισθητηρίου είναι ο συντελεστής επιμήκυνσης (Gage Factor)  $G = 2.13$ , η ηλεκτρική αντίσταση  $R = 350 \Omega$  και η μεταβολή της ηλεκτρικής του αντίστασης η οποία δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{\Delta R}{R} = G\varepsilon \quad (5-6)$$

### **5.3 Σχεδιασμός και κατασκευή συστήματος ανάδρασης δύναμης**

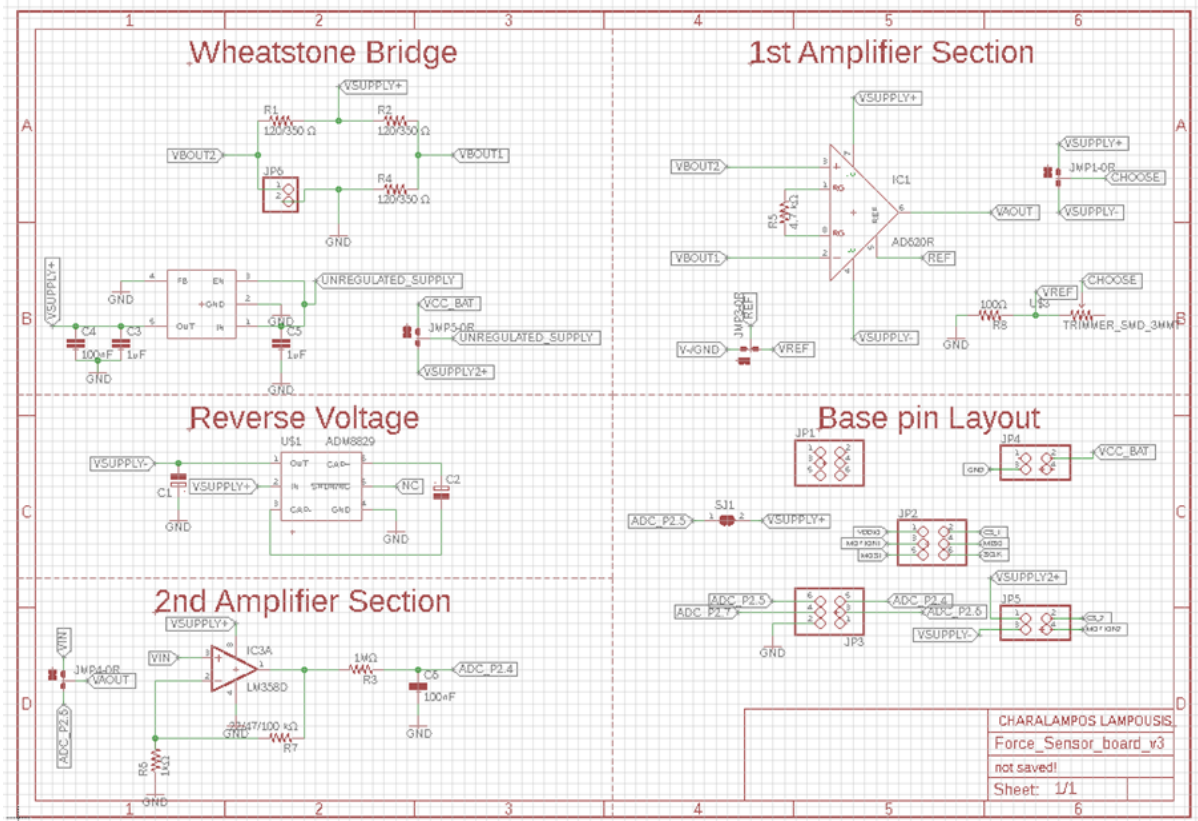
Ολοκληρώνοντας την μελέτη υλοποίησης του αισθητηρίου με δυνατότητα ανάδρασης δύναμης, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός του κατάλληλου κυκλώματος για την ανάγνωση των σημάτων του.

Έτσι λοιπόν κρίνεται αναγκαίο η δημιουργία ενός νέου επιπέδου 5 του ρομπότ, το οποίο φέρει το κύκλωμα ανάγνωσης, και θα μπορεί να συνδέεται με τα υπόλοιπα επίπεδα του ρομπότ για να πραγματοποιηθούν πειράματα.

#### **5.3.1 Σχεδιασμός συστήματος ανάδρασης δύναμης**

Στο Σχήμα 5-8 απεικονίζεται το σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 5 στο σχεδιαστικό πρόγραμμα EAGLE, το οποίο είναι συμβατό με τη βελτιωμένη έκδοση του μικρορομπότ και φέρει το ηλεκτρονικό κύκλωμα για την ανάγνωση του αισθητηρίου δύναμης.

Επιπλέον στο επίπεδο αυτό περιλαμβάνονται μια γέφυρα Wheatstone με αντιστάσεις ίδιες με την τιμή της αντίστασης του επιμηκυσιόμετρου ( $R=350 \Omega$ ) για τη μέτρηση της μεταβολής της αντίστασης του, όταν παραμορφώνεται το έλασμα. Επιπλέον περιλαμβάνονται δύο ενισχυτές για την ενίσχυση του σήματος της εξόδου της γέφυρας Wheatstone και ένα απλό χαμηλοπερατό φίλτρο RC για τη μείωση του ηλεκτρικού θορύβου του σήματος. Τέλος υπάρχουν και κάποια άλλα ηλεκτρονικά στοιχεία που βοηθούν στη λειτουργία του κυκλώματος και αναφέρονται στη συνέχεια.



Σχήμα 5-8. Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 5 της βελτιωμένης 2ης έκδοσης του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE.

Instrumentation amplifier AD620, της Analog Digital.

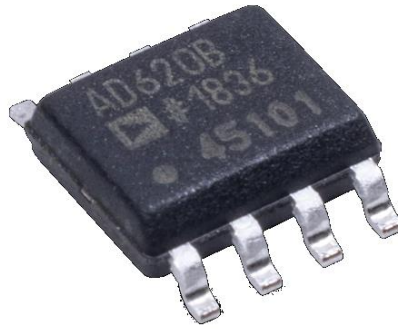
Για πρώτο στάδιο της ενίσχυσης του σήματος της εξόδου της γέφυρας Wheatstone χρησιμοποιήθηκε ο ενισχυτής AD620, βλ. Εικόνα 5-4, ο οποίος ενδείκνυται για την συγκεκριμένη εφαρμογή (Bridge amplifier) καθώς μειώνει σημαντικά τον ηλεκτρικό θόρυθο.

Επιπλέον απαιτεί μόνο μία εξωτερική αντίσταση για να ορίσει το κέρδος της ενίσχυσής του, το οποίο έχει εύρος από 1 έως 10.000 και η οποία συνδέεται μεταξύ δύο ακροδεκτών του ενισχυτή. Η εξίσωση που δίνει το κέρδος ενίσχυσης  $G$  δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$G_1 = \frac{49.4k\Omega}{R_G} + 1 \quad (5-7)$$

όπου  $R_G$  είναι η αντίσταση που ορίζει το κέρδος. Για την ενίσχυση του σήματος επιλέχθηκε αντίσταση  $R_G = 4,94 \text{ k}\Omega$  έτσι ώστε το κέρδος της ενίσχυσης να είναι  $G_1 = 10$ .

Ακόμα διαθέτει και ένα ακροδέκτη αναφοράς, ο οποίος έχει τη δυνατότητα μηδενισμού του σήματος εξόδου του ενισχυτή και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις που το φορτίο δεν γειώνεται με εξαιρετική ακρίβεια με το υπόλοιπο κύκλωμα. Επειδή λοιπόν στο σύστημα μας το αισθητήριο (επιμηκυσιόμετρο) δεν γειώνεται με εξαιρετική ακρίβεια, χρησιμοποιείται ένας διαιρέτης τάσης με μεταβλητή αντίσταση, που η έξοδος του συνδέεται με τον ακροδέκτη αναφοράς για μηδενισμό του σήματος του ενισχυτή.



**Εικόνα 5-4. Απεικόνιση του ενισχυτή AD620, της Analog Digital.**

Τελεστικός ενισχυτής LM358, της Texas Instruments

Στο δεύτερο στάδιο της ενίσχυσης του σήματος του αισθητηρίου χρησιμοποιήθηκε ο τελεστικός ενισχυτής LM358, βλ. Εικόνα 5-5, ως μη αναστρέψιμος τελεστικός ενισχυτής (non-inverting Operational Amplifier), δηλαδή το σήμα τάσης εισόδου ( $V_{in}$ ) εφαρμόζεται απευθείας στο μη αναστρέψιμο (+) τερματικό εισόδου που σημαίνει ότι το κέρδος της εξόδου του ενισχυτή γίνεται θετικό.

Ο έλεγχος ανατροφοδότησης του μη αναστρέψιμου τελεστικού ενισχυτή επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός μέρους του σήματος της τάσης εξόδου πίσω στο τερματικό εισόδου αναστροφής (-) μέσω ενός διαιρέτη τάσης  $R_f$  και  $R_g$ , δημιουργώντας ξανά αρνητική ανάδραση, βλ. Σχήμα 5-9.

Η εξίσωση που δίδει το κέρδος της ενίσχυσης του LM358 δίνεται από το παρακάτω τύπο:

$$G_2 = \frac{R_f}{R_g} + 1 \quad (5-8)$$

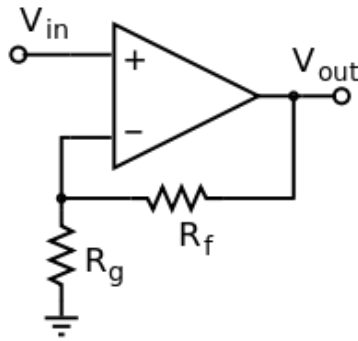
όπου  $R_f$  και  $R_g$  είναι οι αντιστάσεις του διαιρέτη τάσης. Για τις αντιστάσεις αυτές επιλέχθηκαν κατάλληλες τιμές  $R_f = 100 \text{ k}\Omega$  και  $R_g = 1 \text{ k}\Omega$  έτσι ώστε το κέρδος της ενίσχυσης του σήματος εξόδου από τον δεύτερο ενισχυτή να είναι  $G_2 = 100$ .

Έτσι το συνολικό κέρδος της ενίσχυσης του σήματος της εξόδου της γέφυρας Wheatstone είναι  $A = G_2 * G_2 = 1000$ .



**Εικόνα 5-5. Απεικόνιση του ενισχυτή LM358, της Texas Instruments.**

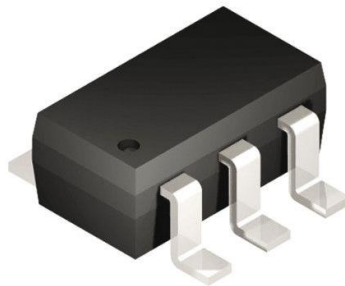




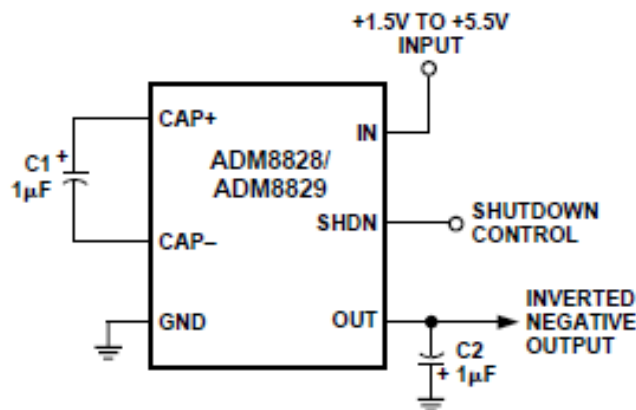
Σχήμα 5-9. Σχηματικό διάγραμμα του ενισχυτή LM358, της Texas Instruments.

Μετατροπέας τάσης ADM8828, της Analog Digital

Ο ADM8828 είναι ένας μετατροπέας τάσης της τροφοδοσία ενός κυκλώματος και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία αρνητικής τάσης από θετική είσοδο, βλ. Εικόνα 5-6. Οι τάσεις εισόδου του ADM8828 κυμαίνονται από +1.5 V έως +5.5 V και μπορεί να αναστρέψει σε αρνητική τάση εξόδου από -1.5 V έως -5.5 V. Το ολοκληρωμένο αυτό, είναι ιδανικό για τη δημιουργία αρνητικής τάσης με την οποία θέλουμε να τροφοδοτήσουμε τον ενισχυτή AD620. Μόνο δύο εξωτερικοί πυκνωτές (C1 και C2) απαιτούνται για την αντιστροφή αυτή, βλ. Σχήμα 5-10.



Εικόνα 5-6. Απεικόνιση του μετατροπέα τάσης ADM8828, της Analog Digital.

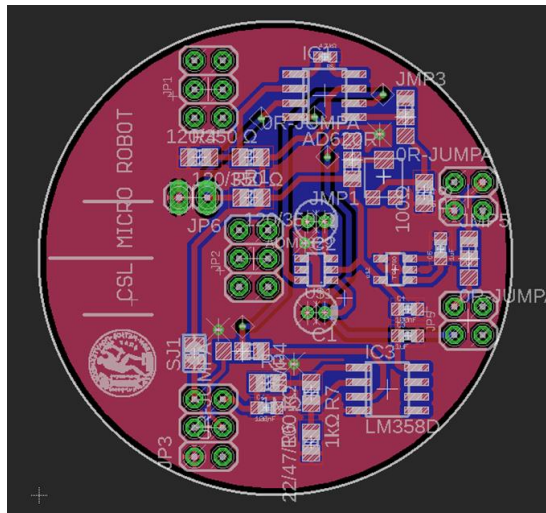


Σχήμα 5-10. Σχηματικό διάγραμμα του μετατροπέα τάσης ADM8828.

### 5.3.2 Κατασκευή συστήματος ανάδρασης δύναμης

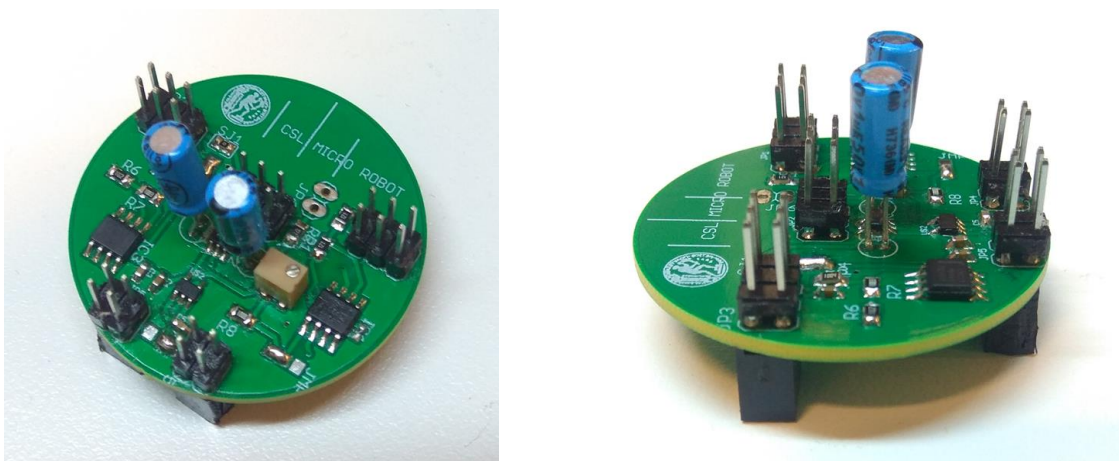
Έχοντας ολοκληρώσει τον σχεδιασμό του σχηματικού διαγράμματος, προχωρήσαμε στον σχεδιασμό της εκτυπώσιμης μορφής της πλακέτας φέρει το κύκλωμα ανάγνωσης του αισθητήριου δύναμης, βλ. Εικόνα 5-7. Η σχεδιαστική μελέτη που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει όλες τις κατευθύνσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Όπως και στις υπόλοιπες βαθμίδες του ρομπότ, έτσι και εδώ σχεδιάστηκαν δύο επιφάνειες (πάνω-κάτω όψη) της πλακέτας PCB ώστε να γίνει καλύτερη διαχείριση του κυκλικού δίσκου της πλακέτας. Το ίδιο πραγματοποιήθηκε και με την περιοχή γείωσης, στην πάνω και στην κάτω πλευρά του επιπέδου 5, με κατάλληλο κενό μεταξύ της γείωσης και των διαδρόμων τροφοδοσίας και σημάτων για την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων.



Εικόνα 5-7. Τελική μορφή απεικόνισης εκτυπώσιμης μορφής επιπέδου 5.

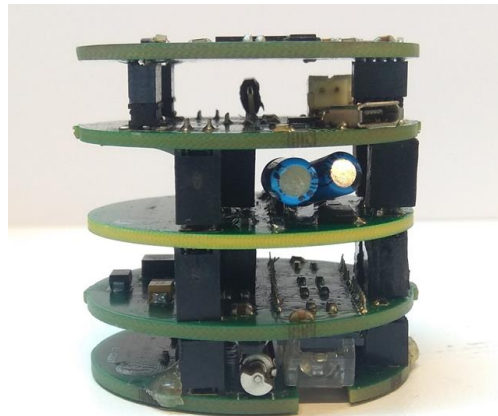
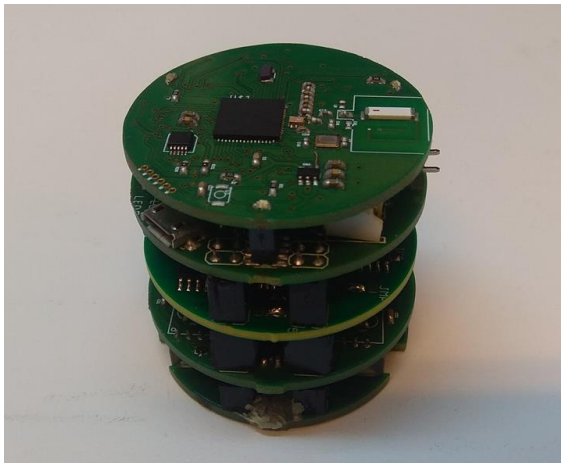
Μετά την ολοκλήρωση της σχεδιαστικής μελέτης ακολούθησε η κατασκευή της πλακέτας που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου. Για την κατασκευή της τελικής πλακέτας τοποθετήθηκαν όλα τα στοιχεία και κολλήθηκαν με συμβατικές μεθόδους, βλ. Εικόνα 5-8.



Εικόνα 5-8. Τελική μορφή απεικόνισης της πλακέτας του κυκλώματος ανάγνωση του αισθητήρα.

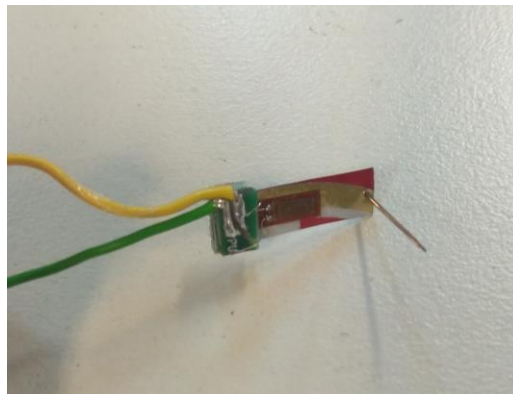
Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η ενσωμάτωση του επιπέδου 5 στο σύστημα του μίρορομπότ, βλ. Εικόνα 5-9. Επισημαίνεται ότι η ενσωμάτωση του επιπέδου αυτού έγινε μεταξύ του επιπέδου 2, της τροφοδοσίας του ρομπότ και του επιπέδου 4, με τους οπτικούς

αισθητήρες laser για την ανάγνωση της θέσης του και τους αισθητήρες που είναι υπεύθυνοι για την ανάγνωση των στροφών του κινητήρα.



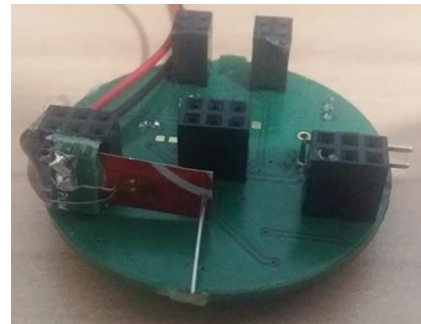
**Εικόνα 5-9. Βελτιωμένη έκδοση του μικρορομπότ με ενσωματωμένο το επίπεδο 5 α) πάνω όψη β) Πλάγια όψη.**

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του επιπέδου 5, που φέρει το κύκλωμα ανάγνωσης του αισθητηρίου δύναμης, σειρά έχει η κατασκευή του αισθητήριου αυτού, ύστερα από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, βλ. Εικόνα 5.10.

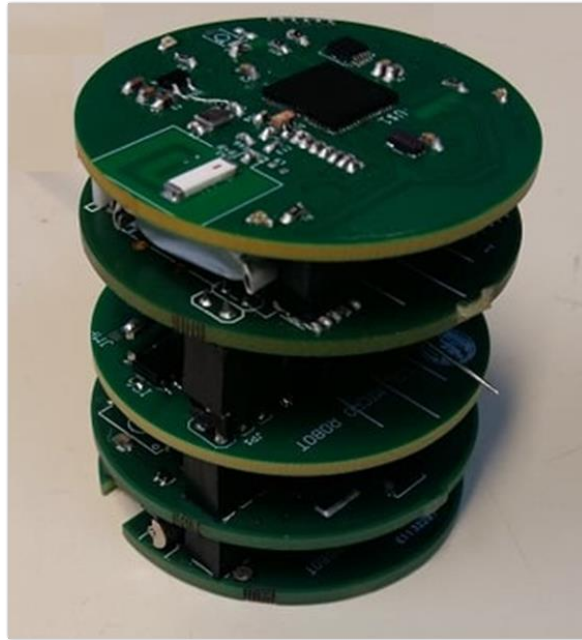


**Εικόνα 5-10. Τελική μορφή απεικόνισης της κατασκευή του αισθητήρα δύναμης.**

Στη συνέχεια, ο αισθητήρας δύναμης πακτώθηκε στους συνδετήρες (connectors) του επιπέδου 2 που το συνδέουν με το από κάτω επίπεδο 5, του κυκλώματος ανάγνωσης, βλ. Εικόνα 5-11 και ακολούθως πραγματοποιήθηκε η εκ νέου συναρμολόγηση του μικρορομπότ με τον αισθητήρα δύναμης, βλ. Εικόνα 5-12.



**Εικόνα 5-11. Απεικόνιση της τοποθέτησης του αισθητήρα δύναμης στο επίπεδο 2.**



Εικόνα 5-12. Τελική μορφή απεικόνισης της βελτιωμένης έκδοσης του μικρορομπότ με ενσωματωμένο τον αισθητήρα δύναμης.

### 5.3.3 Διεξαγωγή πειραμάτων

Ο αισθητήρας δύναμης που κατασκευάστηκε είναι αναλογικός αισθητήρας, το ηλεκτρικό κύκλωμα μέτρησης του οποίου αποτελείται από δύο στάδια ενίσχυσης. Η μέτρηση από τον μικροελεγκτή θα γίνει από τους αναλογικο-ψηφιακούς μετατροπείς ADC, που διαθέτει ο μικροελεγκτής CC430.

Σύμφωνα με την μελέτη που έχει γίνει, η έξοδος του αισθητήρα πρέπει να βρίσκεται στο εύρος τάσης μεταξύ 0 – 3.3V. Η τροφοδοσία του μικροελεγκτή, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι ίση με 3.3V επομένως η μέγιστη τάση που μπορούν να δεχθούν οι αντίστοιχοι ακροδέκτες των ADC του μικροελεγκτή είναι 3.3V. Σύμφωνα, με την μελέτη που έγινε στην προηγούμενη ενότητα, η μέτρηση των αισθητήρων έχει μέγιστη τιμή τα 0.3 N.

Ο μικροελεγκτής CC430 έχει δυνατότητα επιλογής μεταξύ δύο ADC. Ενός μεγέθους 10-bit και ενός μεγέθους 12-bit. Περισσότερα για ανάλυση του καταχωρητή του ADC και της μέτρησης του σήματος σε επίπεδο λογισμικού δίνονται στην μεταπτυχιακή εργασία [16]. Επιλέγεται ο καταχωρητής 12-bit, ώστε να έχουμε μεγαλύτερη ανάλυση στη μέτρηση.

Σε μονάδες τάσης, η ανάλυση που προσφέρει ο συγκεκριμένος ADC είναι ίση με:

$$resolution = \frac{V_{CC}}{2^{12}} = 0.8mV \quad (5-9)$$

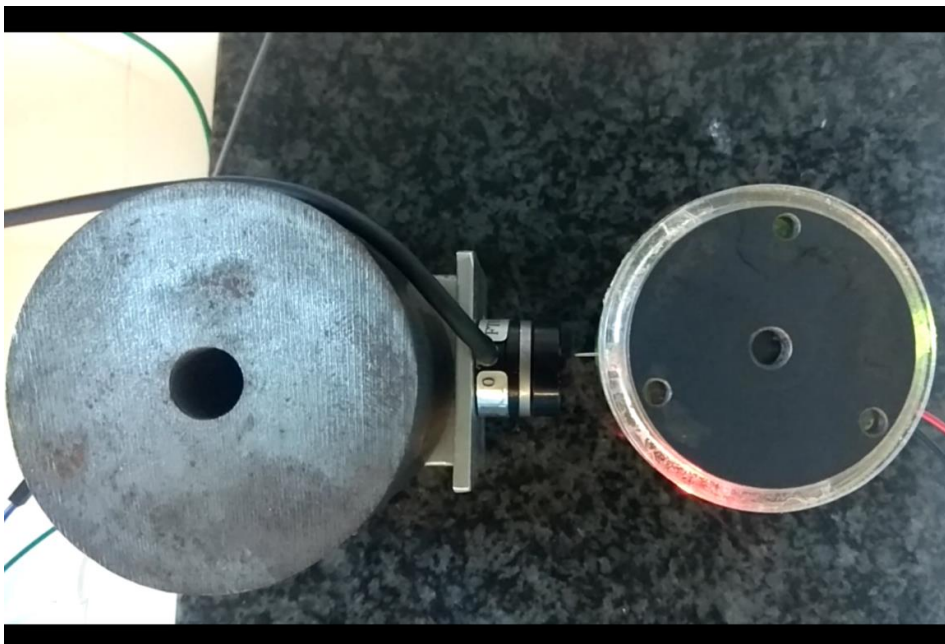
Και σε μονάδες δύναμης mN, με δεδομένο ότι η μέγιστη τάση είναι ίση με 0.3N, η ανάλυση θα είναι:

$$resolution = \frac{F}{2^{12}} = 1.41mN \quad (5-10)$$

Εφόσον βρέθηκε και η ανάλυση του αισθητήριου δύναμης που κατασκευάστηκε, δημιουργήθηκε πειραματική διάταξη στην οποία το ρομπότ στην τελική μορφή του με ενσωματωμένο τον αισθητήρα δύναμης θα ασκήσει δύναμη στον εξωτερικό αισθητήρα δύναμης ATI NANO17 για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, βλ. Εικόνα 5-13 και 5-14.



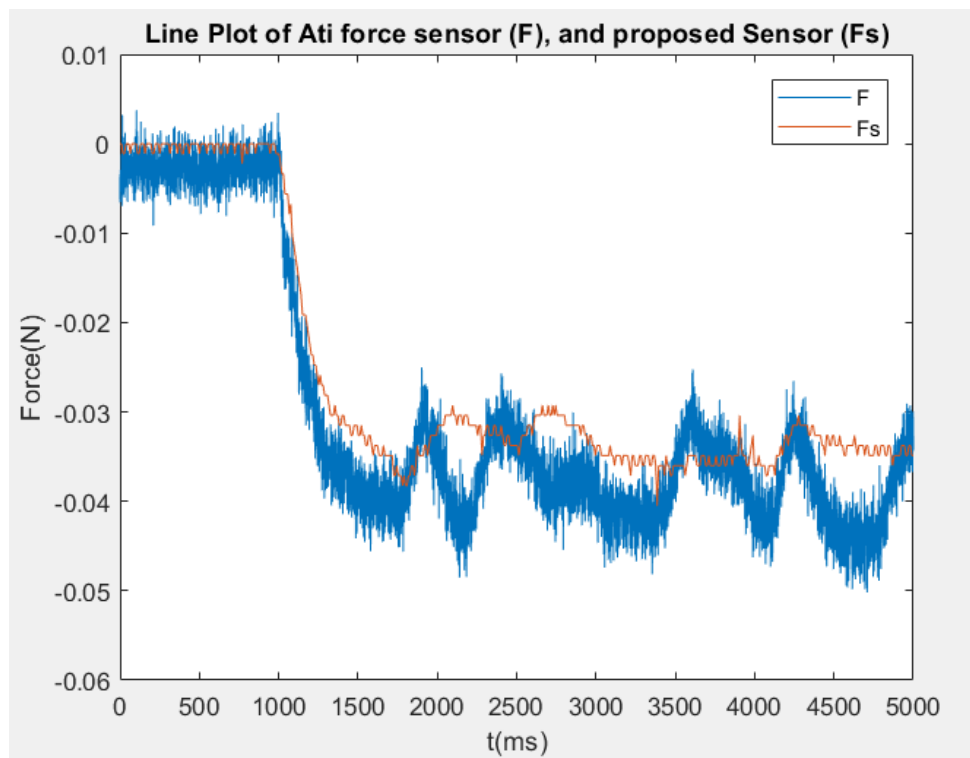
**Εικόνα 5-13. Απεικόνιση της πειραματική διάταξη για μέτρησης της δύναμης (πλάγια όψη).**



**Εικόνα 5-14. Απεικόνιση της πειραματική διάταξη για μέτρησης της δύναμης (πάνω όψη).**

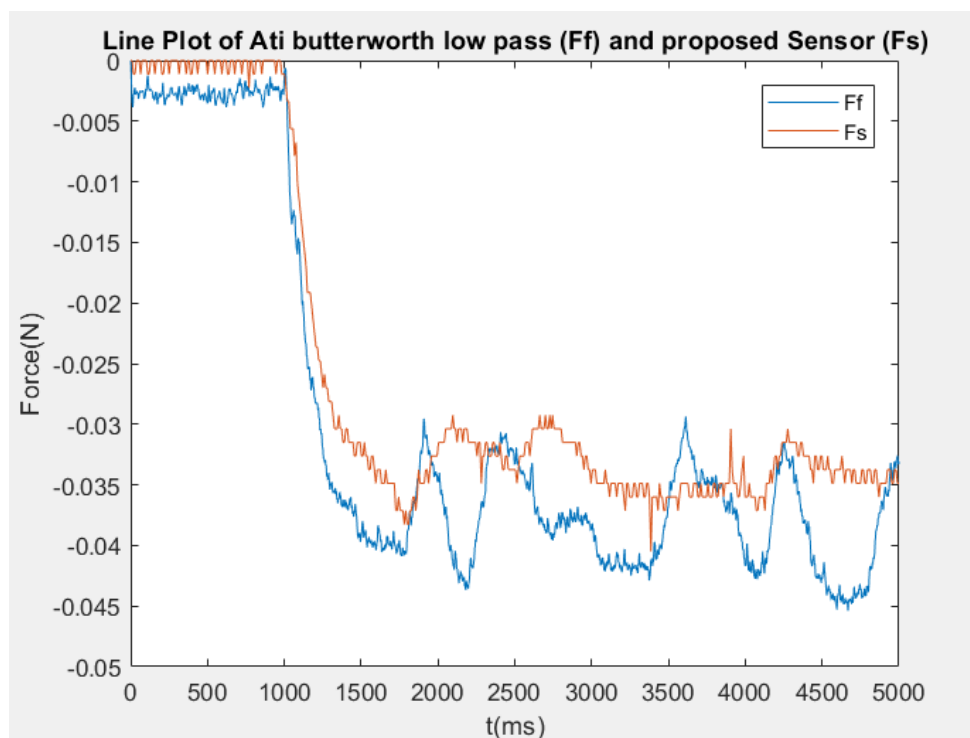
Τα Σχήματα 5-11 έως 5-16 δείχνουν τα διαγράμματα μέτρησης του προτεινόμενου αισθητήρα δύναμης και του εξωτερικού αισθητήρα ATI NANO17. Πραγματοποιήθηκαν 3 πείραματα για τον έλεγχο της επαναληψιμότητας του συστήματος που υλοποιήθηκε για ανάδραση της δύναμης, στα οποία επιλέχθηκε μέση ταχύτητα των στροφών των μικροκινητήρων δόνησης.

### 1<sup>ο</sup> πείραμα: μέτρηση της δύναμης



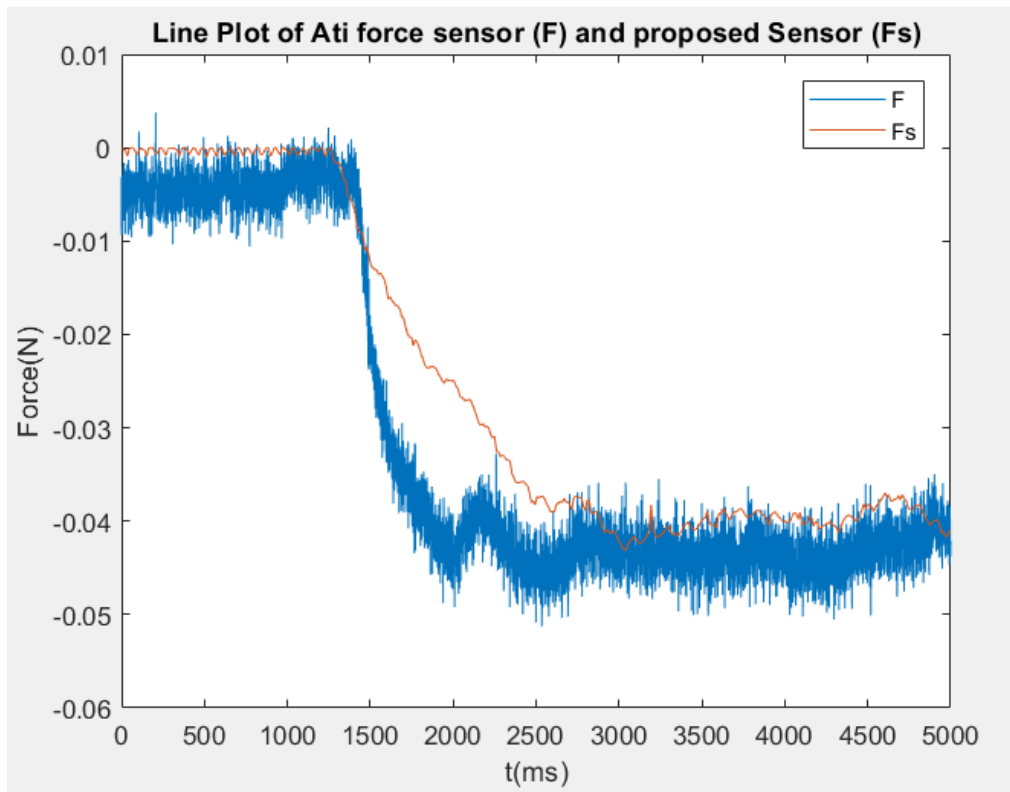
Σχήμα 5-11. Διάγραμμα 1<sup>ου</sup> πειράματος μέτρησης της δύναμης του προτεινόμενου αισθητήρα αναδρασης δύναμης και του εξωτερικού αισθητήρα ATI NANO17.

Στα Σχήματα 5-12, 5-14 και 5-16 χρησιμοποιήθηκε ένα χαμηλοπερατό butterworth φίλτρο για την μείωση του ηλεκτρικού θορύβου του αισθητήρα δύναμης ATI NANO17.

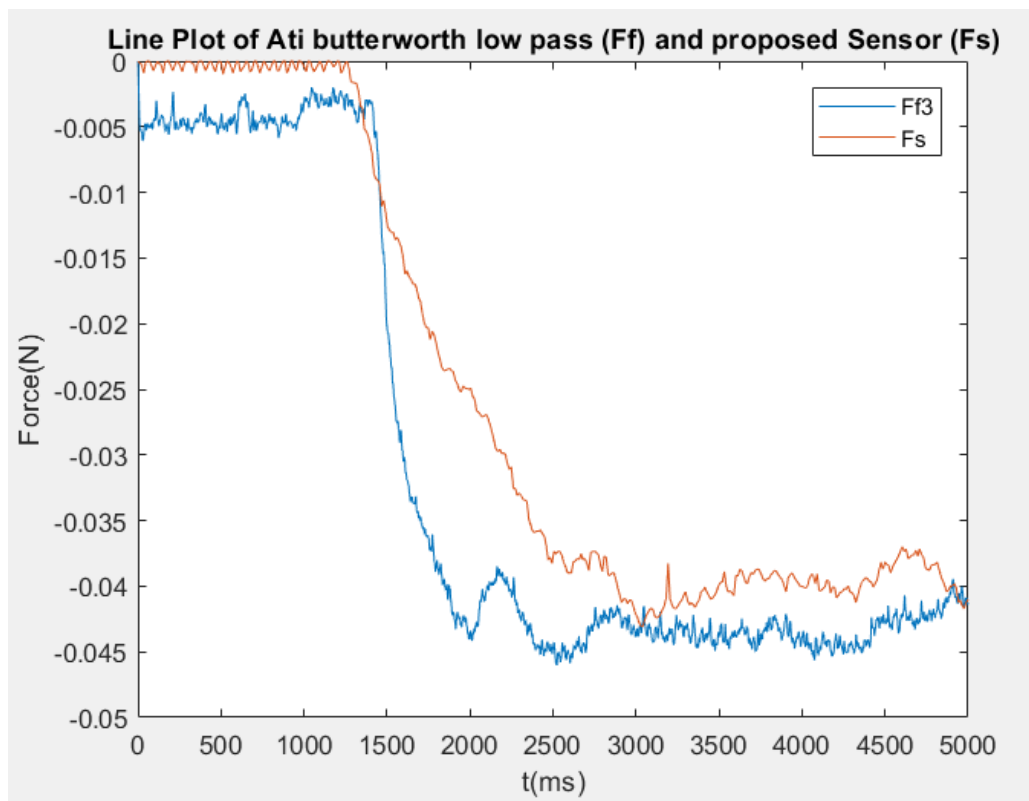


Σχήμα 5-12. Φιλτραρισμένο διάγραμμα 1<sup>ου</sup> πειράματος μέτρησης της δύναμης του προτεινόμενου αισθητήρα αναδρασης δύναμης και του εξωτερικού αισθητήρα ATI NANO17.

## 2<sup>ο</sup> πείραμα: μέτρηση της δύναμης

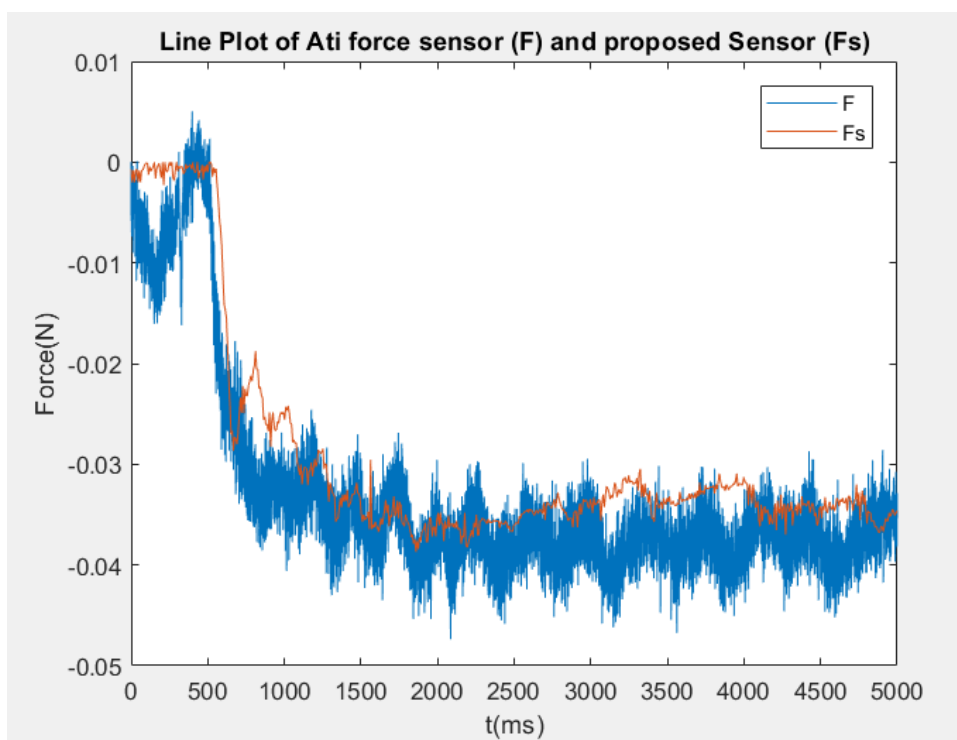


Σχήμα 5-13. Διάγραμμα 2<sup>ου</sup> πειραμάτος μέτρησης της δύναμης του προτεινόμενου αισθητήρα αναδρασης δύναμης και του εξωτερικού αισθητήρα ATI NANO17.

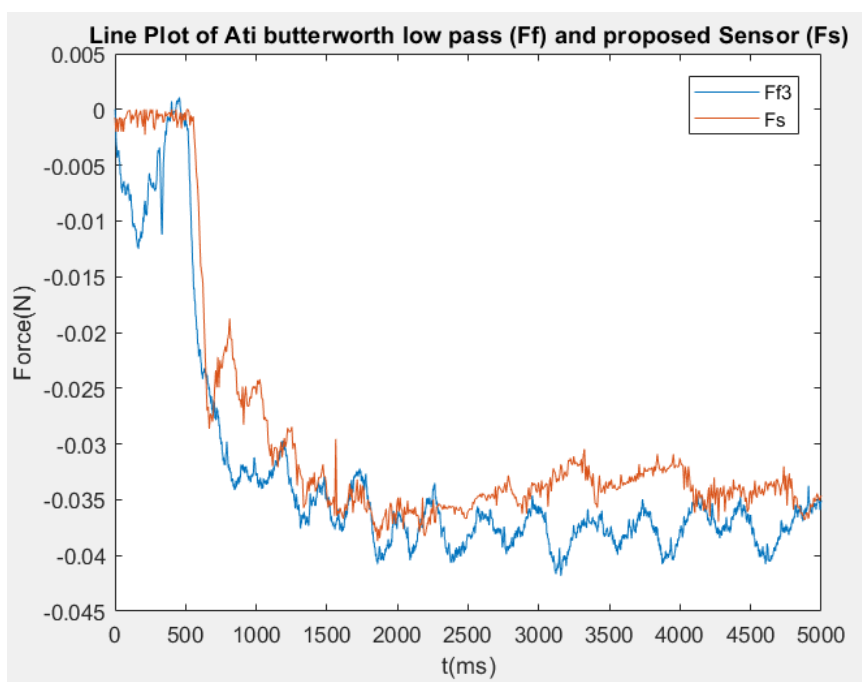


Σχήμα 5-14. Φιλτραρισμένο διάγραμμα 2<sup>ου</sup> πειραμάτος μέτρησης της δύναμης του προτεινόμενου αισθητήρα αναδρασης δύναμης και του εξωτερικού αισθητήρα ATI NANO17.

### 3<sup>ο</sup> πείραμα: μέτρηση της δύναμης



Σχήμα 5-15. Διάγραμμα 3<sup>ου</sup> πειραμάτος μέτρησης της δύναμης του προτεινόμενου αισθητήρα αναδρασης δύναμης και του εξωτερικού αισθητήρα ATI NANO17.



Σχήμα 5-16. Φιλτραρισμένο διάγραμμα 3<sup>ου</sup> πειραμάτος μέτρησης της δύναμης του προτεινόμενου αισθητήρα αναδρασης δύναμης και του εξωτερικού αισθητήρα ATI NANO17.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι ο προτεινόμενος αισθητήρας προσεγγίζει αρκετά καλά τον εξωτερικό αισθητήρα δύναμης NANO17 της ATI καθώς επίσης ότι υπάρχει και επαναληψιμότητα των μετρήσεων.



## 6 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

### 6.1 Συμπεράσματα

Ο κύριος σκοπός της παρούσας δπλωματικής εργασίας ήταν η κατασκευή μιας νέας βελτιωμένης 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου που θα φέρει σύστημα ανάδρασης δύναμης.

Για την κατασκευή της βελτιωμένης της μικρορομποτικής πλατφόρμας, αναλύθηκαν αρχικά τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν από τον προηγούμενο σχεδιασμό. Παράλληλα έγινε η παρουσίαση του βελτιωμένου σχεδιασμού παραθέτοντας όλες τις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε επίπεδο του συστήματος του μικρορομπότ για τη αναβάθμιση του. Ολοκληρώνοντας τον σχεδιασμό, παρουσιάστηκε η συναρμολόγηση της νέας μικρορομποτικής πλατφόρμας.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η παρουσίαση της αρχιτεκτονικής όλων των επιπέδων του βελτιωμένου μικρορομπότ. Η αναφορά στην αρχιτεκτονική των επιπέδων κρίθηκε αναγκαία καθώς θα αποτελεί ένα τεχνικό εγχειρίδιο το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εκτός από τους επόμενους χρήστες, και από άτομα που ασχολούνται με τον σχεδιασμό και κατασκευή αντίστοιχων ή παρόμοιων κυκλωμάτων. Επίσης, βοηθάει στην ακόμα καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του μικρορομπότ.

Επιπλέον πραγματοποιήθηκε θεωρητική μελέτη υλοποίησης συστήματος ανάδρασης δύναμης. Εξετάστηκαν οι δυνάμεις που μπορεί να ασκήσει το ρομπότ σε σταθερό αντικείμενο με ακίδα μεγάλης δυσκαμψίας. Οι δυνάμεις αυτές που παρατηρήθηκαν ήταν κρουστικής μορφής και για να αποφευχθούν χρησιμοποιήθηκε έλασμα με μικρή δυσκαμψία. Ως αισθητήριο δύναμης χρησιμοποιήθηκε ένα επιμηκυνσιόμετρο το οποίο προσκολλάται στο έλασμα αλουμινίου.

Σχεδιάστηκε κατάλληλο κύκλωμα για τη μέτρηση του σήματος του επιμηκυνσιομέτρου και κατασκευάστηκε ένα νέο επίπεδο 5 που φέρει όλα τα απαραίτητα ηλεκτρονικά στοιχεία που χρειάζεται το κύκλωμα. Κατασκευάστηκε και τοποθετήθηκε ο προτεινόμενος αισθητήρας δύναμης στο σύστημα της ρομποτικής πλατφόρμας και διεξήχθησαν πειράματα για τον έλεγχο και της λειτουργίας του. Παρατηρήθηκε ότι ο προτεινόμενος αισθητήρας προσεγγίζει αρκετά καλά των εξωτερικό αισθητήρα δύναμης NANO17 της ATI καθώς επίσης ότι υπάρχει και επαναληψιμότητα στις μετρήσεις.

Τέλος κατά τη διάρκεια πειραμάτων διαπιστώθηκε ότι, όταν η βελόνη του αισθητηρίου ασκούσε σε σταθερό αντικείμενο δυνάμεις μεγαλύτερες από 0.05 N, δεν μετατοπιζόταν μόνο κατά μήκος μιας ευθείας αλλά επιπλέον παρουσίαζε μια ελάχιστη περιστροφή γύρω από το σημείο σύνδεσής της με το έλασμα. Το αποτέλεσμα είναι ότι το επιμηκυνσιόμετρο μπορεί να καταγράφει και ροπές που οφείλονται στην γωνία της βελόνης και οι οποίες δεν μεταφέρονται στο αντικείμενο. Για την αποφευχθούν οι ροπές αυτές, προτείνεται νέος σχεδιασμό του αισθητήρα δύναμης η οποία να περιλαμβάνει ελάσματα σε παράλληλη σύνδεση.

### 6.2 Μελλοντική Εργασία

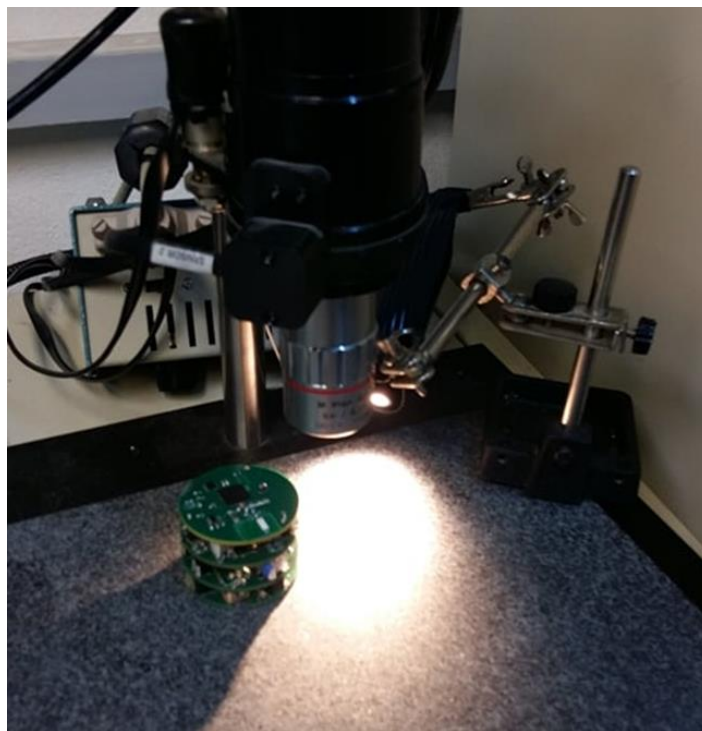
Η εισαγωγή του επιπέδου 5 με το κύκλωμα ανάγνωσης του αισθητηρίου δύναμης μεγαλώνει τον όγκο της μικρορομποτικής πλατφόρμας και αλλάζει τις παραμέτρους για την κίνηση της. Στο επίπεδο 4 της βελτιωμένης έκδοσης έχει προβλεφθεί χώρος έτσι ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί το κύκλωμα αυτό. Έχοντας λοιπόν ελέγξει τη λειτουργία του κυκλώματος αυτού

θα μπορούσε να σχεδιαστεί το επίπεδο 4 ξανά ώστε να μειωθεί ο όγκος του μικρορομπότ όπως είναι στη τωρινή κατάσταση χωρίς το επιπλέον επίπεδο.

Επίσης εκτός από τη μεταφορά του κυκλώματος του επιπέδου 5 στο επίπεδο 4 θα μπορούσε να γίνει και μεταφορά του αισθητηρίου ανάδρασης δύναμης σε χαμηλότερο επίπεδο όπως για παράδειγμα στο επίπεδο 3 των κινητήρων. Η μεταφορά αυτή θα οφελήσει στο να μην δημιουργούνται μαζί με τις δυνάμεις κατακόρυφες ροπές στα υπο χειρισμό αντικείμενα της πλατφόρμας.

Σε μια μελλοντική εργασία, θα μπορούσε να γίνει νέος σχεδιασμός αισθητηρίου δύναμης με δύο ελάσματα σε παράλληλη σύνδεση έτσι ώστε να αποφευχθούν οι ροπές που οφείλονται στην γωνία της βελόνης και προκαλούν μια μικρή περιστροφή γύρω από το σημείο σύνδεσής της με το έλασμα.

Τέλος σε συνδιασμό με την μελέτη της μεταπτυχιακής εργασίας [16], θα πρέπει να κατασκευαστούν και άλλα μικρορομπότ με στόχο το σχεδιασμό και εκτέλεση πιο απαιτητικών και σύνθετων πειραμάτων συνεργατικού χαρακτήρα κάτω από το μικροσκόπιο, βλ. Εικόνα 6-1.



**Εικόνα 6-1. Απεικόνιση βελτιωμένης έκδοση του μικρορομπότ στο χώρο εργασίας του.**

## Βιβλιογραφία

- [1] Brufau J. et al. "MICRON: Small Autonomous Robot for Cell Manipulation Applications", *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Volume, Issue, 18-22 April 2005*, pp. 844 –849.
- [2] Fatikow, S., & Benz, M. (1998). "A microrobot-based automated micromanipulation station for assembly of microsystems." *Computers in Industry*, 36(1-2), 155–162.
- [3] Feng, L., Di, P., & Arai, F. (2016). "High-precision motion of magnetic microrobot with ultrasonic levitation for 3-D rotation of single oocyte." *The International Journal of Robotics Research*, 35(12), 1445–1458.
- [4] Martel S., Ph.D "Introduction to the NanoWalker: A miniature autonomous robot capable of various tasks at the molecular and atomic scales", *BioInstrumentation Laboratory Massachusetts Institute of Technology May 2000*.
- [5] S. Hellan and F. Storvik, "Using the CC1101 in the European 868 MHz SRD band", *Application Report, AN050–April 2009*
- [6] Tagliareni F., et al. "Manipulating biological cells with a micro-robot cluster", *Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on Volume, Issue, 2-6 Aug. 2005*, pp. 1414 – 1419
- [7] Vartholomeos P., Papadopoulos E., "Analysis and Design of a Novel Mini-platform Employing Vibration Micro-motors", *Proc. of the 2005 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Barcelona, Spain, April 18-22, 2005*. p. 3627-3632.
- [8] Vartholomeos P., and Papadopoulos E., "Analysis, Design and Control of a Planar Micro-robot Driven by Two Centripetal-Force Actuators," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '06), May 2006, Orlando, FL, USA*, pp. 649-654.
- [9] Vartholomeos, P., & Papadopoulos, E. (2008). *Analysis and Experiments on the Force Capabilities of Centripetal-Force-Actuated Microrobotic Platforms. IEEE Transactions on Robotics*, 24(3), 588–599.
- [10] Vartholomeos, P., Vlachos, K., and Papadopoulos, E., "On the Force Capabilities of Centripetal Force-actuated Microrobotic Platforms," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'07), April 10-14, 2007, Roma, Italy*, pp. 1116-1121.
- [11] Vincent Chan, Steve Underwood, Mars Leung, Roc Yu, "CC430-Based Simple Wireless Mesh Network Mains Switch", *Application Report, SLAA487–April 2011*.
- [12] Weize Zhang, Sobolevski, A., Bing Li, Yong Rao, & Xinyu Liu. (2014). "A force-controlled robotic micromanipulation system for mechanotransduction studies of

drosophila larvae.” 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.

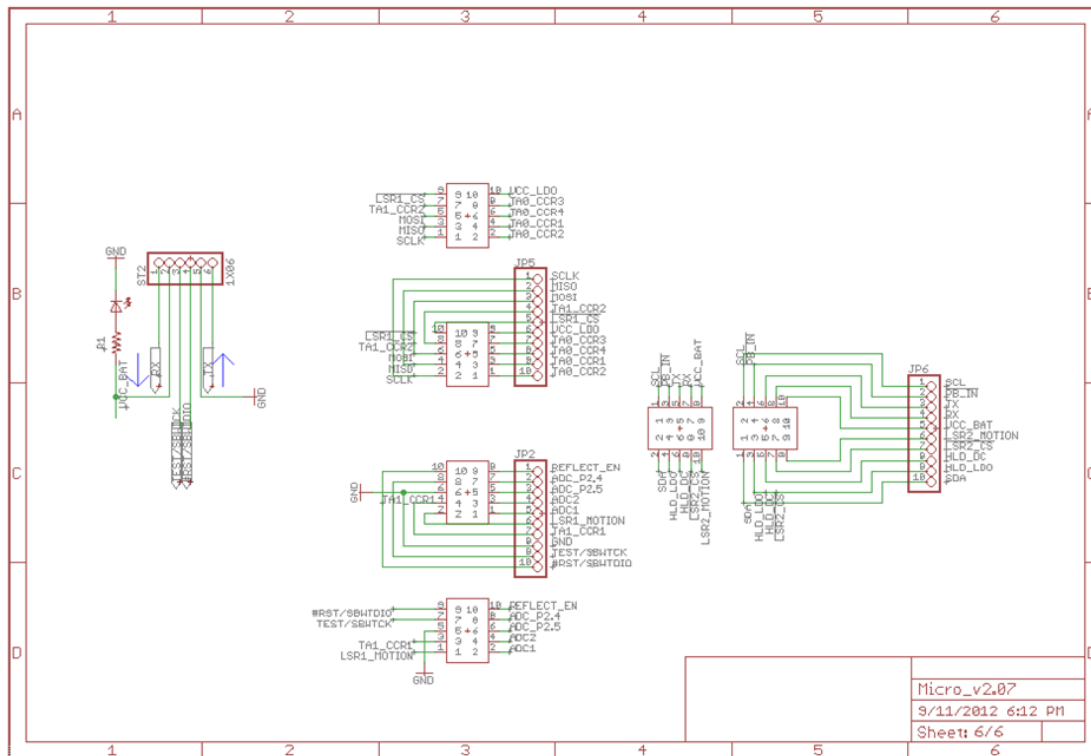
- [13] Βαρθολομαίος Παναγιώτης, «Μοντελοποίηση και Έλεγχος Μικρορομποτικών Συστημάτων». Διδακτορική Διατριβή ΕΜΠ 2007 , ΑΘΗΝΑ.
- [14] Δημητρόπουλος Χρύσανθος, «Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ασύρματης Επικοινωνίας Μικροεπεξεργαστών με Εφαρμογή στην Οδήγηση Μικρορομποτικού Μηχανισμού». *Διπλωματική Εργασία Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών* ΕΜΠ 2012, ΑΘΗΝΑ.
- [15] Δημητρόπουλος Χρύσανθος, «Κατασκευή και προγραμματισμός αναβαθμισμένου αυτόνομου μικρορομπότ με φυγοκεντρική επενέργηση». *Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΠ 2014*, ΑΘΗΝΑ.
- [16] Καραϊσκος Κωνσταντίνος, «Υλοποίηση λογισμικού βελτιωμένης έκδοσης μικρορομπότ και ανάπτυξη συστήματος εντοπισμού θέσης για τον έλεγχο κίνησης της πλατφόρμας». *Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΠ 2020*, ΑΘΗΝΑ.
- [17] Λαμπούσης Χαράλαμπος, «Ανάπτυξη και Υλοποίηση Συστήματος Οπτικών Αισθητήρων και Ασύρματης Επικοινωνίας Μικρορομποτικής Πλατφόρμας». *Διπλωματική Εργασία Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών* ΕΜΠ 2017, ΑΘΗΝΑ.
- [18] Μουγιάκος Κωνσταντίνος, «Υλοποίηση Συστήματος Ελέγχου Αυτόνομου Μικρορομπότ με Μικροελεγκτή PIC». *Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΠ 2007*, ΑΘΗΝΑ.
- [19] Σούλης Γεράσιμος, «Σχεδιασμός και Υλοποίηση κυκλωμάτων ασύρματης επικοινωνίας, οδήγησης και ελέγχου αυτόνομης μικρορομποτικής πλατφόρμας». *Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «Συστήματα Αυτοματισμού»* ΕΜΠ 2009, ΑΘΗΝΑ.

## Παράρτημα Α: «Datasheets»

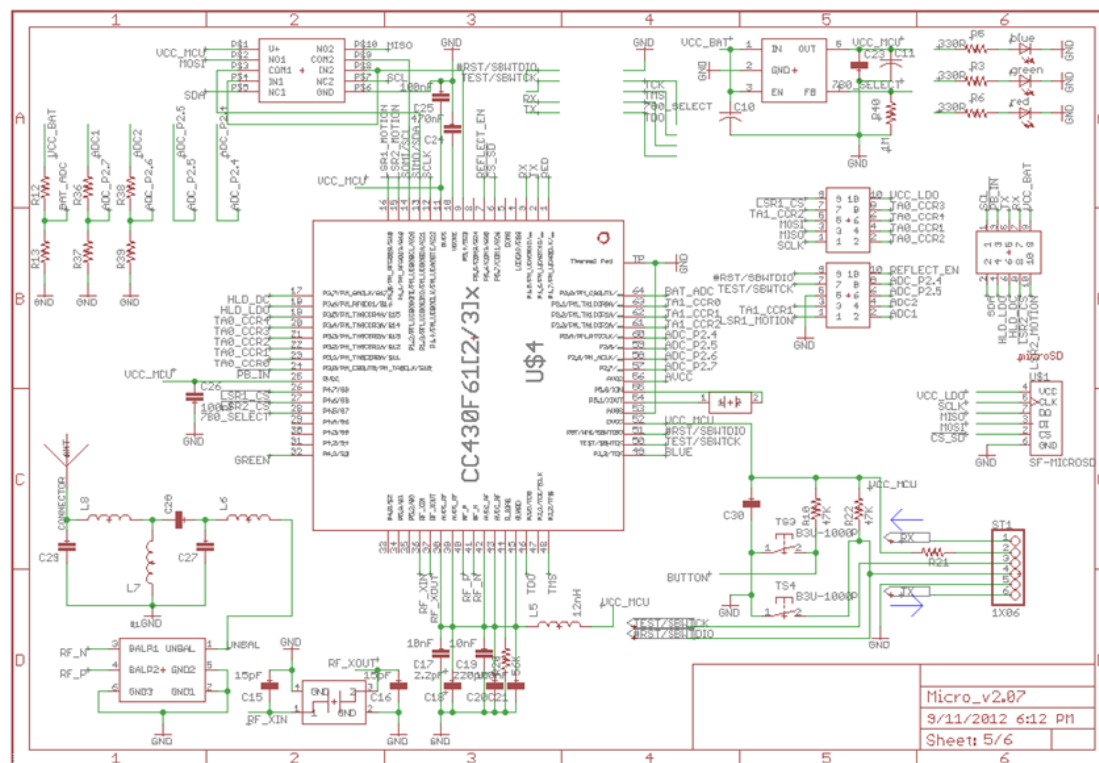
- [20] A3901, Dual Full Bridge Low Voltage Motor Driver.
- [21] AD620, Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier
- [22] ADM8828, Switched-Capacitor Voltage Inverter with Shutdown
- [23] ADNS-7550 Integrated molded lead-frame DIP Sensor.
- [24] CC430 Family User's Guide (Rev. E).
- [25] CC430F613x, CC430F612x, CC430F513x MSP430 SoC With RF Core (Rev.H), Sep 2013.
- [26] HEF40106B, Hex inverting Schmitt trigger
- [27] TPS65721EVM, User's Guide SLVU339–February 2010.
- [28] TPS780xxEVM-301, Mar 2008.
- [29] Pico Vibe™ 4mm Vibration Motor - 10mm Type.

# Παράρτημα Β: «Σχηματικά 2<sup>ης</sup> έκδοσης μικρορομπότ»

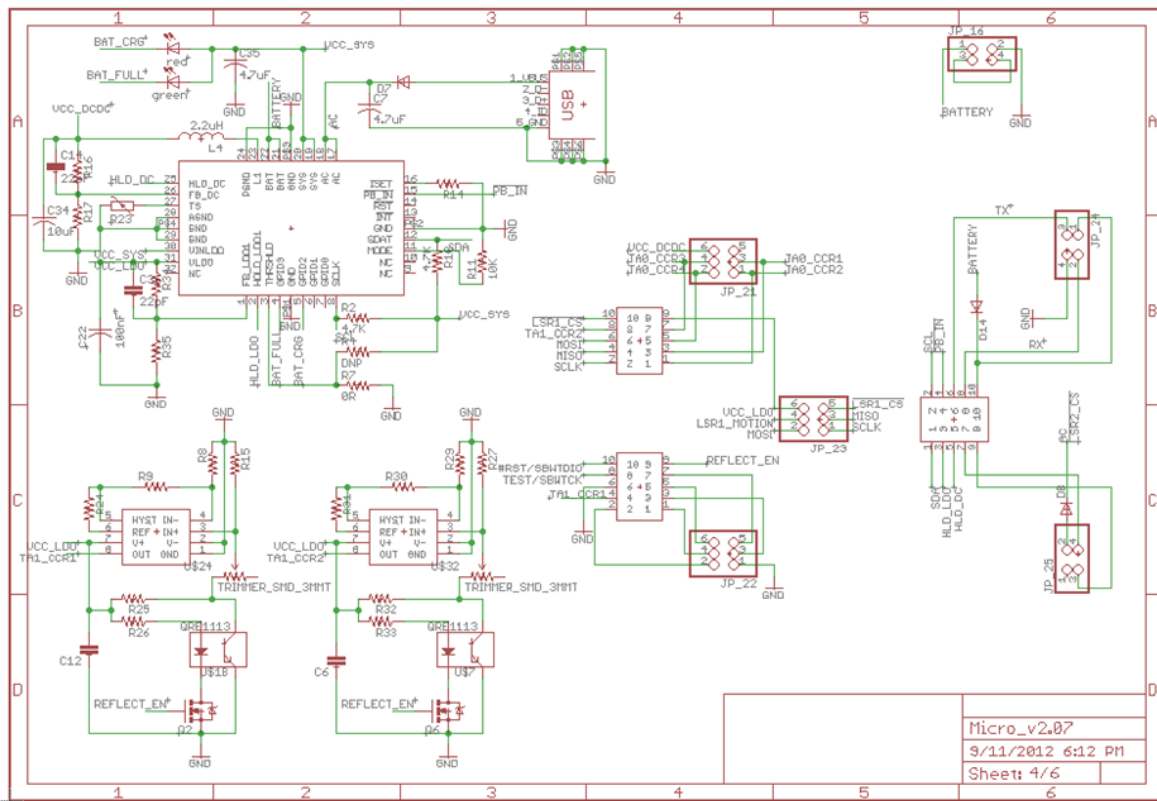
Επίπεδο 0:



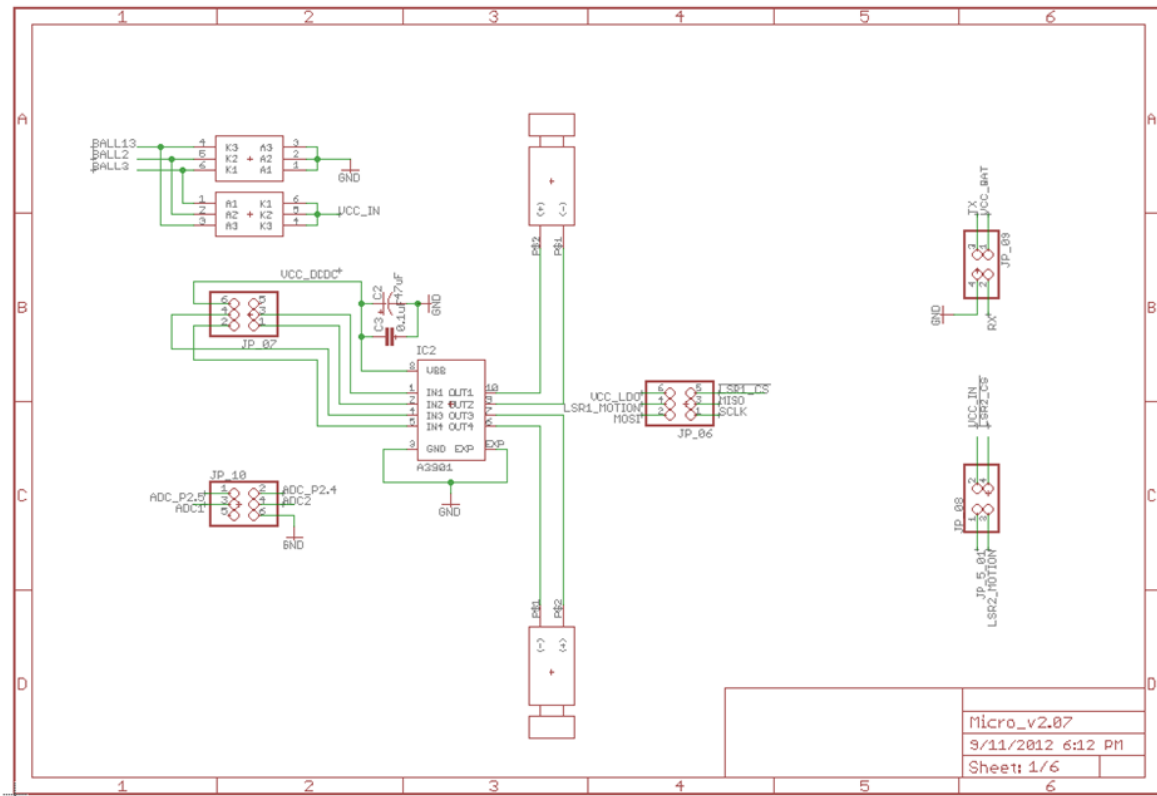
Επίπεδο 1:



## Επίπεδο 2:



## Επίπεδο 3:



### Επίπεδο 4:

